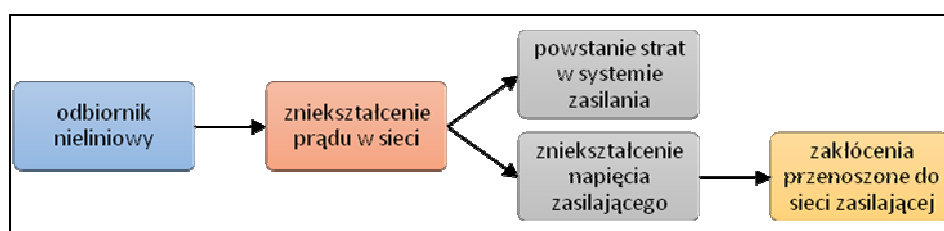


Analiza oddziaływania odbiorników na jakość energii – możliwości badawcze PTIwIE

Wstęp

Energia elektryczna prądu elektrycznego jest powszechnie wykorzystywanym medium zarówno w gospodarstwach domowych, jak i w gospodarce. Potocznie często bywa nazywana prądem i stanowi główne źródło zasilania urządzeń elektrycznych. Jednocześnie energia elektryczna jest towarem rynkowym o specyficznym charakterze. Specyfika polega na tym, iż energia jest produktem, którego magazynowanie jest bardzo kłopotliwe, co powoduje, iż najczęściej jest ona wytwarzana oraz dostarczana w momencie zapotrzebowania na nią. Praktycznie klient „nie widzi”, jaką jakościowo energię otrzymuje, a ponadto on sam, jak i inni odbiorcy mogą oddziaływać na dostarczaną energię pogarszając jej jakość. Przyczyną pogarszania się jakości energii jest coraz to większa liczba nieliniowych urządzeń elektrycznych pracujących w sieci. Liczba tego typu urządzeń rośnie wraz z rozwojem przemysłu (USA – w 1992 15–20% energii zużywały odbiorniki nieliniowe, a w 2001 już 60–80%) [Baranecki 2004: 1]. Przeciętny użytkownik energii elektrycznej najczęściej uważa, iż napięcie zasilające ma charakter sinusoidalny. Rzeczywiście generatory w elektrowniach produkują napięcie sinusoidalne (minimalne odchylenia od sinusoidy wynikają z rozmieszczenia uzwojeń w żłobkach maszyny), jednak napięcie sieciowe u odbiorcy nie ma już idealnego przebiegu sinusoidalnego, praktycznie zawsze sinusoida jest odkształcona, zdarzają się zapady napięcia, zmiany częstotliwości. Przyczyn takiego stanu może być wiele, ale podstawowa to nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej, które pobierają z sieci prądy o charakterze niesinusoidalnym, co implikuje zniekształcenie przebiegu napięcia (rys.1).



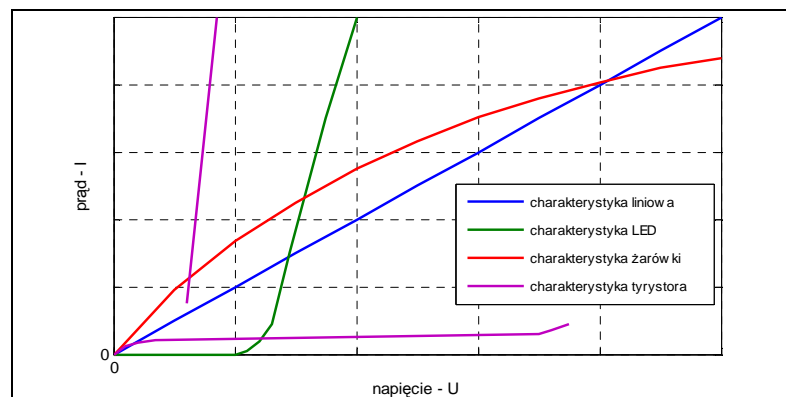
Rys. 1. Skutki uboczne pracy urządzeń nieliniowych w sieci

