

Measurements of Voltage Harmonics in 400 kV Transmission Network

Authors

Ryszard Pawełek
 Irena Wasiak
 Marian Jurek

Keywords

voltage harmonics, power quality, power quality measurements

Abstract

The paper deals with the analysis of voltage harmonics measurements performed in the 400 kV transmission network. 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.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2014212

1. Introduction

Voltage harmonics in high voltage networks are usually measured with voltage measuring transformers. Various types of voltage measuring transformers used in the power sector are designed to work at the frequency of 50 Hz, and their transfer characteristics for higher frequencies are unknown. When analysing the equivalent circuit diagrams it should be noted how the inductance, capacity and numerous non-linearities affect their transfer characteristics in respect of frequency.

The need to monitor the power quality parameters in power networks has been indicated for a long time [1]. In order to perform an accurate measurement of voltage harmonics (wh), frequency and individual disturbances (e.g. levels of overvoltages or dips), the transmission network operator, PSE Operator SA, has installed a measuring resistive divider in one of 400 kV stations in cooperation with Transformex sp. z o.o. A detailed technical description of the divider is included in [2, 3].

Generally, a resistive divider should be a linear element in respect of frequency, and therefore should transfer voltage waveforms in transient and steady states of network operation without any distortions. Thus, it should be free from most defects that can be found in voltage measuring transformers. The divider measuring properties in this respect have been confirmed by laboratory tests carried out by the Institute of Electrical Engineering (Warszawa-Międzyzylesie) [2].

A resistive divider was used to compare and evaluate the results of voltage harmonic measurements carried out with the selected types of high voltage measuring transformers. On the basis of comparative measurements it will be possible to determine the usefulness of voltage measuring transformers in measurements of voltage harmonics, and in some cases to specify the correction factors.

2. Measurements

Measurements of voltage harmonics in the transmission network of 400 kV were performed using the UP-2210 analyser produced by the Swedish company Unipower. Measurement signals of the same phase voltage were simultaneously entered to three independent voltage inputs in the analyser; the signals came from: resistive voltage divider, inductive measuring voltage transformer and capacitive voltage measuring transformer. The measurements were carried out for 7 days (12 December 2012, 0:00 – 19, December 2012, 0:00). Respective values were measured continuously (every half period of voltage curve) and averaged in 10-minute intervals. The following were measured: phase voltage amplitude, voltage distortion factors, relative (percentage) values of individual harmonics and their phase angles.

The results of measurements obtained using the resistive divider, the transfer function of which is independent of frequency, were adopted as reference values and compared with the results obtained from the measuring transformers. Phase angles of respective voltage harmonics were determined in relation to the phase angle of the fundamental harmonic measured using the resistive divider ($\varphi_{U1(d)} = 0^\circ$).

The 400 kV field in which the resistive divider is installed is switched periodically; therefore the number of samples for each measured quantity is 494 in a period of one week (rather than 1008). Fig. 1 shows changes in the rms value of phase voltage measured in divider switching periods.

Fig. 2 shows changes in the rms value of voltage measured using all three measuring transducers.

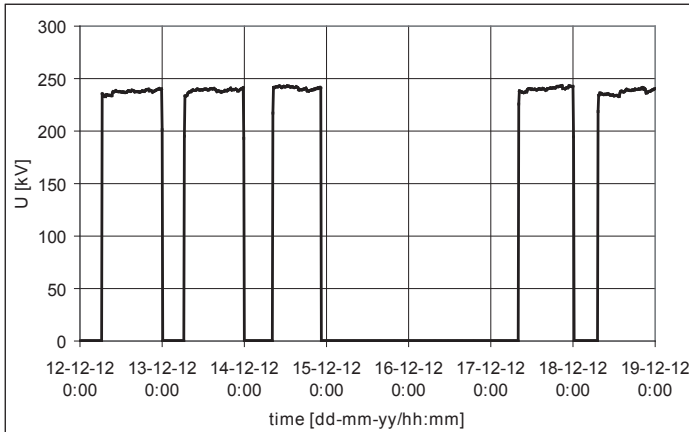


Fig. 1. Changes in the divider rms voltage in the measurement period

3. Evaluation of measurement results

The accuracy of measurements of voltage harmonics and their phase angles by voltage measuring transformers were carried out according to the following procedure:

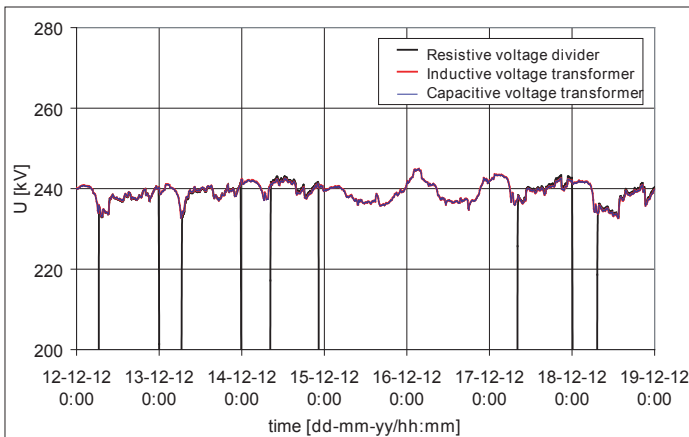


Fig. 2. Changes in voltage in the measurement period

1. The following average values were determined based on the sets of relative values of higher harmonics measured using individual transducers (resistive voltage divider, inductive voltage measuring transformer and capacitive voltage measuring transformer):

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

where: $U_{h\%,i}$ – the average value of h -th harmonic in i -th 10-minute interval, $N = 494$ – number of measurements

and the standard deviation was specified:

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

2. By analogy, the average values were determined based on the sets of harmonic phase angles measured using respective transducers:

$$\bar{\varphi}_h = \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_{h,i}}{N} \quad (3)$$

where: $\varphi_{h,i}$ – the value of h -th harmonics in i -th 10-minute interval and the standard deviation was specified:

$$\sigma_{\varphi_h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_{h,i} - \bar{\varphi}_h)^2}{N}} \quad (4)$$

Relative error was established for each individual voltage harmonic obtained using (inductive or capacitive) voltage measuring transformers with the result from the resistive divider used as a reference value:

$$\delta_{U_{h\%,i}} = \frac{U_{h\%,i(p)} - U_{h\%,i(d)}}{U_{h\%,i(d)}} 100\% \quad (5)$$

where: $U_{h\%,i(p)}$ – the relative value of h -th harmonic in i -th 10-minute interval measured using the voltage measuring transformer, $U_{h\%,i(d)}$ – the relative value of h -th harmonic in i -th 10-minute interval measured using the resistive divider,

then the average value and standard deviation for that error were established in accordance with [6] and [7]:

$$\bar{\delta}_{U_{h\%}} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{U_{h\%,i}}}{N} \quad (6)$$

$$\sigma_{\delta_{U_{h\%}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{U_{h\%,i}} - \bar{\delta}_{U_{h\%}})^2}{N}} \quad (7)$$

The angle error for measurements of respective voltage harmonics obtained using measuring transformers was determined in the same way:

$$\delta_{\varphi_{h,i}} = \varphi_{h,i(p)} - \varphi_{h,i(d)} \quad (8)$$

where: $\varphi_{h,i(p)}$ – the phase angle value of h -th harmonic in i -th 10-minute interval measured using the voltage measuring transformer, $\varphi_{h,i(d)}$ – the phase angle value of h -th harmonic in i -th 10-minute interval measured using the resistive divider, then the

average value and standard deviation for that error were established in accordance with [9] and [10]:

$$\bar{\delta}_{\varphi h} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\varphi h,i}}{N} \tag{9}$$

$$\sigma_{\delta_{\varphi h}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{\varphi h,i} - \bar{\delta}_{\varphi h})^2}{N}} \tag{10}$$

4. Results of measurements

4.1. Total harmonic distortion

Fig. 3 shows the changes in the total harmonic distortion (THD) in the measurement period. While we can observe a high compliance of the results of measurements carried out using the divider and inductive voltage measuring transformer, the measurements performed with the capacitive measuring transformer have much higher values of THD.

