

Krzysztof URBAŃSKI

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Informatyki i Elektroniki

Pomiary i rejestracja asymetrii napięcia w obwodach trójfazowych

Dr inż. Krzysztof URBAŃSKI

Autor ukończył Wyższą Szkołę Inżynierską w Zielonej Górze - Wydział Automatyki i Metrologii. Praca doktorska dotyczyła budowy wielofazowych kalibratorów mocy. Zainteresowania skupiają się na konstruowaniu urządzeń do analizy i rejestracji parametrów jakości energii elektrycznej i budowie źródeł sygnałów (kalibratorów) odtwarzających te parametry.



e-mail: K.Urbanski@iie.uz.zgora.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono, na tle parametrów jakości energii elektrycznej, sposoby obliczania, pomiaru i rejestracji współczynnika asymetrii napięcia trójfazowego. Przedstawiono różnice między sposobem obliczania wg normy IEC 6100-4-30 a uproszczonym wg NEMA Standards MG1 - 14.35. Zaprezentowano schemat blokowy i parametry techniczne rejestratora parametrów energii elektrycznej oraz podstawowe funkcje oprogramowania do analizy wyników pomiarów.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, kalibrator napięcia i prądu, kalibrator mocy, napięcie fazowe, asymetria, współczynnik asymetrii, miernik, rejestrator, analizator parametrów sieci.

Measurements and recording of voltage unbalance coefficient in three phase network

Abstract

The article presents, on the background of power quality parameters, methods of calculating, measurement and recording of voltage unbalance in three phase network. Presented are differences between method according to IEC 6100-4-30 and simplified according to NEMA Standards MG1 - 14.35. There is shown block diagram and technical parameters of power quality recorder. There are also presented basic functions of software for power quality measurement analysis.

Keywords: power quality, voltage and current calibrator, power calibrator, phase voltage, unbalance, unbalance coefficient, power network parameters meter, recorder, analyzer.

1. Wstęp

W związku z liberalizacją rynków energii elektrycznej i możliwością zakupu energii u dowolnego dostawcy, energia stała się towarem o określonych parametrach, za który należy zapłacić określoną cenę. Parametry zjawisk związanych z jakością energii i zasady ich pomiaru zostały znormalizowane i opisane w normach EN50160 [1] i IEC-61000-4-30 [2]. Jakość energii elektrycznej rozumiana jest jako zespół charakterystyk napięcia zasilającego odbiorcę: zmiany częstotliwości sieci, fluktuacje, zwłaszcza te, które powodują migotanie światła, nagłe zmiany lub wyłączenia napięcia, asymetria napięć trójfazowych, harmoniczne, interharmoniczne i przepięcia przejściowe - „szpilkowe”.

Wymagania jakie musi spełniać napięcie w sieci energetycznej wg normy EN50160 przedstawione są w tab. 1. Dla każdego z wymienionych parametrów określony jest zakres zmian lub procentowa tolerancja, którą parametr może przyjmować. Ponadto opisany jest czas uśredniania parametru oraz częstość występowania czyli część okresu obserwacji (zwykle 95%) lub liczba przekroczeń w ciągu tego okresu, która jest dopuszczalna dla spełnienia wymagań normy.

Aby można było ocenić jakość - zgodność parametrów energii elektrycznej z normami niezbędne są wieloparametrowe rejestratory, które mierzą i gromadzą wyniki pomiarów w ciągu stosunkowo długich okresów czasu t.j. dnia, tygodnia czy nawet roku.

Jednym z często niedocenianych, pod względem skutków ekonomicznych, parametrów jakości energii jest asymetria napięcia trójfazowego [3]. Asymetria napięcia (voltage unbalance) określana jest jako stan sieci wielofazowej, w której wartości skuteczne napięć fazowych lub wartości kątów przesunięć między tymi napięciami są różne. Przyczyna niezrównoważenia sieci rzadko leży po stronie dostawcy energii elektrycznej. Najczęstszą przyczyną jest niesymetryczny pobór mocy z poszczególnych faz. Konsekwencją asymetrycznego zasilania jest nadmierne grzanie się silników i transformatorów, zmniejszenie sprawności i momentu obrotowego silników, zwiększenie zużycia mechanicznego.

