

SPRAWDZANIE POPRAWNOŚCI POMIARU ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z ZASTOSOWANIEM WZORCA PROSTOPADŁOŚCIANU MOCY I ENERGII

Andrzej OLENCKI

Calmet Spółka z o.o., Zielona Góra
tel.: 68 324 04 56

e-mail: A.Olencki@calmet.eu

Streszczenie: Wielu badaczy kwestionuje poprawność wskazań elektronicznych liczników energii elektrycznej w warunkach dużych zniekształceń napięć i prądów. Poprawność wskazań liczników jest kwestionowana z powodu dużych błędów liczników w rzeczywistych warunkach obciążenia, jak również z powodu stosowania błędnej koncepcji pomiaru mocy czynnej w aspekcie rozliczania przepływu energii harmonicznym. Przedstawiono aktualny stan wiedzy w postaci równania mocy pozornej, prostopadłościanu mocy i istoty teorii odbitej mocy czynnej, potrzebnych dla oceny poprawności pomiaru energii elektrycznej. Zaproponowano wzorzec do pomiaru i odtwarzania prostopadłościanu mocy i energii w postaci pierwszego krajowego Automatycznego Systemu Testującego. Możliwości tego systemu zaprezentowano na przykładzie pomiaru wpływu 5-tej harmonicznej na błąd licznika dla uprzedniej i aktualnej wersji prostopadłościanu mocy, z uwzględnieniem właściwego przepływu energii harmonicznym.

Słowa kluczowe: licznik energii elektrycznej, automatyczny system testujący, prostopadłościan mocy i energii, dokładność licznika.

1. WSTĘP

Energia elektryczna jest przedmiotem transakcji między dostawcą i odbiorcą, zatem cena płacona przez odbiorcę powinna zależeć od ilości dostarczonej energii elektrycznej przy wysokiej jakości zasilania. Ilość dostarczonej/zużytej energii elektrycznej jest mierzona z zastosowaniem układów pomiarowo rozliczeniowych, w których istotną funkcję pełni licznik energii elektrycznej.

Od 20-tu lat, na masową skalę, są wymieniane liczniki indukcyjne na liczniki elektroniczne, które ostatnio znajdują zastosowanie w systemach Smart Grid. W tym czasie pojawiło się wiele publikacji na temat poprawności wskazań liczników elektronicznych. Przez jednych autorów poprawność jest traktowana znaczeniowo jako bezbłądność realizacji wymagań aktualnych norm przedmiotowych na liczniki [1,2,3]. Z kolei przez drugich autorów poprawność jest traktowana jako rzetelność, uczciwość czy sensowność rozliczania za zużytą energię elektryczną [4,5]. W tym przypadku są kwestionowane wymagania aktualnych norm na liczniki w zakresie definicji mocy jako podstawy rozliczeń.

Niesinusoidalne prądy i napięcia w sieciach elektroenergetycznych powodują różne problemy, takie jak straty energii elektrycznej czy kłopoty pomiarowo-rozliczeniowe. Przy rozważaniu kwestii poprawności

wskazań liczników energii należy mieć na uwadze maksymę w celu racjonalnego gospodarowania zasobami energetycznymi [6]:

- nie można zarządzać czymś, czego się nie mierzy,
- jeżeli czegoś się nie mierzy, to nie można tego ulepszyć.

Oczywistym jest, że liczniki energii elektrycznej powinny mierzyć energię czynną i bierną z uwzględnieniem aktualnej [7], a nie uprzedniej [8], definicji mocy pozornej i jej składowych, które są reprezentowane graficznie w postaci prostopadłościanu mocy [9].

W badaniach poprawności wskazań liczników energii niezbędne jest stosowanie wzorca z zapewnioną spójnością pomiarową. Wzorzec powinien umożliwiać sprawdzanie liczników w dwóch sytuacjach: liczników podłączonych do sieci i liczników odłączonych od sieci. Wzorce takie jak MT781/MT786 (Zera) [10] i PTS 3.3C (MTE) [11] są nazywane jako Trójfazowe Automatyczne Systemy Testujące (Three-phase Fully Automatic Test System) z licznikiem kontrolnym ze zintegrowanym źródłem prądu i napięcia. Pierwszy krajowy System Testujący TS33 (Calmet) [12], wyróżnia się możliwością pomiaru i odtwarzania prostopadłościanu mocy i energii w obu wersjach.