Teoretycznie sieć energetyczna jest siecią sztywną, tzn. przyjmuje się, iż pojedyncze urządzenia nie wpływają na napięcie zasilające. I rzeczywiście praca pojedynczego urządzenia elektrycznego nawet o dość dużej mocy jest praktycznie nieodczuwalna dla sieci, ale jeżeli uwzględnimy, iż urządzeń o różnej mocy pracuje w sieci tysiące, a może nawet miliony, to efekty ich pracy mogą być i są odczuwalne. Jednak fakt nikłego oddziaływania pojedynczych urządzeń powoduje, iż kłopotliwe jest zidentyfikowanie konkretnego ich wpływu na sieć energetyczną (źródło zasilania). Wydaje się, iż identyfikację i ocenę oddziaływania poszczególnych urządzeń nieliniowych można dokonać w sytuacji, gdy moc źródła napięcia będzie porównywalna z mocą odbiorników. W celu realizacji tego rodzaju badań zaprojektowano oraz zbudowano na CiITWTP Uniwersytetu Rzeszowskiego odpowiednie stanowiska laboratoryjne:

- generator napięcia przemiennego,
- odbiornik nieliniowy z silnikiem DC zasilanym z prostownika,
- odbiornik nieliniowy z silnikiem indukcyjnym zasilany z przekształtnika częstotliwości (o sterowaniu wektorowym lub skalarnym),
- odbiornik nieliniowy złożony z czterech pomp z możliwością sterowania kaskadowego oraz sterowania prędkością obrotową,
- stanowisko do elektronicznej rejestracji i obróbki danych.

1. Nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej

Nieliniowe odbiorniki energii to takie elementy obwodu elektrycznego, których charakterystyka prądowo-napięciowa nie jest linią prostą. Nieliniowość charakterystyki wynika z zależności rezystancji elementu od wartości oraz zwrotu prądu przenień płynącego lub od występującego na nim napięcia. Charakterystyka elementu nieliniowego może być przedstawiona w postaci jednej krzywej (najczęściej elementy niesterowane, np. żarówka, dioda) lub rodziny krzywych (elementy sterowane, np.: tranzystory, tyrystory) – patrz rys. 2.



Rys. 2. Wybrane charakterystyki elementów elektrycznych

Najczęściej spotykane odbiorniki wyposażone w elementy nieliniowe to [Domański 2010: 3]:

- urządzenia domowe i biurowe – komputery, monitory, drukarki, UPS-y, kserokopiarki, kuchnie mikrofalowe, sprzęt RTV;
- urządzenia oświetlające – lampy wyładowcze, świetlówki kompaktowe, lampy łukowe;
- urządzenia elektrotermiczne – piece indukcyjne, piece łukowe, nagrzewnice indukcyjne, spawarki, zgrzewarki, lasery;
- urządzenia napędowe – falowniki, układy miękkiego rozruchu silników, prostowniki, zasilacze prądu stałego.

W zasadzie tylko grzejniki rezystancyjne wykorzystują energię elektryczną w jej podstawowej nieprzetworzonej formie, gdyż nawet „klasyczne” żarówki wprowadzają niewielką nieliniowość.

2. Parametry jakości energii

Problem jakości energii elektrycznej pojawia się w wielu publikacjach naukowych i technicznych. W większości krajów coraz bardziej restrykcyjnie przestrzega się czystości energii (ang. Clean Power). Odpowiednie rozporządzenia i normy definiują m.in. dopuszczalną zawartość wyższych harmonicznych w przebiegach prądu i napięcia w sieci zasilającej. W Europie normą tą jest norma IEC 61000-3-2 oraz IEC 6100-3-4.

