



JACEK BARTMAN¹, DARIUSZ SOBCZYŃSKI²

Przeziennik częstotliwości jako nieliniowy odbiornik energii

Frequency inverter as a non-linear energy loads

¹ Doktor inżynier, Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katedra Inżynierii Komputerowej, Polska

² Doktor inżynier, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki i Systemów Złożonych, Polska

Streszczenie

Artykuł przedstawia zagadnienia związane z pracą nieliniowych odbiorników energii. Określa, jakie odbiorniki uznaje się za nieliniowe, a jakie za liniowe. Jako przykład odbiornika nieliniowego pokazany jest przeziennik częstotliwości pracujący w układzie napędowym z regulowaną prędkością obrotową. Pokazano odkształcenia napięcia i prądu wywołane pracą napędu.

Słowa kluczowe: nieliniowe odbiorniki energii, przeziennik częstotliwości.

Abstract

The work presents the issues associated with the functioning of non-linear receivers of the energy. It determines, what receivers are being regarded non-linear and which too linear. As the example of the non-linear receiver a inverter working in the driving system with the adjusted rotation speed is shown. Showing voltage and current distortion caused by the drive.

Key words: non-linear energy loads, inverter.

Wstęp

Nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej to obwody elektryczne zawierające elementy, których parametry zależą od prądu płynącego przez element bądź napięcia występującego na jego zaciskach. W efekcie zmian parametrów obwodu pobierany przez odbiornik prąd jest nieliniowo zależny od wartości chwilowej napięcia. Analiza tego rodzaju odbiorników nastrocza pewnych trudności, gdyż nie spełniają one zasady superpozycji, zaś ich praca jest przyczyną zniekształcenia napięcia zasilającego [Shmilovitz i in. 2007: 1; Koziorowska i wsp. 2010: 2]. Dopóki odbiorniki nieliniowe stanowiły margines, rozważania na te

mat analizy efektów ich pracy miały znaczenie bardziej teoretyczne niż praktyczne, jednak w ostatnich latach nieliniowe odbiorniki energii bardzo mocno zdominowały przestrzeń urządzeń elektrycznych [Baranecki 2004: 3; Pawłowski 2010: 4]. Stało się tak gdyż poszerzył się obszar ich zastosowań w przemyśle, ale co bardziej istotne, poprzez rozwój elektroniki znalazły one zastosowanie w urządzeniach codziennego użytku, w postaci: świetlówek kompaktowych, zasilaczy impulsowych (stosowane m.in. w komputerach), napędów o regulowanej prędkości.

Napędy elektryczne o regulowanej prędkości obrotowej mają bardzo szerokie zastosowanie, gdyż są to urządzenia praktycznie bezobsługowe, wykorzystywane w zespołach pompowych, systemach nawiewowych itp. Dzięki opracowaniu przemienników częstotliwości regulowane napędy elektryczne są aktualnie budowane w oparciu o niezawodne i tanie silniki indukcyjne, które dzięki temu zyskały kolejny obszar swoich zastosowań [Binkowski 2015: 5; Sobczyński 2015: 6], zaś przemienniki częstotliwości stały się jednym z najpopularniejszych nieliniowych elementów obwodów elektrycznych.

Odbiorniki nieliniowe

We wstępie wspomniano, iż odbiorniki nieliniowe to „wynalazek” ostatnich lat. W rzeczywistości jednak praktycznie wszystkie odbiorniki energii posiadają cechy odbiorników nieliniowych. Jednak dla normalnych warunków pracy ich charakterystyki można przybliżyć charakterystykami liniowymi, nie wprowadzając do analiz znaczących błędów. Przykładowo: przyjmuje się, iż rezystancja przewodnika o określonym przekroju i długości jest stała. W rzeczywistości jednak zależy ona od jego temperatury zgodnie z zależnością:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T),$$

gdzie: R – rezystancja w zadanej temperaturze [Ω], R_0 – rezystancja w temperaturze odniesienia [Ω], α – temperaturowy współczynnik rezystancji [K^{-1}], ΔT – zmiana temperatury [K].