2. PROSTOPADŁOŚCIAN MOCY

Prostopadłościan mocy reprezentuje graficznie równanie mocy pozornej. Równanie mocy pozornej można przedstawić w następującej [8] postaci:

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + T^2 \quad (1)$$

gdzie: S – moc pozorna, P – moc czynna, Q_B – moc bierna wg Budeanu, T – moc odkształcenia zwana też mocą deformacji.

Moc czynna jest wyrażona wzorem:

$$P = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n = P_1 + P_H \quad (2)$$

gdzie: P_1 – moc czynna pierwszej harmonicznej, P_n – moc czynna n -tej harmonicznej, P_H – moc czynna harmonicznym.

Analogicznie moc bierna jest wyrażona wzorem:

$$Q_B = Q_1 + Q_H \quad (3)$$

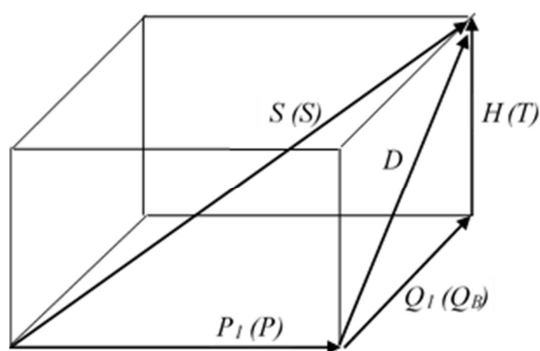
gdzie: Q_1 – moc bierna pierwszej harmonicznej, Q_H – moc bierna harmonicznym.

Obecnie równanie mocy pozornej ma następującą [1] postać:

$$S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + H^2 = P_1^2 + D^2 \quad (4)$$

gdzie: S – moc pozorna, P_1 – moc czynna pierwszej harmonicznej, Q_1 – moc bierna pierwszej harmonicznej, H – moc odkształcenia, D – moc dystorsji.

Prostopadłościan mocy w obu wersjach przedstawiono na rysunku 1. Wcześniej produkowane liczniki energii biernej mierzyły moc bierną Q_B , natomiast aktualnie produkowane liczniki energii biernej, zgodnie z wymaganiami aktualnej normy [14], mierzą już moc bierną pierwszej harmonicznej Q_1 wg aktualnej wersji prostopadłościanu mocy. Natomiast w stosunku do liczników energii czynnej, aktualne normy nadal wymagają pomiaru mocy czynnej P wg uprzedniej wersji prostopadłościanu mocy.



Rys. 1. Aktualny i uprzedni (oznaczenia w nawiasach) prostopadłościan mocy

Dla dalszych rozważań, na temat poprawności pomiaru energii elektrycznej, kapitalne znaczenie ma koncepcja odbitej mocy czynnej oraz energii odbitej zaproponowana przez prof. Czarneckiego [4,5]. Teoria odbitej mocy czynnej stwierdza, że w przypadku odbiorników nieliniowych moc czynna harmonicznych P_H z równania (2) ma ujemną wartość i jest mocą przepływu energii od odbiornika do źródła i z tego powodu została nazwana odbitą mocą czynną. W badaniach rzeczywistych obciążeń wykazano [13], że procentowy udział odbitej mocy czynnej P_H może stanowić do kilku procent mocy czynnej P .