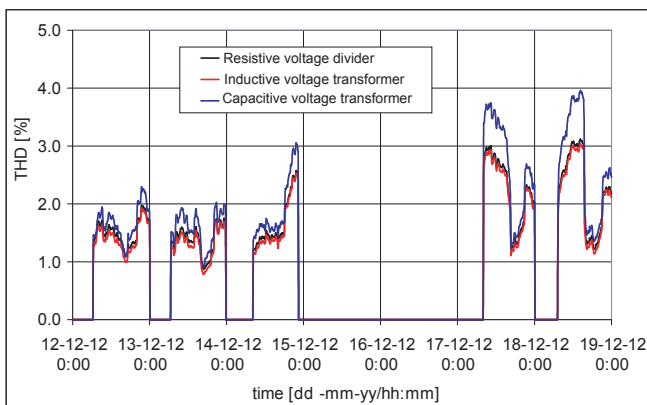


Fig. 3. Changes in voltage THD in the measurement period

The average values and standard deviations of THD measured using respective measuring transducers are listed in Tab. 1.

Measured quantity	Measuring transducer		
	Resistive voltage divider	Inductive voltage transformer	Capacitive voltage transformer
THD [%]	1.80	1.73	2.10
σ_{THD} [%]	0.59	0.59	0.79

Tab. 1. Average values and standard deviations of total harmonic distortion (THD)

Changes in errors in THD measurements carried out by voltage measuring transformers are shown in Fig. 4.

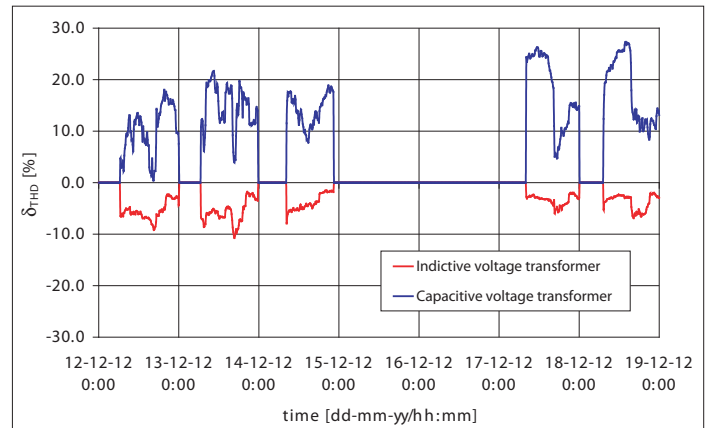


Fig. 4. Errors in voltage THD measurements in the measurement period

Tab. 2 shows the average values and standard deviations of errors in THD factor measurements carried out by voltage measuring transformers.

Measured quantity	Measuring transducer	
	Inductive voltage transformer	Capacitive voltage transformer
δ_{THD} [%]	-4.50	14.96
$\sigma_{\delta_{THD}}$ [%]	1.91	6.03

Tab. 2. Average values and standard deviations of errors in THD factor measurements

4.2. Voltage harmonics

Fig. 5 shows the frequency spectrum and average values (shares) of voltage harmonics recorded in the measurement period.

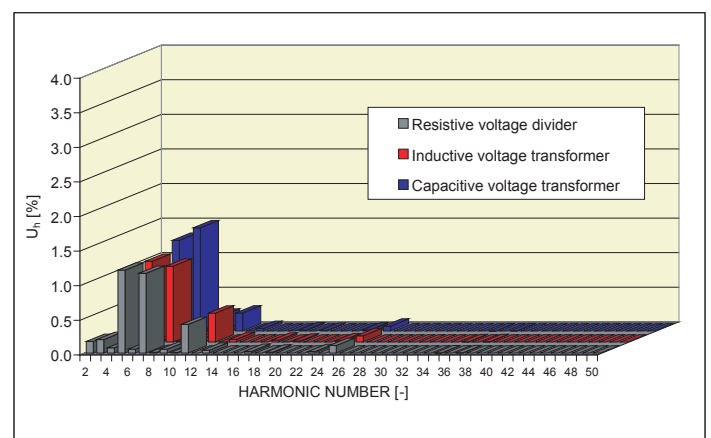


Fig. 5. The average values of voltage harmonics in the measurement period

The average values and standard deviations of selected voltage harmonics dominant in the frequency spectrum are compared in Tab. 3.

wh no.	Resistive voltage divider		Inductive voltage transformer		Capacitive voltage transformer	
	$\bar{U}_{H\%}$	$\delta_{U_{H\%}}$	$\bar{U}_{H\%}$	$\delta_{U_{H\%}}$	$\bar{U}_{H\%}$	$\delta_{U_{H\%}}$
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
4	0.075	0.011	0.012	0.009	0.015	0.009
5	1.198	0.312	1.166	0.321	1.310	0.356
6	0.057	0.014	0.026	0.013	0.031	0.015
7	1.154	0.661	1.098	0.659	1.492	0.889
9	0.055	0.025	0.047	0.022	0.215	0.073
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

Tab. 3. The average values of voltage harmonics

For comparison, Fig. 6 shows the maximum (10-minute) voltage harmonics recorded in the measurement period.

The following figures (7–10) show the changes in values of selected: 2 (even), 3 (order 3n; zero sequence), 5 (odd, order 3n-1; negative sequence) and 7 (odd, order 3n+1; positive sequence) voltage harmonics recorded in the measurement period using various measuring transducers. Significant differences may be noted only for the second harmonic, where the values measured using the resistive divider are much higher than in the case of voltage measuring transformers.

Tab. 4 shows the average values and standard deviations of errors in measurements of selected voltage harmonics.