Tab. 1. Parametry jakości energii wg PN-EN 50160

Tab. 1. Power quality parameters acc. PN-EN 50160

Kryterium	Zakres / tolerancja	Czas uśredniania	Częstość	Okres obserwacji
Zmiany częstotliwości	50Hz $\pm$ 1%	10 s	95%	tydzień
	50Hz +4%/-6%	10 s	100%	tydzień
Wolne zmiany napięcia	$U_N \pm 10\%$	10 min	95%	tydzień
Szybkie zmiany napięcia	$U_N \pm 5\%$	10 ms	100%	dzień
Fluktuacje napięcia - flicker	$P_{It} \leq 1$	2 h	95%	tydzień
Zapady napięcia	(1% - 90%) U_N przez 10ms - 1s	10 ms	10 - 1000	rok
Krótkie przerwy w zasilaniu	<1% U_N przez < 3min	10 ms	10 - 100	rok
Długie przerwy w zasilaniu	<1% U_N przez > 3min	10 ms	10 - 50	rok
Przepięcia	< 200% U_N (<1.5kV)	10 ms	kilka sekund	-
Przepięcia „szpilkowe”	< 6 kV	-	μ s ... ms	-
Asymetria	< 2%	10 min	95%	tydzień
Harmoniczne	THD < 8%	10 min	95%	tydzień
Interharmoniczne	-	-	-	-
Napięcie sygnałowe	< 9%	3 s	95%	dzień

U_N - znamionowe napięcie skuteczne sieci energetycznej

Przykładowa zależność sprawności silnika elektrycznego [4] od asymetrii napięcia zasilającego przedstawiona jest w tab. 2. Łatwo zauważyć, że nawet przy stosunkowo niewielkiej asymetrii straty w dostarczanej energii sięgają 1 do 2%. Zgodnie z normą [1] średnia 10 minutowa wartość współczynnika asymetrii powinna być mniejsza niż 2% przez 95% czasu w ciągu tygodnia.

Tab. 2. Sprawność silnika w funkcji asymetrii

Tab. 2. Motor efficiency under voltage unbalance

Obciążenie silnika w %	Sprawność silnika [%]		
	Współczynnik asymetrii		
	0%	1%	2,5%
100	94,4	94,4	93,0
75	95,2	95,1	93,9
50	96,1	95,5	94,1

2. Obliczanie współczynnika asymetrii

Obliczanie współczynnika asymetrii oparte jest na metodzie składowych symetrycznych. Niezrównoważona sieć trójfazowa może być przedstawiona za pomocą grafów wskazowych w układach wektorów składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej. Zgodnie z normą [2] współczynnik asymetrii u_2 wyrażony jest za pomocą wzoru (1), w którym U_P jest wartością skuteczną składowej przeciwnej a U_Z wartością skuteczną składowej zgodnej.

$$u_2 = \frac{U_P}{U_Z} \cdot 100\% \quad (1)$$

Dla układu napięć trójfazowych, biorąc pod uwagę wartości skuteczne pierwszych harmonicznych napięć międzyfazowych (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}) można współczynnik asymetrii przedstawić wg wzoru (2).

$$u_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \cdot 100\% \quad \text{gdzie} \quad \beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2} \quad (2)$$

W praktyce, często używany jest znacznie prostszy wzór (3) zgodny z zaleceniami [5]. Do obliczeń wykorzystana jest średnia wartość napięć międzyfazowych U_{AV} (4) oraz napięcie międzyfazowe, którego wartość najbardziej różni się od wartości średniej (5).

$$u_2 = \left| \frac{U_{AV} - U_{MD}}{U_{AV}} \right| \cdot 100\% \quad (3)$$

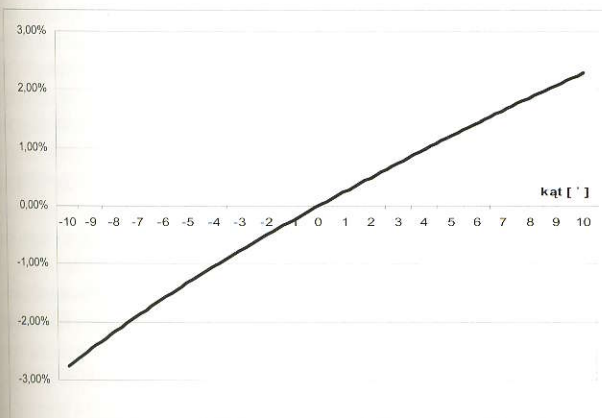
gdzie:

$$U_{AV} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} \quad (4)$$

oraz:

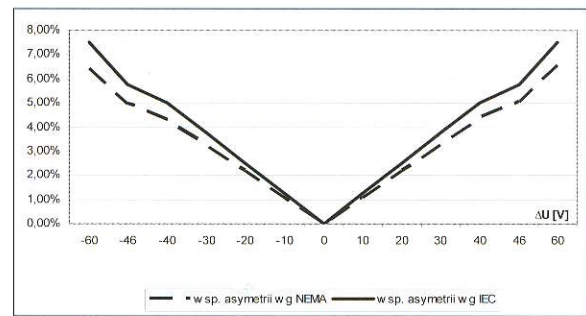
$$U_{MD} = U_{AB} \cup U_{BC} \cup U_{CA} \Rightarrow \max |U_{AV} - U_{MD}| \quad (5)$$

Stosowanie wzoru uproszczonego powoduje powstanie pewnych błędów pomiaru. Na rys. 1. przedstawiono błąd powstający przy obliczaniu współczynnika asymetrii według wzoru uproszczonego w stosunku do wzoru według IEC. Obliczenia wykonano przy założeniu, że kąt między napięciami U_A i U_B oraz U_A i U_C zmienia się w zakresie $120^\circ \pm 10^\circ$, przy założeniu, że wartość napięcia fazowego wynosi 230V.



Rys. 1. Błąd obliczeń asymetrii wg wzoru uproszczonego w zależności od kąta
Fig. 1. Error of voltage unbalance calculation acc. simplified equation

Na rys. 2. przedstawiono współczynnik asymetrii obliczony według wzorów odpowiednio (2) i (3), przy założeniu, że kąty między napięciami U_A i U_B oraz U_A i U_C są stałe i wynoszą 120° a różnica (ΔU) wartości napięć fazowych $U_B - U_C$ zmienia się odpowiednio w zakresie $230V \pm 30V$, przy zachowaniu stałej wartości $U_A = 230V$.

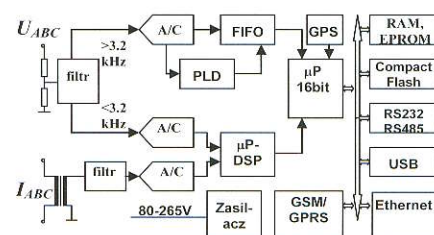


Rys. 2. Współczynnik asymetrii liczony wg IEC i NEMA
Fig. 2. Voltage unbalance coefficient calculated acc. IEC and NEMA

Jak widać w zależności od rodzaju asymetrii wartości napięć i kątów, różnice między stosowanymi sposobami obliczeń mogą być znaczne i przekraczać 10%. W praktyce wzór uproszczony może być stosowany do rozwiązywania lokalnych problemów z asymetrią. Prawidłowa, zgodna z normą [1] eksploatacja sieci energetycznej wymaga stosowania bardziej skomplikowanych urządzeń pozwalających na dokładny pomiar i rejestrację współczynnika asymetrii w dłuższym okresie czasu.

3. Rejestracja współczynnika asymetrii i innych parametrów jakości energii

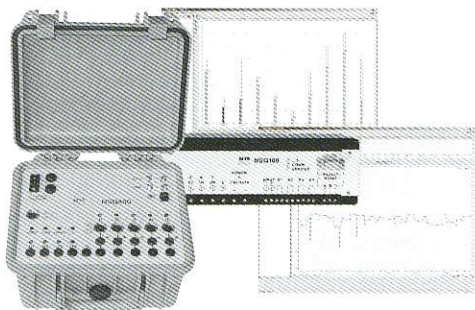
Do pomiaru i rejestracji parametrów jakości energii, współcześnie prawie zawsze, używa się urządzeń skonstruowanych w oparciu o przetworniki cyfrowo analogowe i układy mikroprocesorowe oraz algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów. Struktura takiego rejestratora, opracowanego we współpracy z firmą Calmet Sp. z o.o., przedstawiona jest na rys. 3. Mierzone napięcie trójfazowe (U_{ABC}) lub prąd (I_{ABC}) doprowadzone jest przez precyzyjne dzielniki napięcia do filtru, który rozdziela przebieg na wysokoczęstotliwościowy ($>3,2\text{kHz}$) do pomiaru napięć „szpilkowych” i niskoczęstotliwościowy ($<3,2\text{kHz}$) do pomiaru wartości skutecznych, harmonicznych i flickera.