3. CZY LICZNIKI ELEKTRONICZNE BŁĘDNIEMIERZĄ ENERGIĘ CZYNNĄ?

Pierwsza grupa badaczy stosuje metodę porównawczą, w której liczniki elektroniczne i indukcyjne mierzą jednakową wartość energii elektrycznej dla różnych obciążeń rzeczywistych [2,3]. Jako obciążenia są stosowane żarówka energooszczędne i ściemniacze. Przy stosowaniu tej metody, ze względu na brak odniesienia do wzorca, nie jest możliwe rozstrzygnięcie, który z liczników mierzy poprawnie, a który błędnie. Ale publikowane wyniki badań jednoznacznie dokumentują zdecydowanie większe wskazania liczników elektronicznych.

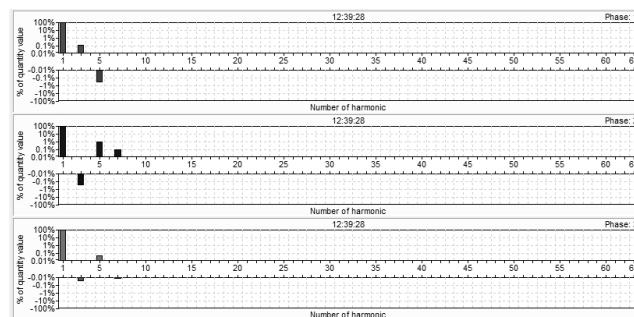
Druga grupa badaczy stosuje metodę wzorcowania w odniesieniu do wzorca jednostki miary [1] lub wskazań licznika wzorcowego. W badaniach ustalono, że duże zniekształcenia prądu powodują znaczne zawyżanie wskazań liczników elektronicznych, tym większe, im mniejsza jest

wartość prądu obciążenia. W związku z tym kwestionowana jest obowiązująca procedura wzorcowania.

Licznik indukcyjny jest urządzeniem wąskopasmowym z charakterystyką częstotliwościową zbliżoną do filtra dolnoprzepustowego pierwszego rzędu – błąd pomiaru mocy czynnej piątej harmonicznej może wynosić minus 70% [15]. Z kolei licznik elektroniczny, zgodnie z wymaganiami norm powinien być urządzeniem szerokopasmowym, aby mierzyć moc czynną wg równania (2) z uwzględnieniem mocy czynnej harmonicznych P_H , co jest podkreślane jako atut licznika elektronicznego w sensie poprawnej pracy dla dowolnych kształtów napięć i prądów [16]. Szerokopasmowość licznika elektronicznego, w świetle teorii odbitej mocy czynnej [5] jest jednak jego ogromną wadą. Niekwestionowaną wartością dla użytkownika ma bowiem tylko moc czynna pierwszej harmonicznej P_1 , natomiast wszystkie pozostałe składowe, które wydłużają wektor mocy pozornej S w stosunku do mocy P_1 stanowią czystą stratę dla uczestników systemu elektroenergetycznego. To oznacza, że wskazania klasycznego licznika indukcyjnego umożliwiają bardziej poprawne rozliczenie energii w znaczeniu rzetelności czy uczciwości i lepiej nawiązują do współczesnej wersji prostopadłościanu mocy.

4. WIDMO MOCY CZYNNYCH W PRZYŁĄCZU

Rysunek 2 przedstawia przykładowy histogram mocy czynnej w przyłączy zasilanym z sieci trójfazowej. Harmoniczne mocy ze znakiem dodatnim są dostarczane przez dostawcę i chociaż są niepożądane przez odbiorcę, to odbiorca za nie płaci. Natomiast harmoniczne ze znakiem ujemnym stanowią odbitą moc czynną i chociaż są niepożądane przez dostawcę, to odbiorca ma z tego tytułu obniżone rachunki. Zatem rozliczenia oparte na mocy P według wzoru (2) stoją w sprzeczności z racjonalnym gospodarowaniem zasobami energetycznymi.



Rys. 2. Histogram harmonicznych mocy czynnej rzeczywistego obiektu [17]

Histogram mocy i prostopadłościan mocy są obrazami zmiennymi w czasie, są pomocne w diagnostyce, ale są niewystarczające dla potrzeb ilościowego sprawdzania poprawności pomiaru energii elektrycznej.