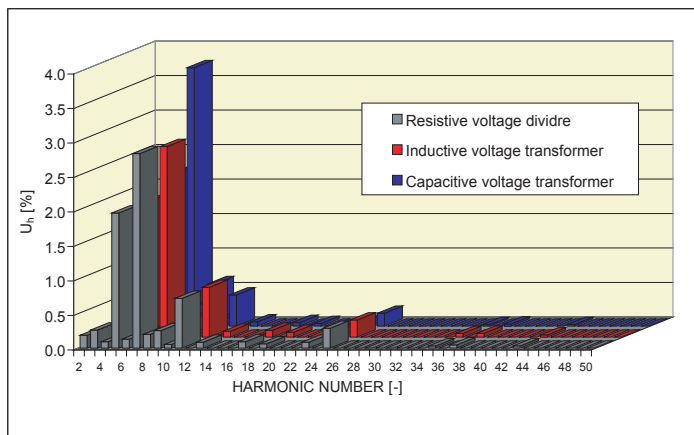


Fig. 6. The maximum values of voltage harmonics

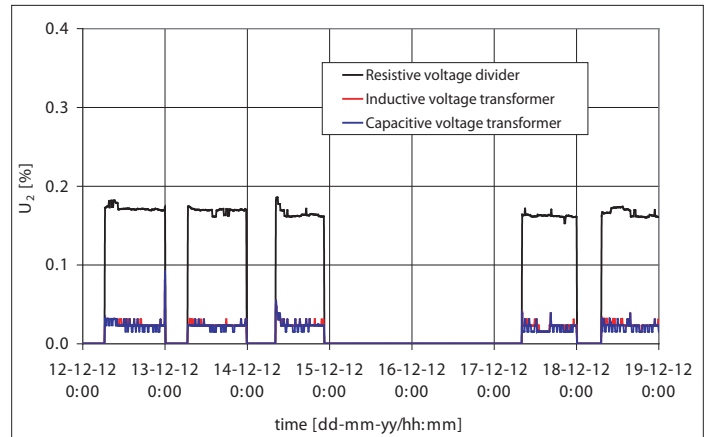


Fig. 7. Changes in the second voltage harmonic

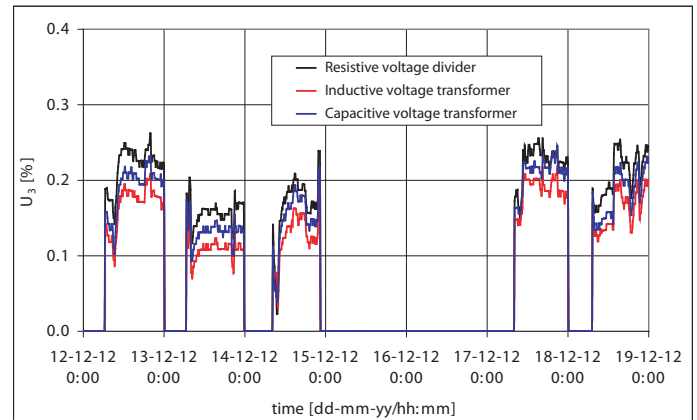


Fig. 8. Changes in the third voltage harmonic

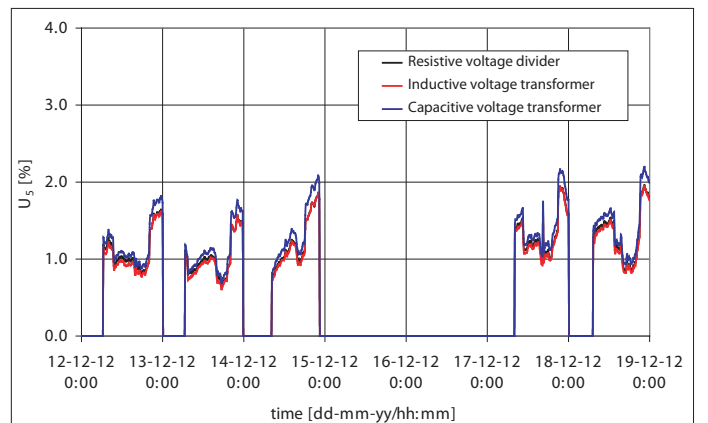


Fig. 9. Changes in the fifth voltage harmonic

Nr wh	Inductive voltage transformer		Capacitive voltage transformer	
	$\delta_{UH\%}$	$\sigma_{\delta U_h\%}$	$\delta_{UH\%}$	$\sigma_{\delta U_h\%}$
2	-85.25	2.94	-86.61	3.44
3	-22.60	14.21	-11.43	8.47
4	-81.59	20.85	-78.36	21.17
5	-3.00	1.97	9.11	2.45
6	-56.16	11.08	-47.50	13.30
7	-6.30	3.34	27.82	5.60
9	-15.34	15.87	312.05	122.50
11	0.93	1.58	-33.27	18.12
13	-4.77	11.80	6.42	51.89

Tab. 4. Errors in measurements of voltage harmonics using measuring transformers

The lowest values of errors in measurements of voltage harmonics using measuring transformers occurred for harmonics 5 and 7, i.e. the harmonics with the highest values. High error values for the other harmonics (especially even harmonics) may result from their low values (less than 0.2%), insignificant from the point of view of voltage distortion.

Fig. 11 shows the changes in errors in measurement of the fifth harmonic.

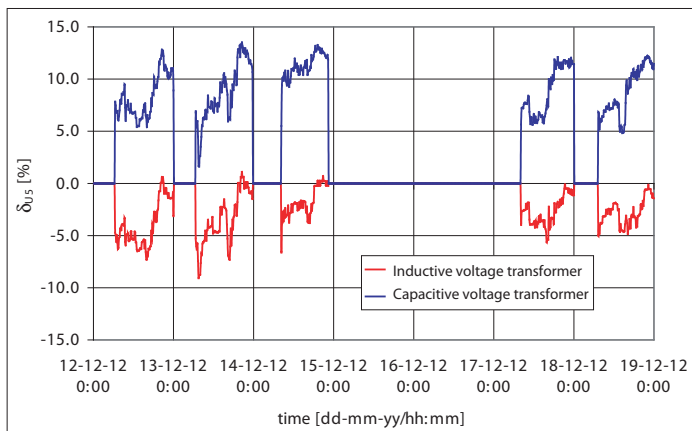


Fig. 11. Changes in errors in measurement of the fifth voltage harmonic

4.3. Phase angles of voltage harmonics

The average values and standard deviations of angles of selected voltage harmonics are compared in Tab. 5.

Fig. 12 shows the changes in phase angles for the fundamental voltage harmonic (in the case of the measurement carried out using the resistive divider the phase angle is constant and equal to zero), whereas Fig. 13 illustrates the changes in phase angles for the fifth harmonic.

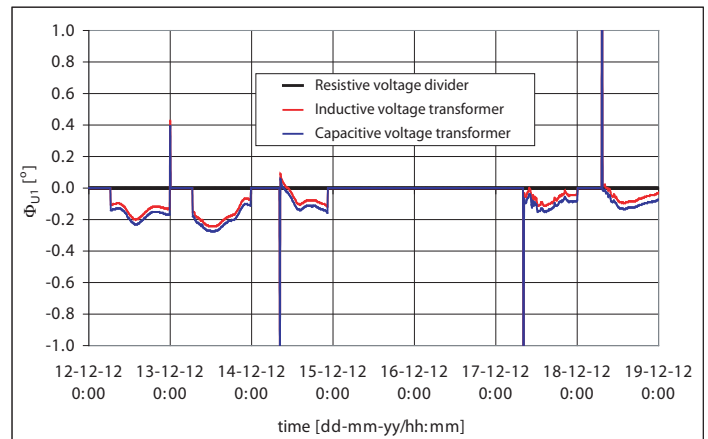


Fig. 12. Changes in phase angles of fundamental voltage harmonic in the measurement period

wh no.	Resistive voltage divider		Inductive voltage transformer		Capacitive voltage transformer	
	$\bar{\varphi}_h [^\circ]$	$\sigma_{\varphi_h [^\circ]}$	$\bar{\varphi}_h [^\circ]$	$\sigma_{\varphi_h [^\circ]}$	$\bar{\varphi}_h [^\circ]$	$\sigma_{\varphi_h [^\circ]}$
1	0.009	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
4	-90.978	7.241	84.640	65.719	109.467	69.833
5	115.967	14.866	116.057	14.591	113.323	14.279
6	-101.062	7.476	-118.187	37.989	-123.236	51.879
7	21.287	158.503	-2.843	158.863	7.131	158.547
9	54.585	132.170	41.269	117.029	114.143	32.889
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