Oznacza to, iż w przypadku przewodnika miedzianego o temperaturowym współczynniku rezystancji $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ zmiana jego temperatura o 100K powoduje zmianę jego rezystancji o 0,0039%. W normalnych warunkach pracy wahania temperatury przewodnika nie osiągają nawet 100K, można więc założyć, że jego rezystancja jest stała, a zależność napięcia od prądu jest liniowa, nie popełniając praktycznie żadnego błędu. Dla odbiorników uważanych za liniowe rezystancja zwykła:

$$R = \frac{U}{I}$$

jest równa rezystancji dynamicznej

$$r = \frac{dU}{dI}$$

gdzie: U – napięcie elektryczne [V], I – natężenie prądu [A].

W przypadku odbiorników nieliniowych rezystancja dynamiczna i rezystancja zwykła mają różne wartości, zaś charakterystyka prądowo-napięciowa takiego elementu nie jest linia prostą, często składa się z kilku krzywych [Koziorowska 2014: 7].

Stosowanie nieliniowych odbiorników energii elektrycznej powoduje negatywne skutki; do najbardziej uciążliwych należy zaliczyć:

- zwiększony pobór mocy,
- pobór wyższych harmonicznych prądu i w konsekwencji odkształcenie przebiegu napięcia [Bartman 2010, Bartman 2011, inni?].

Zarówno analiza mocy, jak i odkształcenia napięcia w przypadku stosowania nieliniowych odbiorników energii nie doczekały się jeszcze w pełni satysfakcjonujących jednoznacznych opisów.

Bilans mocy w nieliniowych obwodach elektrycznych ciągle nie jest jednoznacznie opisany. Doświadczenie Steimetz pokazało, iż w obwodzie z łukiem elektrycznym:

$$S^2 > P^2 + Q^2,$$

gdzie: S – moc pozorna, P – moc czynna, Q – moc bierna.

Kolejne teorie mocy Budeanu, Fryzego, Czarneckiego i inne jednolicie definiują moc czynną. Jednak problem zdefiniowania mocy biernej w sposób odzwierciedlający zachodzące zjawiska i jednocześnie zgodny z praktyką elektryczną nie jest przez wymienionych wcześniej naukowców jednolity i ciągle pozostaje zadaniem otwartym [Pawłowski 2010: 4; Czarnecki 2009: 8; Wciślik 2014: 9].

Podstawowym elementem analizy odkształcenia przebiegów jest analiza harmonicznych, której celem jest uzyskanie widma przebiegu, a dokładnie amplitud A_k oraz kątów przesunięcia fazowego φ_k poszczególnych harmonicznych. Najpopularniejsze metody analizy widmowej realizowane są w oparciu o dyskretną transformatę Fouriera – DFT [Koziorowska 2010: 2; Koziorowska 2014: 7; Hanzelka 2004: 10; Bartman 2011: 11; Lin 2012: 12]. Trudności w realizacji tego dobrze opisanego teoretycznie problemu w przypadku niektórych odbiorników nieliniowych np. przemienników częstotliwości, wynika z kłopotu w ustaleniu częstotliwości podstawowej, gdyż jej wartość dryfuje. W przypadku przemienników częstotliwości przebieg napięcia jest niestacjonarny oraz zniekształcony dodatkowo przez interharmoniczne [Ryzmer 2011: 13; Bartman 2016: 14].

Przeziennik częstotliwości

Przezienniki częstotliwości są to urządzenia umożliwiające przekształcanie napięcia przemiennego sieci o stałej częstotliwości na napięcie przemiennie o innej, najczęściej regulowanej częstotliwości. W klasycznym przezienniku częstotliwości przekształcenie napięcia realizowane jest dwustopniowo:

- napięcie przemiennie wejściowe jest zamieniane na napięcie stałe,
- uzyskane napięcie stałe jest zamieniane na regulowane napięcie wyjściowe przemiennie.

Opisany powyżej sposób działania wskazuje, iż komponentami, z których zbudowany jest każdy przeziennik częstotliwości, muszą być prostownik oraz falownik. Dodatkowo ze względów eksploatacyjnych w przezienniku częstotliwości występują jeszcze układ pośredniczący oraz układ sterowania (rys. 1). Układy te muszą ze sobą ściśle i bardzo precyzyjnie współpracować, dlatego też przeziennik częstotliwości stanowi bardzo skomplikowane technologicznie urządzenie. Jego konstrukcja stanowi synergiczne połączenie wiedzy inżynierów różnych branż: elektryków, elektroników, automatyków, informatyków oraz mechaników.