5. WZORZEC PROSTOPADŁOŚCIANU ENERGII

Systemy Testujące firm Zera i MTE dostępne na rynku to aktualnie najbardziej wszechstronne urządzenia do sprawdzania poprawności pomiaru energii elektrycznej. W jednej obudowie zawierają trójfazowy licznik wzorcowy i trójfazowy kalibrator mocy połączone wspólnymi

zaciskami wejść/wyjść napięciowych i prądowych rysunek 3.



Rys. 3. Krajowy System Testujący TS33 (Calmet) [12]

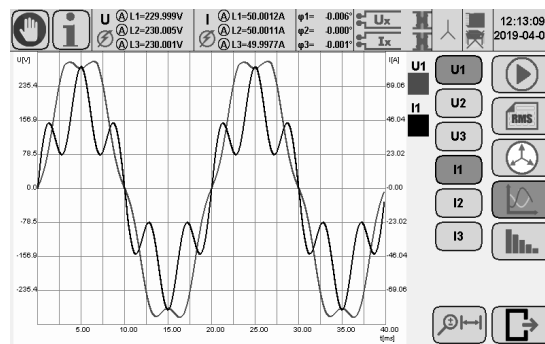
Systemy Testujące umożliwiają testowanie liczników energii bezpośrednio na obiekcie, z zastosowaniem metody wzorcowania, w trzech podstawowych wariantach podłączeń:

- Obwody napięciowe i prądowe licznika są podłączone do sieci – w tym przypadku System Testujący jest stosowany jako licznik wzorcowy w trybie manualnym,
- Obwody napięciowe licznika są podłączone do sieci a obwody prądowe licznika, po odłączeniu od sieci, są zasilane z Systemu – w tym przypadku System Testujący jest stosowany jako licznik wzorcowy ze zintegrowanym źródłem prądu w trybie pracy manualnej lub automatycznej o zadanych punktach obciążenia,
- Obwody napięciowe i prądowe licznika, po odłączeniu od sieci, są zasilane z Systemu – w tym przypadku System Testujący jest stosowany jako licznik wzorcowy ze zintegrowanym źródłem prądu i napięcia w trybie pracy manualnej lub automatycznej o zadanych punktach obciążenia.

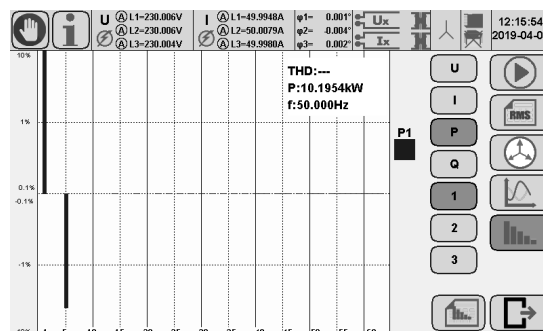
Dla opisanych wariantów połączeń dostępne są funkcje obliczania błędu licznika bezpośrednio w procentach ze specyfikacją błędu średniego, odchylenia standardowego i błędów cząstkowych. Dostępne są również funkcje pomiaru energii oraz mocy maksymalnych. Funkcja pomiaru różnych rodzajów mocy, takich jak P, P+, P-, Q, Q+, Q-, S oraz pierwszych harmonicznych tych mocy umożliwia pomiar i odtwarzanie różnych wersji prostopadłością mocy i energii.

6. WPŁYW HARMONICZNYCH NA BŁĄD LICZNIKA – PRZYKŁAD APLIKACYJNY

Błąd licznika spowodowany harmonicznymi jest badany na wpływ 5-tej harmonicznej o zawartości 10% w napięciu i 40% w prądzie. Wg norm [18] harmoniczna napięcia powinna być w fazie z podstawową, co w świetle teorii odbitej mocy czynnej jest nierealistyczne, ponieważ piąta harmoniczna napięcia powinna być przesunięta o około 180°. Oscylogram realistycznych sygnałów dla testu wpływu 5-tej harmonicznej na rysunku 4 prezentuje napięcie ze spłaszczonym, a nie podbitym, szczytem. Analiza widmowa mocy na rysunku 5 potwierdza fakt przepływu odbitej mocy czynnej w postaci słupka 5-tej harmonicznej mocy o ujemnej wartości.