Tab. 5. The average values of phase angles of selected voltage harmonics

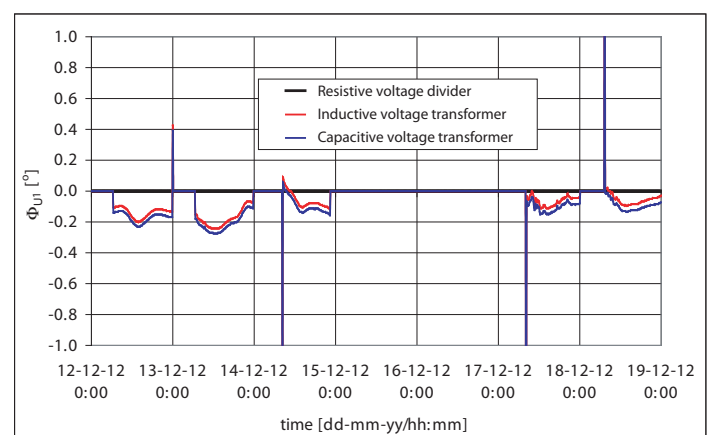


Fig. 13. Changes in phase angles of the fifth voltage harmonic in the measurement period

Fig. 12 shows that in the case of the fundamental voltage harmonic there are also differences in phase angles measurements carried out using the measuring transformers.

Tab. 6 shows the average values and standard deviations of errors in measurements of harmonic phase angles.

wh no.	Inductive voltage transformer		Capacitive voltage transformer	
	$\bar{\delta}_{\phi h} [^\circ]$	$\sigma_{\delta\phi h\%} [^\circ]$	$\bar{\delta}_{\phi h} [^\circ]$	$\sigma_{\delta\phi h\%} [^\circ]$
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
4	175.618	67.150	200.446	71.498
5	0.090	0.966	-2.644	1.281
6	-17.126	34.909	-22.174	49.250
7	-24.130	98.617	-14.156	77.402
9	-13.316	55.459	59.558	149.856
11	8.236	0.758	-120.719	20.359
13	6.196	30.377	61.351	72.447

Tab. 6. Errors in measurements of phase angles of selected voltage harmonics

The lowest errors in phase angles measurements were observed for the fundamental voltage harmonic and for the fifth harmonic. Relatively large errors occurred for the seventh harmonic. Fig. 14 and 15 show the changes in errors in phase angles measurements for the fundamental and fifth harmonic, respectively.

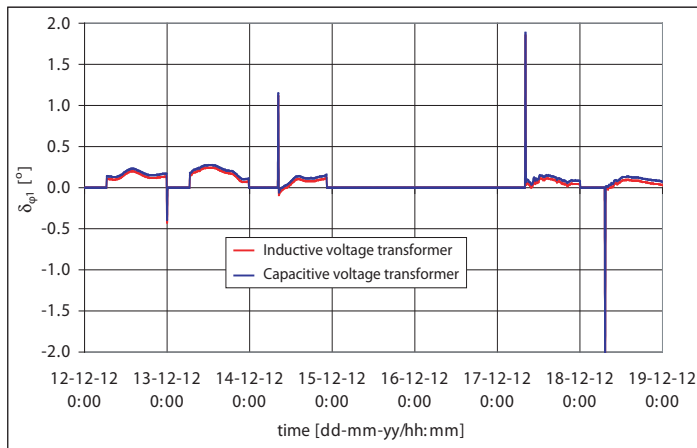


Fig. 14. Changes in errors in measurements of phase angles for the fundamental voltage harmonic

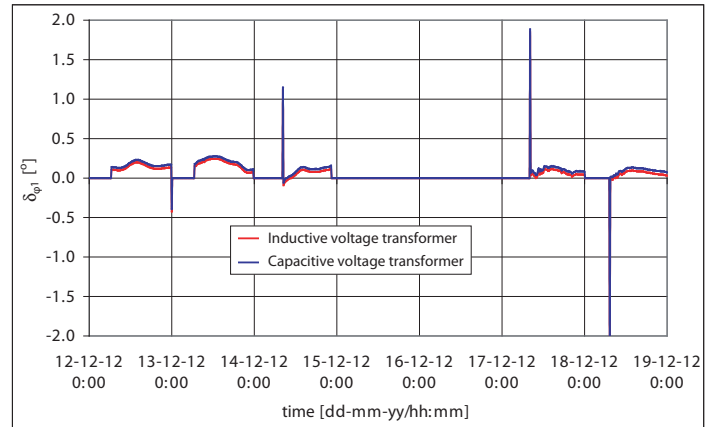


Fig. 14. Changes in errors in measurements of phase angles for the fundamental voltage harmonic

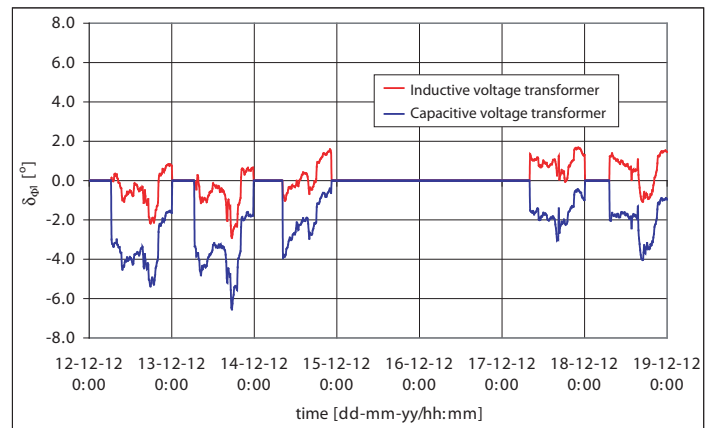


Fig. 15. Changes in errors in measurements of phase angles of the fifth voltage harmonic in the measurement period

4.4. DC voltage component

The transfer of DC voltage component by measuring transducers requires a separate analysis. Fig. 16 shows the values of DC component measured in the measurement period using respective measuring transducers.

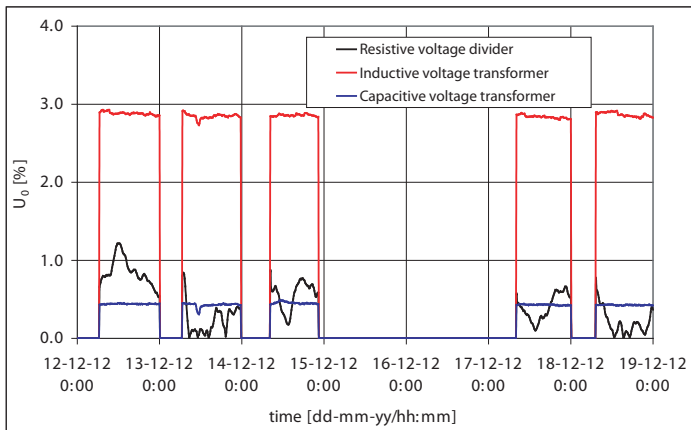


Fig. 16. Changes in the DC voltage component

DC component with practically constant values was recorded in measurements using the voltage measuring transformers; however, the values differed significantly between the inductive and capacitive measuring transformers. In the measurements using the resistive divider the values of DC component were changing over time.