Rys. 3. Struktura rejestratora parametrów sieci energetycznej
Fig. 3. Structure of power quality parameters recorder

Napięcie ze składowymi o wysokiej częstotliwości przetwarzane jest w szybkim (2MHz) przetworniku A/C i zapisywane w rejestrze FIFO pod warunkiem, że jego wartość przekroczy określony poziom, co kontrolowane jest przez układ PLD. Zawartość FIFO odczytywana jest raz na okres przebiegu mierzonego przez mikroprocesor μP i zapisywana w pamięci Compact Flash o pojemności od 64 do 512MB. Napięcie o składowych niskoczęstotliwościowych (podobnie prąd wejściowy) jest próbkowane synchronicznie z szybkością 128 próbek na okres a procesor DSP oblicza wartości skuteczne, wartości poszczególnych harmonicznych i interharmonicznych (FFT) sygnału. Wyniki pracy procesora DSP odczytywane są co okres (50Hz – 20ms) przez procesor μP , poddawane wstępnej analizie w celu redukcji nadmiarowych danych lub sygnalizacji stanów uznanych za awaryjne. Następnie rezultaty pomiarów są rejestrowane w pamięci Compact Flash. Synchronizacja zapisu danych z czasem astronomicznym zapewnia zegar DCF lub system z odbiornikiem GPS. Komunikacja z analizatorem i pobieranie zarejestrowanych danych odbywa się przez jeden z aktywnych interfejsów: RS232 lub RS485, USB, Ethernet, tra-

dycyjny modem analogowy lub cyfrowy, bezprzewodowy GSM/GPRS. Analizator zasilany jest za pomocą zasilacza o szerokim zakresie napięć wejściowych, umożliwiając zasilanie również z obwodów pomiarowych, przy poborze mocy na poziomie 10VA. Dodatkowo zasilacz rejestratora wyposażony jest w akumulatorowy układ podtrzymania napięcia, umożliwiając pracę w czasie krótkich (< 10min) zaników napięcia zasilania. Na rys. 4. przedstawiony jest wygląd rejestratora NSQ400 (rejestruje napięcie i prąd) i NSQ100 (tylko napięcie).



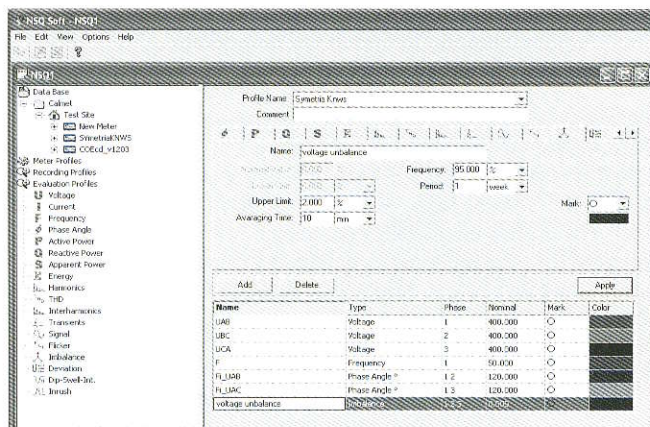
Rys. 4. Rejestrator parametrów jakości energii NSQ400 i NSQ100
Fig. 4. Power quality recorder NSQ400 and NSQ100

4. Analiza rezultatu pomiarów

Integralną częścią systemu rejestracji i analizy parametrów jakości energii jest oprogramowanie na komputer klasy PC. Umożliwia ono:

- komunikację z poszczególnymi analizatorami;
- ustawienie parametrów i właściwości analizatora („Meter Profile”) a w szczególności wybór układu połączeń (1-fazowy / 3-fazowy, 3- lub 4- przewodowy, wybór współpracujących przetworników prądowych);
- ustawienie parametrów rejestracji („Recording Profile”) a w szczególności czasu rejestracji, prędkości rejestracji, wybór rejestrowanych parametrów i czasu ich uśredniania, ustawienie wartości progowych, od których rozpoczyna się rejestracja;
- ustawienie zasad i warunków analizy danych („Evaluation Profile”) oraz sposobu ich prezentacji;
- odczyt danych z poszczególnych urządzeń i zarządzanie bazą danych pomiarowych.