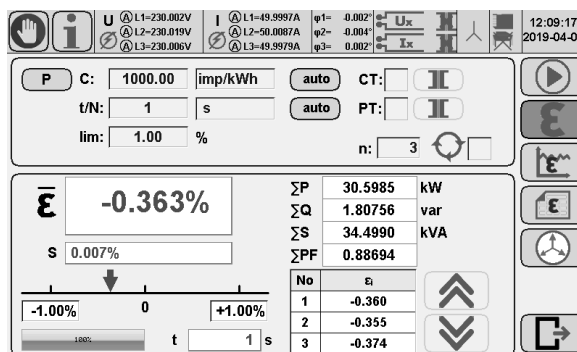


Rys. 4. Oscylogram napięcia i prądu dla testu wpływu 5-tej harmonicznej

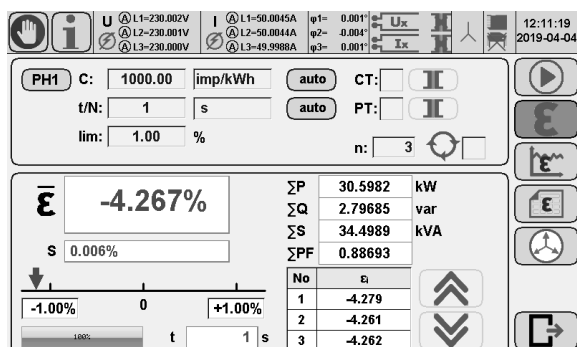


Rys. 5. Histogram harmonicznych mocy dla testu wpływu 5-tej harmonicznej

Badanie błędu licznika elektronicznego wg uprzedniej wersji prostopadłością mocy daje błąd $\varepsilon = -0,363\%$ rysunek 6, co jest poprawne w aspekcie wymagań norm. Natomiast badanie błędu tego licznika wg aktualnej wersji prostopadłością mocy daje błąd $\varepsilon = -4,267\%$ (rys. 7), co oznacza problem z rzetelnością rozliczeń za zużyta energię.



Rys. 6. Okno błędu licznika przy pomiarze mocy P



Rys. 7. Okno błędu licznika przy pomiarze mocy P₁

7. WNIOSKI KOŃCOWE

W ostatnich latach ustalono nową postać równania mocy pozornej, reprezentowanego przez aktualną postać prostopadłością mocy oraz opracowano teorię odbitej mocy czynnej, która opisuje kierunki przepływu energii harmonicznym. Ustalenia te są już uwzględnione w aktualnych wymaganiach norm dotyczących pomiarów energii biernej, natomiast liczniki energii czynnej mierzą energię wg uprzedniej wersji równania mocy pozornej.

Wprawdzie w warunkach zniekształceń napięć i prądów liczniki elektroniczne energii czynnej bardziej dokładnie realizują wymagania aktualnych norm, jednak liczniki indukcyjne umożliwiają bardziej poprawne rozliczanie energii w znaczeniu rzetelności – w pomiarach słabo uwzględniają przepływ energii harmonicznym, czym lepiej nawiązują do aktualnej wersji prostopadłością mocy.

Zaprezentowano możliwości pierwszego krajowego Automatycznego Systemu Testującego TS33 (Calmet), jako wzorca różnych wersji prostopadłością mocy i energii, dla potrzeb sprawdzania poprawności wskazań liczników energii.

