

ROZWÓJ WZORCÓW PARAMETRÓW SIECI ENERGETYCZNEJ

Andrzej OLENCKI¹, Daniel BELICA², Jarosław MARKIEWICZ³

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

e-mail: A.Olencki@calmet.eu

e-mail: D.Belica@calmet.eu

e-mail: J.Markiewicz@calmet.eu

Streszczenie: Omówiono fizyczne modele trójfazowej sieci energetycznej – wzorce do pomiaru i odtwarzania parametrów sieci sinusoidalnej i niesinusoidalnej. Przedstawiono rozwój krajowych przenośnych wzorców parametrów sieci energetycznej i ich koncepcje z uwzględnieniem wymagań standardu IEEE-1459 w zakresie wydzielenia komponentów mocy P_I i Q_I z mocy pozornej S dla potrzeb wzorcowania liczników energii. Omówiono zagadnienia niepewności wzorcowania liczników roboczej mocy czynnej P_I z zastosowaniem wzorców mocy czynnej P . Na tym tle przedstawiono pierwszy krajowy Automacyjny System Testujący typu TS33.

Słowa kluczowe: licznik energii elektrycznej, licznik wzorcowy, kalibrator mocy, automatyczny system testujący.

1. WSTĘP

Stan trójfazowej sieci energetycznej jest przedstawiany za pomocą wykresu wektorowego i zestawu wartości takich parametrów sieci jak: napięcia i prądy fazowe, kąty przesunięcia fazowego (lub współczynniki mocy), kąty między napięciami, częstotliwość oraz moce i energie czynne, bierne i pozorne. Do wyliczania wartości tych parametrów są potrzebne definicje parametrów i ich modele analityczne w postaci równań, które są implementowane w algorytmach pomiaru (dla mierników) i odtwarzania (dla źródeł) wzorców parametrów sieci energetycznej.

W 2010 roku, po 30-tu latach dyskusji nowych definicji mocy, kiedy dobrze znany był już mechanizm przepływu energii elektrycznej w warunkach niesinusoidalnych, opracowano normę IEEE-1459 [1], która zapewnia spójne i jednoznaczne definicje lepiej dostosowane dla celów rozliczeniowych za energię elektryczną. Podstawową innowacją standardu IEEE-1459 jest wydzielenie składników mocy czynnej i biernej o częstotliwości podstawowej P_I i Q_I z mocy pozornej S . Norma ta bazuje na przekonaniu, że sprawiedliwy podział obciążeń finansowych między dostawcą i odbiorcą energii elektrycznej jest warunkiem koniecznym do utrzymania wysokiej jakości dostaw energii elektrycznej. Dodatkowo stwierdza się, że aktualny poziom technologii mikroprocesorowych umożliwia producentom budowę liczników, które są w stanie mierzyć energię elektryczną zdefiniowaną z zastosowaniem określonych zaawansowanych modeli matematycznych.

Specyfikacje techniczne i normy przedmiotowe na liczniki energii czynnej aktualnie stosowane w Ameryce Północnej (seria ANSI C12) i Europie (seria IEC 62052)

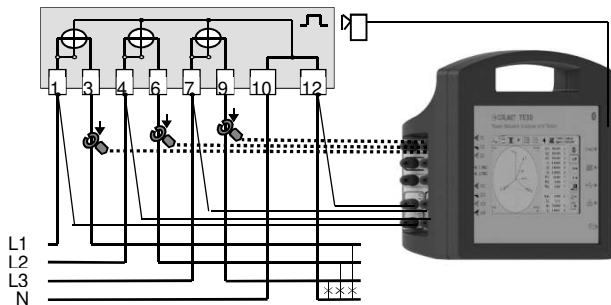
oraz międzynarodowe rekomendacje OIML R46 [2] nie są jeszcze dostosowane do racjonalnego rozliczania energii w warunkach niesinusoidalnych. Aktualnie konieczność pomiaru pierwszych harmonicznych mocy dla potrzeb rozliczeń energii obowiązuje tylko przy pomiarze energii biernej [3].

W [4, 5] opisano próby budowy użytkowego licznika energii z zaimplementowanymi definicjami standardu IEEE-1459 dla potrzeb porównawczych pomiarów mocy P i P_I , Q i Q_I oraz S i S_I przepływu energii w przyłączach rzeczywistych użytkowników. Do wzorcowania licznika zastosowano wzorzec mocy P w postaci testera Radian 4150 [6] z uwagi na niedostępność do wzorca mocy P_I .