Europejska norma EN 50160 przyjęta w Polsce w 1998 r. jako PN-EN 50160 precyzuje parametry i dopuszczalne zakresy ich odchyłeń oraz deformacji napięcia w sieciach niskiego i średniego napięcia. Advisory Committee on Electromagnetic Compatibility (ACEC) zdefiniował jakość energii jako „zbiór parametrów opisujących właściwości procesu dostarczania energii do odbiorców w normalnych warunkach pracy, określających ciągłość zasilania oraz charakteryzujących napięcie zasilające – wartość, częstotliwość, kształt przebiegu czasowego oraz niesymetrię”.

Zgodnie z normą PN-EN 50160 parametry napięcia można definiować poprzez:

- **Napięcie zasilające** (U_n) – wartość skuteczna napięcia w określonej chwili w złączu sieci elektroenergetycznej, mierzona przez określony czas;
- **Napięcie nominalne** – wartość napięcia określająca i identyfikująca sieć, do niej odniesione są pewne parametry charakteryzujące jej pracę;
- **Deklarowane napięcie zasilające** (U_c) – jest w warunkach normalnych równe napięciu nominalnemu ($U_c=U_n$);
- **Normalne warunki pracy** – stan pracy sieci rozdzielczej, w którym spełnione są wymagania dotyczące zapotrzebowania mocy, obejmujący operacje łączeniowe i eliminację zaburzeń przez automatyczny system zabezpieczeń przy równoczesnym braku wyjątkowych okoliczności spowodowanych wpływami zewnętrznymi lub czynnikami pozostającymi poza kontrolą dostawcy;

- **Zmianę wartości napięcia** – zwiększenie lub zmniejszenie się wartości napięcia spowodowane zazwyczaj zmianą całkowitego obciążenia sieci rozdzielczej lub jego części;
- **Odchylenie napięcia** – jest to rzeczywista i znamionowa różnica wartości napięcia. Względne odchylenie napięcia jest wyrażone wzorem:

$$\delta U_{\%} = \frac{U - U_N}{U_N} 100 \quad (1)$$

w którym: U – wartość skuteczna napięcia w określonym punkcie sieci, U_N – napięcie znamionowe rozpatrywanego urządzenia lub sieci;

- **Zapad napięcia zasilającego** – nagłe zmniejszenie się napięcia zasilającego do wartości zawartej w przedziale od 90% do 1% napięcia deklarowanego U_c , po którym w krótkim czasie następuje wzrost napięcia do poprzedniej wartości. Zapad napięcia w rozpatrywanym przedziale czasu jest wyrażony wzorem:

$$\Delta U = \frac{U_{eks1} - U_{eks2}}{U_c} 100 \quad (2)$$

przy czym: U_{eks1} , U_{eks2} – sąsiednie ekstremalne skuteczne wartości napięcia;

- **Przerwę w zasilaniu** – stan, w którym napięcie sieci elektroenergetycznej jest mniejsze niż 1% napięcia deklarowanego U_c ;
- **Przebiegi dorywcze o częstotliwości sieciowej** – o relatywnie długim czasie trwania, zwykle kilka okresów częstotliwości sieciowej, powodowane głównie przez nagłe zmniejszenie obciążenia lub eliminowanie zwarc;
- **Przebiegi przejściowe** – krótkotrwałe, oscylacyjne lub nieoscylacyjne, zwykle silnie tłumione przebiegi trwające kilka milisekund lub krócej, zwykle powodowane wyładowaniami atmosferycznymi lub operacjami łączeniowymi;
- **Harmoniczne napięcia** – napięcie sinusoidalne o częstotliwości równej całkowitej krotności częstotliwości podstawowej napięcia zasilającego, określane:
 - indywidualnie przez podanie względnej amplitudy U_h odniesionej do napięcia składowej podstawowej U_1 ,
 - łącznie, przez określenie współczynnika odkształcenia napięcia THD_U , obliczonego zgodnie z zależnością:

$$THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{40} (U_h)^2}{U_1}} \quad (3)$$

w którym: U_h – wartość względna napięcia w procentach składowej podstawowej, h – rząd wyższej harmonicznej.