8. BIBLIOGRAFIA

1. Piaskowy A., Skórkowski A.: The influence of current distortion on indications of smart Energy meters, Measurement Automation Monitoring, Dec. 2105, vol. 61, no. 12, 545-547.
2. Mańnicki R.: Czy liczniki energii elektrycznej mierzą poprawnie?, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 59, 2018, s.131-134.
3. Leferink F., Keyer C., Melentjev A.: Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Vol. 5 (4), s. 49-55, 2016.
4. Czarnecki L. S.: Comments on active power flow and energy accounts in electrical systems with nonsinusoidal waveforms and asymmetry, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp.1244-1250, 1996.
5. Czarnecki L. S.: Czy moc czynna jest mocą użyteczną i za co powinniśmy płacić?, Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, 2011, Vol. 2, Nr 5, s.24-32.
6. Metering Best Practices: A Guide to Achieving Utility Resource Efficiency, Release 3.0, U.S. Department of Energy, March 2015.
7. IEEE Std 1459-2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, 2010.
8. Szubert K.: Pomiar mocy przy przebiegach odkształconych, Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, Zeszyt 2, 1996.
9. Kosobudzki G., Nawrocki Z., Nowak J.: Measure of electric reactive power, Metrology and Measurement Systems, 2005, Vol. 12, nr 2, p.131-149.
10. Moving Test – MT781/MT786 Three-phase Fully Automatic Test System with Integrated Current and Voltage Source, Zera, Germany, 2016, https://www.zera.de/fileadmin/pdf_and_more/Products/Meters/Portable/MT78x_Proc_EXT_GB_V404.pdf
11. PTS 3.3C Three-phase fully automatic test system with class 0.05 reference standard and integrated three-phase current and voltage source, MTE Meter Test Equipment, Switzerland, 2015, [https://www.mte.ch/data/files/PTS%203.3%20C%20English_R04%20\(08.2015\).pdf](https://www.mte.ch/data/files/PTS%203.3%20C%20English_R04%20(08.2015).pdf)
12. TS33 Three-phase Fully Automatic Test System with Reference Standard and Integrated Current and Voltage Source, Calmet, Poland, 2019 <https://www.calmet.com.pl/images/pdf/TS33-Three-Phase-Fully-Automatic-Test-System-EN.pdf>
13. Troups T.: Measurement of Working, Reflected and Detrimental Active Power in Three Phase System. PHD Dissertation, Louisiana State University, USA, May 2015.
14. PN-EN 62053-24:2015-03, Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) – Wymagania szczegółowe – Część 24: Liczniki statyczne energii biernej dla częstotliwości podstawowej (klas 0,5 S, 1 S i 1).
15. Pietrucha R.: Błędy pomiaru czynnej energii elektrycznej licznikami indukcyjnymi przy przebiegach odkształconych, Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, Tom IX, Zeszyt 2, 2003, s. 15-25.
16. Bień A.: Licznik energii elektrycznej – głos w dyskusji, Katedra Metrologii i Elektroniki AGH, <http://www.sep.krakow.pl/nbiuletyn/nr54ar1.pdf>
17. Olencki A.: Pomiar strat nietechnicznych energii elektrycznej z wykorzystaniem nowoczesnych technik diagnostycznych, Pomiary i Diagnostyka w Sieciach Elektroenergetycznych, Kołobrzeg, 2018, s. 35-44.
18. PN-EN 50470-3:2009, Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) – Część 3: Wymagania szczegółowe – Liczniki statyczne energii czynnej (klas A, B i C).

CHECKING THE CORRECTNESS OF ELECTRICITY MEASUREMENT USING A POWER AND ENERGY CUBOID STANDARD

Many researchers question the correctness of the indications of electronic electricity meters in conditions of high voltage and current distortions. The correctness of meter readings is questioned due to large errors of meters in real load conditions, as well as due to the incorrect idea of active power measurement in the aspect of harmonic energy flow accounting. The article presents the current state of knowledge in the form of the equation of apparent power, a cuboid of power and the essence of the theory of reflected active power, needed to assess the correctness of electricity measurement. A standard for measurement and reproduction of the cuboid of power and energy in the form of the first Polish Automatic Testing System was proposed. The possibilities of this system are presented on the example of the measurement of the influence of the 5th harmonic on meter error for the historical and modern versions of the cuboid of power, taking into account the proper flow of harmonic energy.

Keywords: electricity meter, Automatic Test System, cuboid of power and energy, accuracy of electricity meter.