Rozwój krajowych wzorców parametrów sieci energetycznej sinusoidalnej i niesinusoidalnej, spokojnej i niespokojnej do 2009 roku opisano w [7]. W tym czasie publikowane były prace na temat kierunków przepływu energii oraz roboczej i odbitej mocy czynnej [8] a także poprawności wskazań liczników energii elektrycznej. Istotnym obszarem stosowania wzorców parametrów sieci jest sprawdzanie liczników w dwóch sytuacjach: liczników podłączonych do sieci i liczników odłączonych od sieci. W dalszej części pracy opisano rozwój krajowych wzorców parametrów sieci w ostatnim dziesięcioleciu, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości sprawdzania liczników energii mocy P , P_I , Q i Q_I w warunkach niesinusoidalnych napięć i prądów.

2. WZORCE DO SPRAWDZANIA LICZNIKÓW PODŁĄCZONYCH DO SIECI

Wskazania użytkowych liczników energii elektrycznej są podstawą do rozliczeń finansowych między dostawcą energii i jej odbiorcą i z tego powodu sprawdzaniu dokładności wskazań liczników jest poświęcona duża uwaga. Przejawia się to między innymi w sprawdzaniu dokładności wskazań liczników podłączonych do sieci w miejscu ich zainstalowania. Zalecaną formą weryfikacji poprawności włączenia licznika do sieci i sprawdzania błędu licznika jest bezinwazyjne włączenie testera licznika (licznika wzorcowego) w obwód układu pomiarowo rozliczeniowego, bez konieczności rozłączania obwodu prądowego i napięciowego licznika, co przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat włączenia testera liczników w obwód pomiarowo rozliczeniowy

Testery liczników, zgodnie z projektem normy IEC 62057-2 [9], są nazywane jako Portable Working Standard [10] lub Portable Reference Meter [11] i zgodnie z definicją [9] są wzorcami roboczymi stosowanymi do pomiaru prądów, napięć, mocy, energii i błędów liczników energii. Dodatkowo, w przypadku potrzeby umożliwiają pomiar obciążalności przekładników napięcia i prądu oraz błędu przekładni prądowej i kąta przesunięcia przekładników prądu. Najbardziej zaawansowane testery mają zaimplementowaną funkcjonalność analizatora jakości energii, jak MTE PWS 3.3 [10] czy krajowy Calmet TE30 [12], który w nawiązaniu do terminologii stosowanej w normie [9] jest nazwany jako Przenośny Trójfazowy Licznik Wzorcowy i Analizator Jakości Energii.

Wdrożony do produkcji w 2014 roku tester TE30 spełnia wymagania normy IEC 62057 i ma funkcjonalność analizatora jakości energii oraz wyróżnia się możliwością pomiaru mocy i energii wg różnych wersji prostopadłością mocy [13], w szczególności wg wersji zgodnej z IEEE-1459 [1] z wydzielonymi komponentami mocy P_I i Q_I . Zaimplementowane funkcje pomiaru widma mocy, odbitej mocy czynnej, mocy dystorsji czy mocy odkształcenia umożliwiają bieżącą ocenę przepływów energii. Funkcja licznika kontrolnego roboczej mocy czynnej umożliwia pomiar błędu procentowego w naliczaniu energii z tytułu niekontrolowanych dotychczas przepływów energii przez zainstalowany system pomiarowo-rozliczeniowy. Funkcja pomiaru prostopadłością energii z wydzielonymi komponentami pierwszych harmonicznych umożliwia pomiar wszystkich składników energii dla potrzeb wyliczenia strat nietechnicznych energii elektrycznej związanych z przepływem energii harmonicznych [14].

3. WZORCE DO SPRAWDZANIA LICZNIKÓW ODŁĄCZONYCH OD SIECI

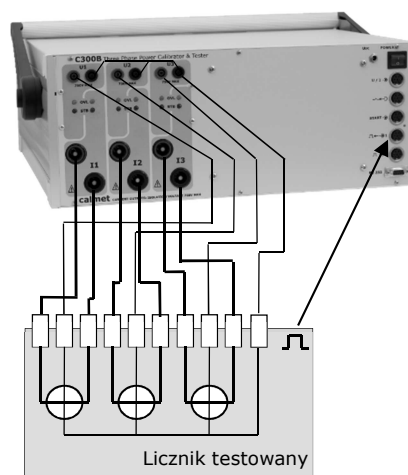
Zaletą stosowania wzorców do odtwarzania parametrów sieci jest to, że umożliwiają sprawdzanie liczników energii we wszystkich wymaganych punktach obciążenia licznika, jednak wymaga to odłączenia obwodów napięciowych i prądowych licznika od sieci energetycznej, co przedstawiono na rysunku 2. Stosowane są dwie koncepcje budowy wzorca do odtwarzania parametrów sieci:

- pierwsza, jako zestaw zasilacza pomiarowego i licznika wzorcowego niezbędnego dla zapewnienia wymaganej dokładności odtwarzania napięć, prądów i mocy,
- druga, jako trójfazowy kalibrator mocy i energii (rys.2).