5. Summary

The voltage divider was made by Transformex as a result of implementation of the development project “Design and construction of resistive voltage divider for measurements of voltage harmonics in a network of 400 kV” ordered and funded by PSE SA (agreement: IF/RB/IF/10/TK/2008). The results of voltage harmonic measurements were analysed by the Institute of Electrical Power Engineering at the Lodz University of Technology under the research project “Voltage harmonic measurements in a network of 400 kV” ordered by PSE SA (agreement: DS/RB/DE/8/TK/2012). The results of research are owned by PSE SA. Installation of the resistive divider made it possible to carry out comparative measurements of voltage harmonics in the network of 400 kV using inductive and capacitive measuring transformers, and the divider. The measurements were used to estimate the errors occurring in measurements of values and phase angles of voltage harmonics carried out with the use of conventional measuring transformers. The following were observed: a high compliance of the THD values measured with

the use of the divider and inductive measuring transformer (the average measurement error of -4.5%), and a relatively high value (14.96%) of the average error of measurements carried out using the capacitive measuring transformer. The best accuracy for harmonic measurements carried out using measuring transformers was obtained for the fifth and seventh harmonics, dominant in the voltage frequency spectrum. A significantly lower accuracy was found in measurement of harmonics with shares of less than 0.2% . The results suggest that odd and even harmonics should be treated separately. In measurements of phase angles of voltage harmonics satisfactory accuracy while using instrument transformer was obtained only for the fundamental and fifth harmonic. For other harmonics the errors are relatively large and characterized by high variability of values. A separate issue is a completely different nature of transfer of the DC voltage component by voltage measuring transformers and the resistive divider. For measuring transformers those values are practically constant over time, but vary depending on the type of transformer, whereas the value of DC component in the case of divider changes over time.

Although the measurement results obtained in the course of a one-week session are unique in the world, they may not be used as a basis for general conclusions. However, they indicate problems that should be explained in further research. More general conclusions can be drawn once the measurements are carried out in a longer time.

REFERENCES

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, pp. 21–27.
2. Błajszczak G., Olak J., Rezystancyjny dzielnik napięcia do pomiarów wyższych harmoniczných w sieciach 400 kV [*Resistive Voltage Divider for Higher Harmonics Measurement in 400 kV Networks*], conference “Aktualne problemy w elektroenergetyce” (APE '11), Jurata, 8–10 June 2011, pp. 97–104.
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, pp. 1–4.

Ryszard Pawelek

Lodz University of Technology

e-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering at Lodz University of Technology (1977). He is currently employed at the Institute of Electrical Power Engineering at his home university as a lecturer, where he works as the Deputy Director of the Institute. His scientific interests include: quality of electricity, distributed electricity generation, power micro-systems. He is a member of The Polish Committee for Quality and Efficient Use of Electricity, in which he acts as Vice-President for Science. Expert of the Polish Association of Electrical Engineers (SEP) in the field of electricity quality.

Irena Wasiak

Lodz University of Technology

e-mail: irena.wasiak@p.lodz.pl

She graduated from Lodz University of Technology. Since the beginning of her career she has been working at the Institute of Electrical Power Engineering. She obtained doctoral and postdoctoral degrees in the field of electrical power engineering. In 2002–2008 she was Vice Dean of the Faculty of Electrical, Electronic, Computer and Control Engineering at Lodz University of Technology. She currently is the Director of the Institute and Head of the Department of Electrical Power Networks. She is also a member of The Institution of Engineering and Technology and The Polish Committee for Quality and Efficient Use of Electricity, The Polish Association of Electrical Engineers (SEP), and an associate member of the Electrical Power Systems Section at the Polish Academy of Sciences (PAN). She is the deputy editor of the journal “Electrical Power Quality and Utilisation” and the co-president of the international conference with the same name. Her scientific activities include the issues of power quality, integration of distributed energy sources in power networks, operation of power micro-systems.

Marian Jurek

Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA

e-mail: pawel.kelm@p.lodz.pl

In 1999–2012 he was employed in Polskie Sieci Elektroenergetyczne (Polish Power Grid), currently PSE Operator SA, where he handled system services, then international energy exchange settlement. Now he is responsible for implementation of new technologies, energy quality and reactive power management. Since February 2012 he has implemented a half-year project on the power plant control systems in Emerson Process Management Power & Water Solutions. He currently collaborates with City Energy sp. z o.o. A member of the following: The Polish Association of Electrical Engineers (SEP), IEEE, Eurelectric, The Scientific and Technical (NOT) Committee for Energy Management and The Polish Committee for Quality and Efficient Use of Electricity. An expert in electricity quality, and author of over 120 scientific and technical publications.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 127–134. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Pomiary wyższych harmonicznych napięcia w sieci 400 kV

Autorzy

Ryszard Pawełek
Irena Wasiak
Marian Jurek

Słowa kluczowe

wyższe harmoniczne, jakość energii elektrycznej, pomiary jakości energii elektrycznej

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę wyników pomiarów wyższych harmonicznych napięcia, wykonanych w sieci przesyłowej 400 kV. Sygnały pomiarowe napięć 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 harmonicznych napięcia powodowanych przez przekładniki.

1. Wprowadzenie

Najczęściej do pomiaru wyższych harmonicznych 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]. Chcąc wykonać dokładny pomiar wyższych harmonicznych (wh) napięcia, częstotliwości oraz pojedynczych zakłóceń (np. stromości przepięć lub zapadów), operator sieci przesyłowej PSE Operator SA, 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].

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. Powinien być więc pozbawiony większości wad, które mają 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 harmonicznych napięcia pomierzonych, przy wykorzystaniu wybranych typów przekładników napięciowych wysokiego napięcia. Na podstawie pomiarów porównawczych będzie można określić przydatność przekładników napięciowych do pomiarów wyższych harmonicznych, a w niektórych przypadkach określić współczynniki korekcyjne.

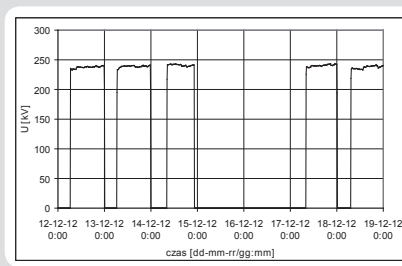
2. Wykonanie pomiarów

Pomiary wyższych harmonicznych w sieci 400 kV wykonane zostały przy użyciu

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 7 dni (12 grudnia 2012, godz. 0:00 – 19 grudnia 2012, 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 harmonicznych i ich kąty fazowe.

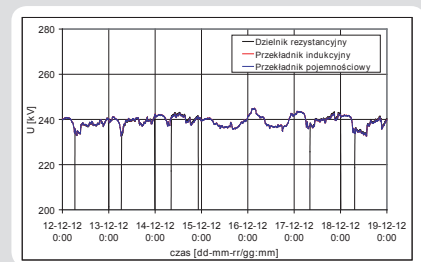
Wyniki pomiarów, uzyskane z wykorzystaniem dzielnika rezystancyjnego o charakterystyce przenoszenia niezależnej od częstotliwości, przyjęto jako referencyjne, odnosząc do nich wyniki pomiarów uzyskane przy wykorzystaniu przekładników. Kąty fazowe poszczególnych harmonicznych wyznaczane były względem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

Pole 400 kV, w którym zainstalowany jest dzielnik rezystancyjny, jest załączane okresowo, dlatego liczebność próbek dla poszczególnych mierzonych wielkości wynosi 494 w okresie tygodniowym (zamiast 1008). Na rys. 1 pokazano zmiany wartości skutecznej napięcia fazowego, mierzonego w okresach załączenia dzielnika.



Rys. 1. Zmiany napięcia dzielnika w okresie pomiarowym

Na rys. 2 przedstawiono zmiany wartości skutecznej napięcia mierzonego przy wykorzystaniu wszystkich trzech przetworników pomiarowych.