3. Laboratorium przeznaczone do analizy i modelowania oddziaływania nieliniowych odbiorników energii na źródło zasilania

Analiza oddziaływania odbiorników na jakość energii prowadzona jest od wielu lat. Autorów publikacji interesuje głównie problem jakości energii jako taki [Hanzelka 2013: 4; Bartman 2011: 2; Koziarowska 2014: 7; Pasko 2007: 10] i znacznie rzadziej spotyka się publikacje traktujące o oddziaływaniu konkretnych odbiorników nieliniowych [Koziarowska 2010: 6; Pabiańczyk 2010: 9]. Bardzo trudno jest znaleźć w literaturze badania dotyczące oddziaływania konkretnego pojedynczego odbiornika nieliniowego na jakość zasilania – pomiary prowadzone w sieciach energetycznych zupełnie nie dają takiej możliwości ze względu na dużą liczbę zakłóceń pochodzących od nieznanymi odbiorników. W celu wyeliminowania zakłóceń zaprojektowano i zbudowano w Pracowni Technik Informatycznych w Inżynierii Elektrycznej UR specjalne stanowiska dedykowane do prowadzenia badań oddziaływania pojedynczych odbiorników na źródło zasilania.

3.1. Stanowisko generatora napięcia przemiennego

Stanowisko pełni rolę źródła zasilania o niewielkiej mocy i stabilnej wartości skutecznej napięcia wyjściowego. Źródłem napięcia jest generator synchroniczny o mocy 10 kW napędzany silnikiem indukcyjnym z regulowaną prędkością obrotową poprzez przemiennik częstotliwości. Parametry programowalnego falownika zasilającego silnik umożliwiają symulacje podmuchów wiatru. Stanowisko umożliwia następujące pomiary:

- na generatorze: napięcia wyjściowe generatora, częstotliwość napięcia wyjściowego, prądów wyjściowych generatora, mocy pobieranej z generatora,
- na silniku napędzającym: napięcia zasilania silnika, częstotliwość napięcia, prądów pobieranych przez silnik, mocy pobieranej przez silnik, momentu obciążenia silnika.

Wszystkie mierzone sygnały można rejestrować on-line w standardzie USB.

3.2. Układ odbiornika nieliniowego z silnikiem DC zasilanym z prostownika

Stanowisko umożliwia badanie oddziaływania silnika prądu stałego zasilanego poprzez układ prostowniczy na źródło zasilania. Układ może być zasilany zarówno z generatora (stanowisko opisane w pkt 3.1), jak i z sieci. Główne komponenty układu to zasilany poprzez prostownik silnik prądu stałego o mocy ok. 1.0 kW obciążony serwowmotorem. Obie maszyny posadowione są na wspólnym łożu i sprzężone mechanicznie. W przypadku zasilania układu z generatora można obserwować wpływ jego nieliniowości na jakość energii – konstrukcja stanowiska umożliwia łatwe wykonanie pomiarów przy pomocy analizatorów jakości energii. Układ umożliwia rejestrację on-line w standardzie USB wszystkich mierzonych sygnałów, tj.: napięcia zasilania silnika, prądów pobieranych przez silnik, mocy pobieranej przez silnik oraz momentu obciążenia silnika.