W kraju, w Zielonej Górze, od wielu lat [7], rozwijana jest koncepcja budowy wzorców dla potrzeb sprawdzania liczników energii odłączonych od sieci w oparciu

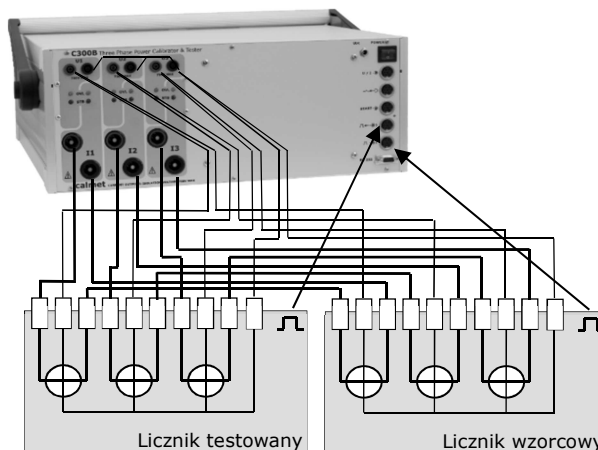
o koncepcję budowy kalibratorów mocy i energii. W 2014 roku został wdrożony do produkcji trójfazowy kalibrator mocy i energii typu Calmet C300B [15] z funkcją automatycznego testera liczników energii, który umożliwia sprawdzanie błędu licznika w dwóch konfiguracjach pomiarowych:

- z odniesieniem dokładności do dokładności wewnętrznego wzorca kalibratora (rys. 2). Umożliwia to sprawdzanie błędu liczników energii mocy P i P_I , Q i Q_I z niepewnością do 0,02%,
- z odniesieniem dokładności do dokładności zewnętrznego licznika wzorcowego (rys. 3). Realizowany jest wtedy układ pomiarowy wg pierwszej koncepcji budowy wzorca, w której kalibrator pełni funkcję precyzyjnego trójfazowego zasilacza pomiarowego a funkcję wzorca przejmuje zewnętrzny licznik wzorcowy.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do sprawdzania błędu licznika z dokładnością odniesioną do kalibratora

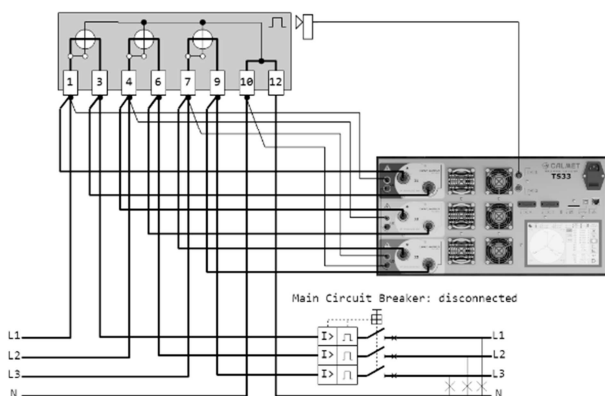
W układzie z zewnętrznym licznikiem wzorcowym, przedstawionym na rysunku 3, kalibrator posiada dwa wejścia impulsowe do zliczania impulsów z licznika testowanego i licznika wzorcowego. W układzie tym możliwe jest sprawdzanie liczników energii takich mocy, jakie są mierzone przez liczniki wzorcowe i z takimi niepewnościami, jakie gwarantują liczniki wzorcowe. Znane liczniki wzorcowe mierzą energie mocy P i Q , np. licznik Radian RD33 [16], natomiast autorom nie są znane, inne niż TE30 [12], liczniki wzorcowe energii mocy P_I i Q_I .