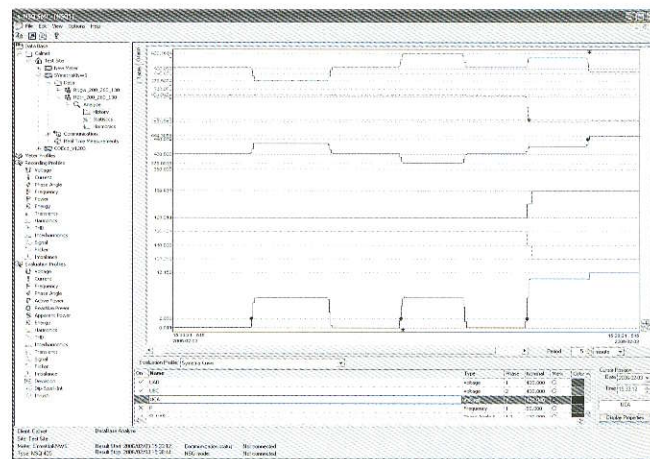
Wygląd okna programu do ustawiania warunków analizy przedstawiony jest na rys. 5. Ustawione mogą być: wartość nominalna, dolny i górny limit, czas uśredniania, częstość występowania w okresie obserwacji i długość okresu obserwacji.



Rys. 5. Ustawianie zasad i warunków analizy – „Evaluation Profile”
Fig. 5. Setting the rules and conditions of analysis - „Evaluation Profile”

Na rys. 6. przedstawione jest główne okno do analizy wyników. Część ekranu zajmuje okno prezentujące wykres wybranych wielkości względem czasu. Wykresy mogą być dowolnie skalowane i umieszczane w różnym położeniu względem siebie. Na rysunku

można zauważyć kolejno od góry: zmiany wartości w czasie napięć U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , zmiany kątów między napięciami odpowiednio U_A i U_B oraz U_A i U_C oraz wartość współczynnika asymetrii.



Rys. 6. Okno analizy – wyniki rejestracji współczynnika asymetrii
Fig. 6. Analysis window – result of voltage unbalance recording

Na wykresach mogą być zaznaczane symbolami tzw. zdarzenia, czyli momenty w których mierzona wielkość przekroczyła ustaloną wartość progową. Możliwe jest również przełączenie wyświetlania danych do postaci liczbowej a dodatkowo harmoniczne wyświetlane są w postaci wykresów słupkowych. Ponadto możliwe jest wyświetlanie danych statystycznych pozwalających na analizę częstości występowania poszczególnych zjawisk i porównanie jej z wymaganiami norm. Wyniki pomiarów mogą być przedstawione w postaci wartości i czasu trwania zdarzenia na wykresie zwanym krzywą CBMA, dzięki której zdarzenia mogą być klasyfikowane jako dopuszczalne w normalnej pracy, niedopuszczalne ale takie, które nie powodują uszkodzenia urządzeń podłączonych do sieci energetycznej, oraz niedopuszczalne, które mogą spowodować uszkodzenia lub nawet zniszczenie urządzenia.

5. Podsumowanie

Stosowanie uproszczonych wzorów obliczeniowych, w niektórych przypadkach, może prowadzić do znacznych błędów pomiarów. Zastosowanie nowoczesnych podzespołów umożliwia konstruowanie urządzeń, które w znacznie dokładniejszy sposób, nie tylko mierzą ale także rejestrują wartości parametrów sieci energetycznej. Wielotygodniowa rejestracja pozwala na śledzenie zmian parametrów w czasie. Daje to możliwość, z jednej strony, oceny czy sieć spełnia wymagania norm, z drugiej może przynieść wymierne korzyści ekonomiczne dzięki bardziej racjonalnemu wykorzystaniu energii i zmniejszeniu strat spowodowanych asymetrią.

6. Literatura

- [1] PN-EN 50160 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2002.
- [2] IEC 61000-4-30 Testing and measurement techniques – Power quality measurements methods, IEC, Geneva 2003.
- [3] Johan Dreisen, Thierry Van Craenenbroeck, Zaburzenia napięcia - wprowadzenie do asymetrii. Leuven, Maj 2002, Polskie Centrum Promocji Miedzi S.A.
- [4] Eliminate voltage unbalance – Energy efficiency and renewable energy, U.S. Department of energy, Washington 2003.
- [5] National Electrical Manufacturers Association (NEMA), Standards MG1 – 14.35, Rosslyn 2001.