3.3. Odbiornik nieliniowy z silnikiem indukcyjnym zasilany z przekształtnika częstotliwości

Stanowisko tworzy zespół dwóch maszyn elektrycznych: silnika indukcyjnego (AC ok. 2,2 kW) oraz serwomotoru (ok 1,2 kW) sprzężonych i posadowionych na wspólnym łożu. Serwomotor stanowi obciążenie silnika indukcyjnego, który może być zasilany poprzez wektorowy przemiennik częstotliwości, skalarne przemiennik częstotliwości lub softstart. Umożliwia to badanie nieliniowości układu w zależności od zastosowanego układu napędowego oraz wpływu tejże nieliniowości na jakość energii. Badania te można przeprowadzić dla dwóch źródeł zasilania, gdyż możliwe jest zasilanie całego układu zarówno z sieci energetycznej, jak i z generatora (opisany w pkt 3.1). Dzięki specjalnej konstrukcji stanowiska możliwe jest łatwe wykonanie pomiarów przy pomocy analizatora jakości energii. Ponadto układ umożliwia rejestrację on-line w standardzie USB wszystkich mierzonych sygnałów, tj: napięcia zasilania silnika, częstotliwość napięcia zasilającego, prądów i mocy pobieranej przez silnik oraz momentu obciążenia silnika.

3.4. Zespół czterech pomp z możliwością sterowania kaskadowego oraz sterowania prędkością obrotową

Stanowisko stanowi model fizyczny małego systemu wodociągowego. Główne jego elementy to zespół 4 pomp równoległych o zróżnicowanych mocach (dwie ok. 400W, jedna ok. 600W i jedna ok. 800W), zbiornik na wodę wraz z armaturą oraz układ sterowania pompami. Praca pomp może odbywać się w trybie sterowania kaskadowego oraz w trybie sterowania prędkością obrotową (sterowanie przetwornicą częstotliwości). Pompy pracują w układzie zamkniętym, pobierają i zwracają wodę do tego samego zbiornika. Zadaniem układu jest utrzymanie stałego ciśnienia niezależnie od przepływu. System zasilania pomp czyni z układu odbiornik nieliniowy. Badanie nieliniowości odbiornika oraz jej oddziaływania na źródło zasilania można wykonać zasilając stanowisko z generatora (opisany w pkt 3.1) lub z sieci. Konstrukcja stanowiska umożliwia łatwe wykonanie pomiarów przy pomocy analizatora jakości energii oraz rejestrację on-line wszystkich mierzonych sygnałów we wszystkich trzech fazach. Stanowisko pozwala na pomiar: ciśnienia wody, całkowitego przepływu (poboru) wody dla każdej pompy, napięcia zasilania (przed i za falownikiem), częstotliwości napięcia zasilającego silnik (za falownikiem), pobieranego prądu (przed i za falownikiem), mocy pobieranej przez pompę, prędkości pompy, momentu obciążenia.

3.5. Stanowisko do elektronicznej rejestracji i obróbki danych

Stanowisko stanowią dwa przenośne urządzenia pomiarowo-rejestracyjne: analizator jakości energii oraz rejestrator danych.

Analizator jakości energii to produkt firmy Elspec z serii Blackbox G4500, umożliwia on rejestrację danych według wybranego lub zdefiniowanego scenariusza, między innymi w trybie zgodnym z normą PN-EN50160, pracując

w klasie A. Dzięki wyspecjalizowanym układom zbierania danych możliwe jest wykonywanie ciągłego próbkowania sygnałów napięciowych i prądowych bez czasów martwych oraz jednocześnie wykonywanie obliczeń pozwalających na szczegółową analizę rejestrowanych danych. Dodatkowo urządzenie ma możliwość zapisu wybranych stanów nieustalonych w pamięci. Wszystkie parametry z jednego lub wielu punktów pomiarowych są przedstawione na jednej zsynchronizowanej osi czasu.

Rejstrator danych to ośmiokanałowy DaqPRO-DB5301 umożliwiający pobieranie, przetwarzanie i wyświetlanie pomiarów. Posiada wbudowany zegar czasu rzeczywistego, graficzny wyświetlacz oraz interfejs USB. Charakteryzuje się możliwością rejestracji od 1 próbki/h do 4000 próbek/s oraz 16-bitową rozdzielczością próbkowania.

Podsumowanie

Planowane w PTIwIE badania pozwolą ocenić oddziaływanie regulowanych napędów elektrycznych na sieć energetyczną w zależności od zastosowanych metod sterowania przemienników częstotliwości.