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do sprawdzania błędu licznika z dokładnością odniesioną do zewnętrznego licznika wzorcowego

4. AUTOMATYCZNE SYSTEMY TESTUJĄCE

W ostatnich latach pojawił się nowy rodzaj wzorców do sprawdzania liczników, które są nazywane jako Trójfazowe Automatyczne Systemy Testujące (Three-phase Fully Automatic Test System) z licznikiem wzorcowym ze zintegrowanym źródłem prądu i napięcia. Przykładami takich systemów są systemy Zera MT781/MT786 [17], MTE PTS 3.3C [18] i pierwszy krajowy system Calmet TS33 [19]. Systemy te umożliwiają sprawdzanie liczników całkowicie podłączonych do sieci (rys. 1) lub całkowicie odłączonych od sieci (rys. 2) oraz dodatkowo sprawdzanie liczników w układzie połączeń „mieszanym” przedstawionym na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do sprawdzania błędów licznika w trybie wstrzykiwania prądu

Sprawdzanie błędów licznika w układzie mieszanym cechuje się jednocześnie dwoma zaletami:

- bezinwazyjnością testu – brak konieczności odłączania obwodów napięciowych i prądowych licznika,
- możliwością realizacji automatycznego testu w predefiniowanych punktach obciążenia.

W omawianym układzie połączeń system testujący TS33 jest wykorzystywany jako system z licznikiem wzorcowym i zintegrowanym źródłem prądu – kalibrator mocy tego systemu pracuje w trybie trójfazowego źródła prądu zsynchronizowanego (częstotliwość i kąty przesunięć fazowych) z napięciem wejściowym.

Wdrożony do produkcji w 2019 roku system TS33 spełnia wymagania normy IEC 62057-2 [9] dla funkcji licznika wzorcowego, ma funkcjonalność analizatora jakości energii oraz wyróżnia się możliwością pomiaru i odtwarzania mocy i energii wg wersji zgodnej z IEEE-1459 [1] z wydzielonymi komponentami mocy P_1 i Q_1 dla potrzeb sprawdzania błędów liczników energii mocy P i P_1 , Q i Q_1 z niepewnością do 0,05%.

5. NIEPEWNOŚĆ WZORCOWANIA LICZNIKÓW ROBOCZEJ MOCY CZYNNEJ

Moc czynna w warunkach niesinusoidalnych dana jest wzorem:

$$P = \sum_1^N P_n = P_1 + \sum_2^{\infty} P_n = P_1 + P_H = \sum_1^N V_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n \quad (1)$$

gdzie: P_1 – moc czynna pierwszej harmonicznej, P_n – moc czynna n-tej harmonicznej, P_H – moc czynna harmonicznym, V_n – wartość skuteczna n-tej harmonicznej napięcia, I_n – wartość skuteczna n-tej harmonicznej prądu, φ_n – kąt przesunięcia fazowego n-tej harmonicznej.

Z równania (1) wynika, że wzorcowanie licznika mocy P_1 z zastosowaniem wzorca do odtwarzania mocy P w warunkach niesinusoidalnych jest możliwe – wartość mocy roboczej P_1 uzyskuje się przez odjęcie wyliczonej wartości mocy harmonicznym P_H od wartości mocy czynnej P . Jednak w bilansie niepewności powinna być uwzględniana niepewność odtwarzania mocy czynnej harmonicznym wyrażona wzorem:

$$\frac{u(P_n)}{P_n} = \sqrt{\left[\frac{u(V_n)}{V_n}\right]^2 + \left[\frac{u(I_n)}{I_n}\right]^2 + [u(\cos\varphi_n)]^2} \quad (2)$$

gdzie: $u(V_n)/V_n$ i $u(I_n)/I_n$ są niepewnościami harmonicznym napięcia i prądu a $u(\cos\varphi_n)$ jest niepewnością współczynnika mocy harmonicznym danej wzorem:

$$u(\cos\varphi_n) = \frac{\cos(\varphi_n + u(\varphi_n)) - \cos\varphi_n}{\cos\varphi_n} \quad (3)$$

gdzie: $u(\varphi_n)$ jest niepewnością kąta przesunięcia fazowego harmonicznym.

Z analizy równań (2) i (3) wynika, że przy wzorcowaniu licznika roboczej mocy czynnej P_1 z zastosowaniem licznika wzorcowego mocy czynnej P w układach pomiarowych przedstawionych na rysunkach 1 i 3, czy z zastosowaniem kalibratora (rys. 2), wymagana jest wiedza o wartościach amplitud i faz harmonicznym napięć i prądów testowych sygnałów odkształconych oraz o niepewnościach ich odtwarzania.

Licznik wzorcowy TE30 [12], kalibrator C300B [15] i system testujący TS33 [19] z funkcjami sprawdzania błędów liczników energii mocy P i P_1 , Q i Q_1 w warunkach niesinusoidalnych umożliwiają sprawdzanie liczników energii wg wymagań normy IEEE-1459 bez konieczności stosowania pracochłonnym procedur związanych z uwzględnianiem niepewności odtwarzania harmonicznym wg wzoru (2).