Rys. 2. Zmiany napięcia 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, zmierzonych przy wykorzystaniu poszczególnych przetworników (rezystancyjnego dzielnika napięcia, napięciowego przekładnika indukcyjnego oraz napięciowego przekładnika pojemnościowego), wyznaczono wartości średnie:

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

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

oraz określono odchylenie standardowe:

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

2. Analogicznie ze zbiorów wartości kątów fazowych harmonicznych, zmierzonych przy wykorzystaniu poszczególnych przetworników, wyznaczono wartości średnie:

$$\bar{\varphi}_h = \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_{h,i}}{N} \quad (3)$$

gdzie: $\varphi_{h,i}$ – wartość kąta fazowego h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym

oraz określono odchylenie standardowe:

$$\sigma_{\varphi h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varphi_{h,i} - \bar{\varphi}_h)^2}{N}} \quad (4)$$

Dla poszczególnych harmonicznych napięcia uzyskanych przy wykorzystaniu przekładników napięciowych (indukcyjnego bądź pojemnościowego) wyznaczono błąd względny, przyjmując jako wartość referencyjną wynik pomiaru uzyskany za pomocą dzielnika rezystancyjnego:

$$\delta_{U_{h\%},i} = \frac{U_{h\%,i(p)} - U_{h\%,i(d)}}{U_{h\%,i(d)}} 100\% \quad (5)$$

gdzie: $U_{h\%,i(p)}$ – wartość względna h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym, zmierzona przy wykorzystaniu przekładnika napięciowego, $U_{h\%,i(d)}$ – wartość względna h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym, zmierzona przy wykorzystaniu dzielnika rezystancyjnego, a następnie wyznaczono wartość średnią i odchylenie standardowe dla tego błędu, zgodnie z zależnościami (6) i (7):

$$\bar{\delta}_{U_{h\%}} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{U_{h\%},i}}{N} \quad (6)$$

$$\sigma_{\delta_{U_{h\%}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{U_{h\%},i} - \bar{\delta}_{U_{h\%}})^2}{N}} \quad (7)$$

W analogiczny sposób wyznaczono błąd kątowy dla pomiarów poszczególnych harmonicznych napięcia uzyskanych przy wykorzystaniu przekładników napięciowych (indukcyjnego bądź pojemnościowego):

$$\delta_{\varphi_{h,i}} = \varphi_{h,i(p)} - \varphi_{h,i(d)} \quad (8)$$

gdzie: $\varphi_{h,i(p)}$ – wartość kąta fazowego h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym, zmierzona przy wykorzystaniu przekładnika napięciowego, $\varphi_{h,i(d)}$ – wartość kąta fazowego h -tej harmonicznej w i -tym przedziale 10-minutowym, zmierzona przy wykorzystaniu dzielnika rezystancyjnego, oraz wyznaczono wartość średnią i odchylenie standardowe dla tego błędu, zgodnie z zależnościami (9) i (10):

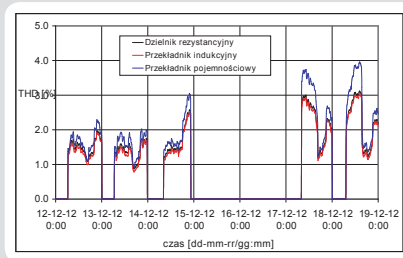
$$\bar{\delta}_{\varphi h} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{\varphi_{h,i}}}{N} \quad (9)$$

$$\sigma_{\delta_{\varphi h}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{\varphi_{h,i}} - \bar{\delta}_{\varphi h})^2}{N}} \quad (10)$$

4. Wyniki pomiarów

4.1. Całkowity współczynnik odkształcenia napięcia

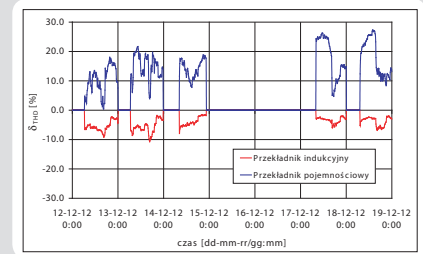
Na rys. 3 pokazano zmiany wartości całkowitego współczynnika odkształcenia napięcia (THD) w okresie pomiarowym. O ile można zauważyć dużą zgodność wyników pomiarów wykonanych przy wykorzystaniu dzielnika i przekładnika indukcyjnego, o tyle pomiary dokonane za pomocą przekładnika pojemnościowego



Rys. 3. Zmiany wartości THD napięcia w okresie pomiarowym

dają znacznie większe wartości współczynnika THD.

Wartości średnie oraz odchylenia standardowe współczynnika THD, zmierzone za pomocą poszczególnych przetworników pomiarowych, zestawiono w tab. 1.



Rys. 4. Błędy pomiarowe THD napięcia w okresie pomiarowym

Zmiany wartości błędów pomiaru współczynnika THD przez przekładniki napięciowe pokazano na rys. 4.

Wielkość mierzona	Przetwornik pomiarowy		
	Dzielnik rezystancyjny	Przekładnik indukcyjny	Przekładnik pojemnościowy
THD [%]	1,80	1,73	2,10
σ_{THD} [%]	0,59	0,59	0,79

Tab. 1. Wartości średnie i odchylenia standardowe całkowitego współczynnika odkształcenia napięcia THD

Wielkość mierzona	Przetwornik pomiarowy	
	Przekładnik indukcyjny	Przekładnik pojemnościowy
$\bar{\delta}_{THD}$ [%]	-4,50	14,96
$\sigma_{\delta_{THD}}$ [%]	1,91	6,03

Tab. 2. Wartości średnie i odchylenia standardowe błędów pomiaru współczynnika THD

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
4	0,075	0,011	0,012	0,009	0,015	0,009
5	1,198	0,312	1,166	0,321	1,310	0,356
6	0,057	0,014	0,026	0,013	0,031	0,015
7	1,154	0,661	1,098	0,659	1,492	0,889
9	0,055	0,025	0,047	0,022	0,215	0,073
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

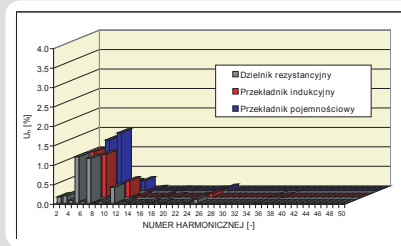
Tab. 3. Wartości średnie wyższych harmonicznych napięcia

W tab. 2 podano średnie wartości i odchylenia standardowe błędów pomiaru współczynnika THD przez przekładniki napięciowe.

4.2. Wyższe harmoniczne napięcia

Na rys. 5 pokazano spektrum częstotliwościowe (widmo) i wartości średnie (udziały) wyższych harmonicznych zarejestrowanych w okresie pomiarowym.

Wartości średnie i odchylenia standardowe wybranych dominujących w widmie częstotliwościowym harmonicznych napięcia, zestawiono w tab. 3.