W szczególności opisywane stanowiska laboratoryjne umożliwiają:

- analizę oddziaływania napędu na sieć energetyczną w zależności od zastosowanej metody regulacji prędkości;
- analizę pracy zespołów napędowo-pompowych w zależności od topologii zasilanego systemu;
- weryfikację opracowanych modeli komputerowych napędów elektrycznych wraz z układami sterującymi oraz regulacyjnymi.

Zbudowane stanowiska będą przydatne również do weryfikacji modeli matematycznych, neuronowych zespołów napędowych oraz poszczególnych ich komponentów. W efekcie uzyskany ostateczny model winien opisywać w sposób uniwersalny pracę sterowanych zespołów napędowych.

Literatura

- Baranecki A., Niewiadomski M., Płatek T. (2004), *Odbiorniki nieliniowe – problemy, zagrożenia*, „Wiadomości Elektrotechniczne”, 3.
- Bartman J., Koziorowska A., Kuryło K., Malska W., (2011), *Analiza rzeczywistych parametrów sygnałów elektrycznych zasilających układy napędowe pomp wodociągowych*, „Przeгляд Elektrotechniczny”, 8.
- Domański R., Szkudniewski M. (2010), *Analizator jakości zasilania PQM-701. Jakość zasilania w świetle bezpieczeństwa eksploatacji sieci elektrycznych Sonel SA*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej”, nr 27.
- Hanzelka Z. (2013), *Jakość dostawy energii elektrycznej, zaburzenia wartości skutecznej napięcia*, Kraków.
- Hanzelka Z., *Jakość energii elektrycznej, cz. 4 – Wyższe harmoniczne napięć i prądów*, twelvee.com.pl/pdf/Hanzelka/cz_4_pelna.pdf

- Koziorowska A., Kuryło K., Bartman J. (2010), *Harmoniczne napięcia i prądu generowane przez nowoczesne napędy stosowane w kopalniach kruszywa*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 6.
- Koziorowska A., Bartman J. (2014), *The Influence Of Reactive Power Compensation On The Content Of Higher Harmonics In The Voltage And Current Waveforms*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 1.
- Koziorowska A., Bartman J. (2012), *A-model as a way of squirrel cage induction motor modelling used in pumps drive system*, “International Journal of Numerical Modelling”: Electronic Networks, Devices And Fields; DOI: 10.1002/jnm.814; March/April 2012, Vol. 25, Iss. 2.
- Pabiańczyk J. (2010), *Świetlówki kompaktowe – co dalej?*, „Energetyka”, 1.
- Pasko M., Maciążek M., Buła D. (2007), *Wprowadzenie do zagadnień analizy jakości energii elektrycznej*, „Wiadomości Elektrotechniczne”, 4.
- PN EN 50160, *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4.05.2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (DzU nr 93/2007, p. 623).

Streszczenie

Wpływ nieliniowych odbiorników energii na jej jakość jest zagadnieniem bardzo aktualnym i szeroko dyskutowanym w literaturze. Autorzy większości opracowań swoje prace badawcze prowadzą analizując wpływ odbiorników na sieć energetyczną i koncentrując się na samej jakości energii. Przedstawione w pracy stanowiska laboratoryjne umożliwią badanie wpływu konkretnych urządzeń nieliniowych na sygnały napięciowe i prądowe oraz pozwolą zebrać materiał do weryfikacji modeli matematycznych tychże urządzeń.

Słowa kluczowe: jakość energii, oddziaływanie odbiorników nieliniowych.

Analysis of the impact of receivers on electric power quality – research opportunities of PTIwIE

Abstract

The influence of non-linear receiver of energy to its quality is very actual and widely discussed issue in the literature. The authors of most of research studies analyzing the impact of electrical receiver to the electricity quality and focusing mainly on the quality of energy. Discussed laboratory positions will allow examination of the impact of specific nonlinear devices for voltage and current signals and to gather material for the verification of mathematical models of these devices.

Key words: power quality, the impact of non-linear receivers.