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Dyskusja o potrzebie pomiaru energii mocy pierwszych harmonicznym dla celów rozliczeniowych trwa już wiele lat i została zwieńczona opracowaniem standardu IEEE 1459. W ciągu ostatnich dziesięciu lat opracowano i wdrożono do produkcji nową generację przenośnym wzorców parametrów sieci energetycznej: licznik wzorcowy typu TE30 z funkcją analizatora jakości energii, trójfazowy kalibrator mocy/energii typu C300B z funkcją automatycznego testera liczników oraz pierwszy krajowy Automatyczny System Testujący z licznikiem wzorcowym ze zintegrowanym źródłem prądu i napięcia typu TS33. Wszystkie w/w wzorce mają zaimplementowane funkcje zautomatyzowanego sprawdzania liczników energii mocy czynnej i biernej a także pierwszych harmonicznym tych mocy, co stanowi innowację w obszarze wzorców

parametrów sieci energetycznej dla potrzeb sprawdzania liczników energii elektrycznej.

7. BIBLIOGRAFIA

1. 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.
2. OIML R 46-1/-2 Edition 2012, Active electrical energy meters. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests, France, 2012.
3. 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).
4. Berrisford A., J.: Smart Meters Should be Smarter, IEEE PES Conference, San Diego, California, USA, 2012.
5. Berrisford A.J.: A Smarter Meter: IEEE-1459 power definitions in an off-the-shelf Smart Meter, IEEE I2MTC Conference, Pisa, Italy, 2015.
6. Automated Test Platform Model 4150, Radian Research, USA, http://www.radianresearch.com/pdf/Model_4150_Brochure_INTER.pdf
7. Olencki A.: Rozwój wzorców parametrów sieci energetycznej, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, nr 12, 2009, s. 409-411.
8. 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.
9. IEC 62057-2 /Ed.1, Portable Test Equipment and Test Procedure for Electricity Meter and Electricity Meter Installation, 2009.
10. PWS 3.3 Three-phase Portable Working Standard and Power Quality Analyzer, MTE, Switzerland, 2016, [https://www.mte.ch/data/files/PWS%203.3%20English_R02%20\(07.2016\).pdf](https://www.mte.ch/data/files/PWS%203.3%20English_R02%20(07.2016).pdf)
11. MT320 Three Phase Reference Meter, ZERA, Germany, https://www.zera.de/fileadmin/pdf_and_more/Products/Meters/Portable/MT320_CAT_EXT_GB_V105.pdf
12. Three Phase Network Analyser and Tester of Electricity metres and Instrument Transformers TE30. Calmet, TE30 Data sheet EN 2018-03 <https://www.calmet.com.pl/images/pdf/TE30-Three-Phase-Working-Standard-Data-Sheet-EN.pdf>
13. Olencki A.: Sprawdzanie poprawności pomiaru energii elektrycznej z zastosowaniem wzorca prostopadłościanu mocy i energii, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Nr 66, 2019, s. 67-70.
14. Olencki A.: Pomiar strat nietechnicznych energii elektrycznej z wykorzystaniem nowoczesnych technik diagnostycznych, *Pomiary i Diagnostyka w Sieciach Elektroenergetycznych*, Kołobrzeg, 2018, s. 35-44.
15. Three Phase Power Calibrator and Tester of Power Engineering Devices C300B. Calmet, C300B Data sheet EN 2019-06 <https://www.calmet.com.pl/images/pdf/C300B-Three-Phase-Power-Calibrator-Data-Sheet-EN.pdf>
16. RD33 Portable Three-phase Electricity Standard, Operations Manual, Radian Research, USA, <http://www.radianresearch.com/manuals/RD-33.pdf>
17. 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
18. 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)
19. Three-phase Fully Automatic Test System with Reference Standard and Integrated Current and Voltage Source TS33. Calmet, TS33 Data sheet EN 2019-06 <https://www.calmet.com.pl/images/pdf/TS33-Three-Phase-Fully-Automatic-Test-System-Data-Sheet-EN.pdf>

DEVELOPMENT OF POWER NETWORK PARAMETERS STANDARDS

Physical models of three-phase power network are discussed - standards for measuring and reproducing of sinusoidal and non-sinusoidal power network parameters. The development of Polish portable standards of power network parameters and their concepts is presented, taking into account the requirements of the IEEE-1459 standard in the scope of separating power components P_I and Q_I from apparent power S for the purpose of calibrating electricity meters. The issues of calibration uncertainty of working active power P_I meters with the use of active power P standards were discussed. In this aspect, the first Polish TS33 Automatic Test System was presented.

Keywords: electricity meter, reference meter, power calibrator, Automatic Test System.