Rys. 5. Wartości średnie wyższych harmonicznych napięcia w okresie pomiarowym

Nr wh	Przekładnik indukcyjny		Przekładnik pojemnościowy	
	$\bar{\delta}_{UH\%}$	$\sigma_{\delta UH\%}$	$\bar{\delta}_{UH\%}$	$\sigma_{\delta UH\%}$
2	-85,25	2,94	-86,61	3,44
3	-22,60	14,21	-11,43	8,47
4	-81,59	20,85	-78,36	21,17
5	-3,00	1,97	9,11	2,45
6	-56,16	11,08	-47,50	13,30
7	-6,30	3,34	27,82	5,60
9	-15,34	15,87	312,05	122,50
11	0,93	1,58	-33,27	18,12
13	-4,77	11,80	6,42	51,89

Tab. 4. Błędy pomiaru wyższych harmonicznych napięcia za pomocą przekładników

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
4	-90,978	7,241	84,640	65,719	109,467	69,833
5	115,967	14,866	116,057	14,591	113,323	14,279
6	-101,062	7,476	-118,187	37,989	-123,236	51,879
7	21,287	158,503	-2,843	158,863	7,131	158,547
9	54,585	132,170	41,269	117,029	114,143	32,889
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

Tab. 5. Wartości średnie kątów fazowych wybranych harmonicznych napięcia

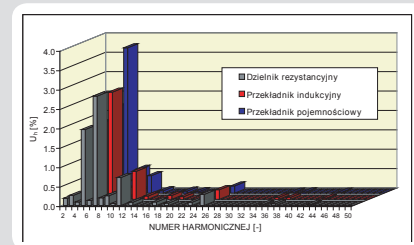
Nr wh	Przekładnik indukcyjny		Przekładnik pojemnościowy	
	$\bar{\delta}_{\varphi h}$ [°]	$\sigma_{\delta\varphi H\%}$ [°]	$\bar{\delta}_{\varphi h}$ [°]	$\sigma_{\delta\varphi H\%}$ [°]
1	-0,102	0,157	-0,137	0,156
2	25,262	5,210	-11,081	4,703
3	-9,133	9,877	-9,007	8,207
4	175,618	67,150	200,446	71,498
5	0,090	0,966	-2,644	1,281
6	-17,126	34,909	-22,174	49,250
7	-24,130	98,617	-14,156	77,402
9	-13,316	55,459	59,558	149,856
11	8,236	0,758	-120,719	20,359
13	6,196	30,377	61,351	72,447

Tab. 6. Błędy pomiarów kątów fazowych wybranych harmonicznych napięcia

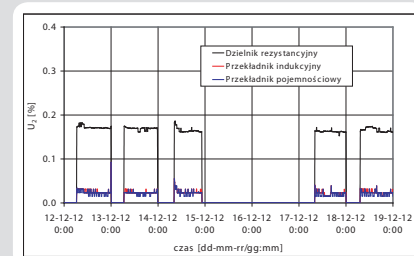
Dla porównania na rys. 6 pokazano wartości maksymalne (10-minutowe) wyższych harmonicznych zarejestrowane w okresie pomiarowym.

Na kolejnych rysunkach (7–10) przedstawiono zmiany wartości wybranych: 2 (parzysta, 3 (rzędu 3n; kolejność zerowa), 5 (nieparzysta rzędu 3n-1; kolejność przeciwna) i 7 (nieparzysta rzędu 3n+1; kolejność zgodna) wyższych harmonicznych napięcia, zarejestrowane w okresie pomiarowym przy wykorzystaniu różnych przetworników pomiarowych. Istotne różnice można zauważyć tylko w przypadku drugiej harmonicznej, gdzie wartości zmierzone przy zastosowaniu dzielnika rezystancyjnego są zdecydowanie wyższe niż przy wykorzystaniu przekładników.

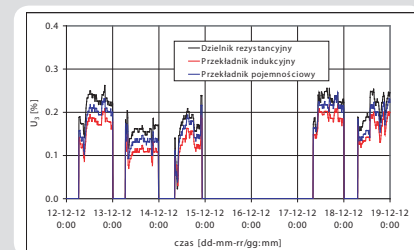
W tab. 4 podano średnie wartości i odchylenia standardowe błędów pomiaru, przeprowadzonego za pomocą przekładników napięciowych, wybranych wyższych harmonicznych.



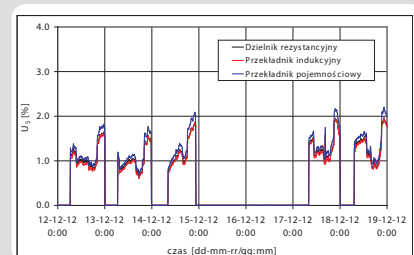
Rys. 6. Wartości maksymalne wyższych harmonicznych napięcia



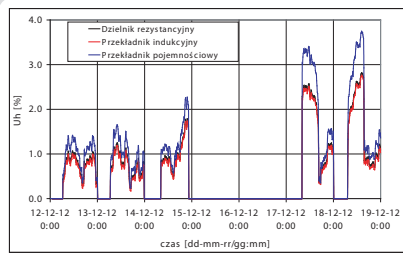
Rys. 7. Zmiany wartości drugiej harmonicznej napięcia



Rys. 8. Zmiany wartości trzeciej harmonicznej napięcia



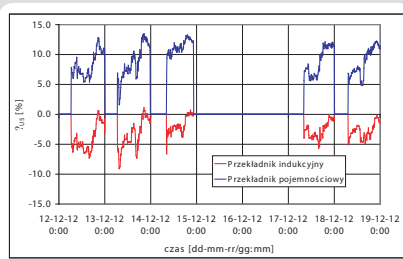
Rys. 9. Zmiany wartości piątej harmonicznej napięcia



Rys. 10. Zmiany wartości siódmej harmonicznej napięcia

Najmniejsze wartości błędów pomiaru wyższych harmonicznych za pomocą przekładników wystąpiły dla harmonicznych 5 i 7, czyli dla harmonicznych o największych wartościach. Duże wartości błędów dla pozostałych harmonicznych (szczególnie harmonicznych parzystych) mogą wynikać z ich małych wartości (poniżej 0,2%), nieistotnych z punktu widzenia odkształcenia przebiegu napięcia.

Na rys. 11 pokazano zmiany wartości błędów pomiaru wartości piątej harmonicznej.

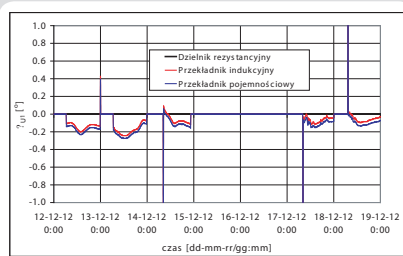


Rys. 11. Zmiany wartości błędów pomiaru piątej harmonicznej napięcia

4.3. Kąty fazowe harmoniczne napięcia

Wartości średnie i odchylenia standardowe kątów wybranych harmonicznych napięcia zestawiono w tab. 5.

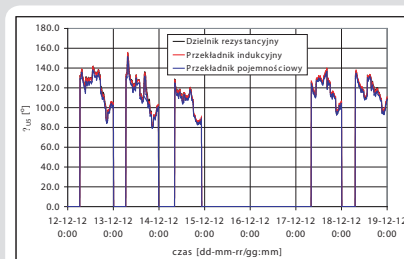
Na rys. 12 pokazano zmiany kątów fazowych dla podstawowej harmonicznej napięcia (w przypadku pomiaru z wykorzystaniem dzielnika rezystancyjnego kąt fazowy jest stały i równy zeru), a na rys. 13 zmiany kątów fazowych dla piątej harmonicznej.



Rys. 12. Zmiany wartości kątów fazowych harmonicznej podstawowej napięcia w okresie pomiarowym

Nr wh	Przekładnik indukcyjny		Przekładnik pojemnościowy	
	$\overline{\delta_{\varphi h}} [^\circ]$	$\sigma_{\delta\varphi H\%} [^\circ]$	$\delta_{\varphi h} [^\circ]$	$\sigma_{\delta\varphi H\%} [^\circ]$
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
4	175,618	67,150	200,446	71,498
5	0,090	0,966	-2,644	1,281
6	-17,126	34,909	-22,174	49,250
7	-24,130	98,617	-14,156	77,402
9	-13,316	55,459	59,558	149,856
11	8,236	0,758	-120,719	20,359
13	6,196	30,377	61,351	72,447

Tab. 6. Błędy pomiarów kątów fazowych wybranych harmonicznych napięcia

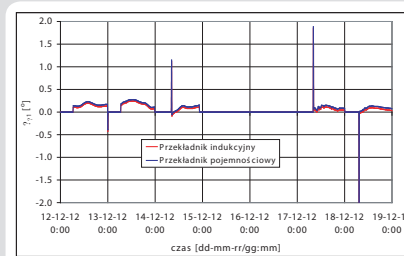


Rys. 13. Zmiany wartości kątów fazowych piątej harmonicznej napięcia w okresie pomiarowym

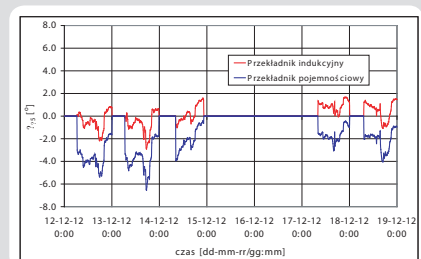
Z rys. 12 wynika, że także w przypadku harmonicznej podstawowej występują różnice kątów fazowych przy pomiarach z wykorzystaniem przekładników. W tab. 6 podano średnie wartości i odchylenia standardowe błędów pomiaru kątów fazowych harmonicznych za pomocą przekładników napięciowych.

Najmniejsze błędy pomiarów kątów fazowych zaobserwowano dla harmonicznej podstawowej i dla harmonicznej piątej. Natomiast stosunkowo duże błędy wystąpiły dla siódmej harmonicznej.

Na rys. 14 i 15 pokazano zmiany wartości błędów pomiaru wartości kątów fazowych odpowiednio dla podstawowej i piątej harmonicznej.



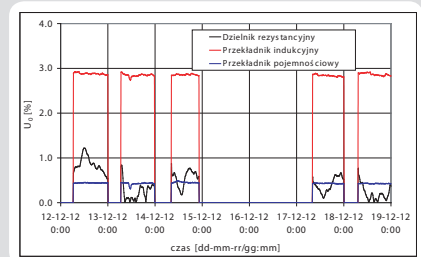
Rys. 14. Zmiany wartości błędów pomiarowych kątów fazowych harmonicznej podstawowej napięcia



Rys. 15. Zmiany wartości błędów pomiarowych kątów fazowych piątej harmonicznej napięcia w okresie pomiarowym

4.4. Składowa stała napięcia

Oddzielnego potraktowania wymaga problem przenoszenia przez przetworniki pomiarowe składowej stałej napięcia. Na rys. 16 pokazano zmiany wartości składowej stałej, zmierzone w okresie pomiarowym za pomocą poszczególnych przetworników



Rys. 16. Zmiany wartości składowej stałej napięcia

pomiarowych.

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 pt. „Projekt i budowa rezystancyjnego dzielnika napięcia do pomiarów wyższych harmonicznych napięcia w sieci

400 kV”, zleconej i sfinansowanej przez PSE SA (umowa: IF/RB/IF/10/TK/2008). Analiza wyników pomiarów wyższych napięć została przeprowadzona przez Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej w wyniku realizacji pracy badawczej pt. „Pomiary wyższych harmonicznych napięć w sieci 400 kV”, zleconej przez PSE SA (umowa: DS/RB/DE/8/TK/2012). Wyniki badań stanowią własność PSE SA. Zainstalowanie dzielnika rezystancyjnego umożliwiło wykonanie pomiarów porównawczych wyższych harmonicznych napięć 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 z wykorzystaniem przekładników. Stwierdzono dużą zgodność wartości współczynnika THD, pomierzonych przy wykorzystaniu dzielnika i przekładnika indukcyjnego (średni błąd pomiarów wynosił –4,5%), oraz stosunkowo dużą wartość (14,96%) średniego błędów pomiarów wykonanych za pomocą przekładnika pojemnościowego. 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 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 przenoszenia 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. Wyniki pomiarów, uzyskane w trakcie jednodniowej sesji, chociaż unikatowe w skali światowej, nie mogą być podstawą do wniosków ogólnych. Sugerują jednak problemy, które należy próbować wyjaśnić w dalszych badaniach. Bardziej ogólne wnioski będzie można sformułować po wykonaniu pomiarów w dłuższym czasie.

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.
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.
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.

Ryszard Pawełek

dr inż.

Politechnika Łódzka

e-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Łódzkiej (1977). Obecnie jest zatrudniony w Instytucie Elektroenergetyki swojej macierzystej uczelni na stanowisku adiunkta, gdzie pełni funkcję zastępcy dyrektora Instytutu. Obszar zainteresowań naukowych obejmuje: jakość energii elektrycznej, generację rozproszoną, mikrosystemy elektroenergetyczne. Jest członkiem Polskiego Komitetu Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej, w którym pełni funkcję wiceprzewodniczącego ds. nauki. Rzecznik SEP w dziedzinie jakości energii elektrycznej.

Irena Wasiak

dr hab. inż., prof. nadzw.

Politechnika Łódzka

e-mail: irena.wasiak@p.lodz.pl

Absolwentka Politechniki Łódzkiej. Od początku kariery zawodowej pracuje w Instytucie Elektroenergetyki tej uczelni. Uzyskała stopnie naukowe doktora i doktora habilitowanego z dziedziny elektroenergetyki. W latach 2002–2008 była prodziekanem Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki PŁ. Obecnie pełni funkcję kierownika Zakładu Sieci Elektroenergetycznych Mikrosystemów. Członkini The Institution of Engineering and Technology oraz Komitetu ds. Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej SEP, członek stowarzyszony Sekcji Systemów Elektroenergetycznych PAN. Pełni funkcję zastępcy redaktora naczelnego czasopisma „Electrical Power Quality and Utilisation” oraz współprzewodniczącej międzynarodowej konferencji o tej samej nazwie. Obszar działalności naukowej obejmuje zagadnienia jakości zasilania, integracji rozproszonych źródeł energii w sieciach elektroenergetycznych, funkcjonowania mikrosystemów elektroenergetycznych.

Marian Jurek

dr inż.

Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA

e-mail: pawel.kelm@p.lodz.pl

W latach 1999–2012 pracował w Polskich Sieciach Elektroenergetycznych, obecnie PSE Operator SA, gdzie zajmował się usługami systemowymi, następnie rozliczeniami międzynarodowej wymiany energii, a w ostatnich latach wdrażaniem nowych technologii oraz jakością energii i zarządzaniem mocą bierną. Od lutego 2012 roku realizował półroczny projekt dotyczący układów sterowania elektrowni w Emerson Process Management Power & Water Solutions. Aktualnie współpracuje z City Energy sp. z o.o. Jest członkiem m.in.: SEP, IEEE, Eurelectric, Komitetu NOT ds. Gospodarki Energetycznej, Polskiego Komitetu Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej. Rzecznik w dziedzinie jakości energii elektrycznej, a także autor ponad 120 publikacji naukowych i technicznych.