Układ sterujący przeziennika częstotliwości jest odpowiedzialny za jego właściwą pracę i może realizować różne algorytmy sterowania. Metody sterowania przekształtnikami częstotliwości zasilającymi silniki indukcyjne dzieli się na dwie kategorie: sterowanie skalarne i sterowanie wektorowe. Układy sterowania skalarne określane są jako układy sterowania zewnętrznego, natomiast układy sterowania wektorowego nazywane są układami sterowania wewnętrznego.

W układach sterowania skalarne regulacji podlegają jedynie amplitudy i częstotliwości wybranych sygnałów. Sterownik reguluje więc częstotliwość zasilania silnika, a nie jego prędkość, gdyż ta zależy nie tylko od częstotliwości, ale również od poślizgu. W konsekwencji prędkość mechaniczna nie jest kontrolowana precyzyjnie i nie ma możliwości regulacji momentu obrotowego. Ponadto wadą układu sterowania skalarne jest brak kontroli nad istotnymi wielkościami silnika, takimi jak prąd, moment elektromagnetyczny czy strumień magnetyczny w stanach przejściowych maszyny [Kaźmierkowski, Tunia 1994:15].

Metoda sterowania wektorowego pozwala na niezależną pełną regulację prędkości oraz momentu obrotowego silnika. Jest to możliwe dzięki oddzielnemu sterowaniu prądem wirnika oraz prądem magnesującym. Prąd wirnika jest odpowiedzialny za moment obrotowy, zaś prąd magnesujący za strumień magnetyczny. Bezpośrednia kontrola momentu i możliwość korekty jego wartości pozwala elastycznie reagować na zmieniające się obciążenie, pozwala również na wytworzenie dużego momentu chwilowego w celu rozpędzenia maszyny, uzyskujemy więc wysoką dynamikę napędu [Kaźmierkowski, Tunia 1994: 15].

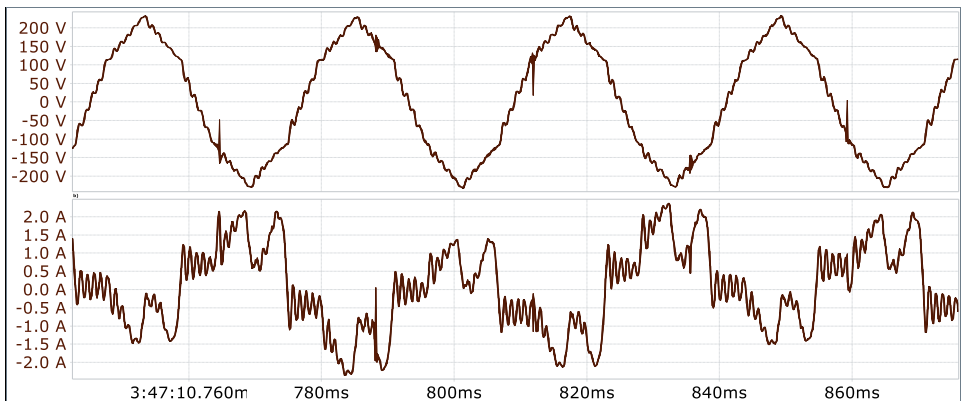
W przeziennikach częstotliwości stosuje się dwie metody kształtowania napięcia wyjściowego:

- metodę modulacji amplitudowej – PAM,
- metodę modulacji szerokości impulsów – PWM.

Metoda PWM jest najczęściej stosowaną metodą generowania przez falownik napięcia trójfazowego o regulowanej częstotliwości i amplitudzie.

Wyniki badań i spostrzeżenia

Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym złożonym z generatora napięcia, przemiennika częstotliwości Emerson Comander SK, silnika indukcyjnego oraz serwowotoru. Pomiary wykonano, wykorzystując analizator jakości energii Elspec Blackbox G4500. Przyrząd charakteryzuje się bardzo wysoką częstotliwością próbkowania umożliwiającą wykonanie 1024 pomiarów w ciągu jednego okresu napięcia oraz 512 pomiarów w okresie prądu. Dzięki dedykowanemu oprogramowaniu PQScada dane z pomiarów można przetransferować do bazy danych MS SQL. Dane przechowywane w bazie można poddać analizie umożliwiającej wyznaczenie bardzo wielu parametrów przebiegu w trybie okres po okresie lub w trybach zgodnych z normą EN50160.



Rys. 1. Przebieg napięcia w prądu przemiennika częstotliwości

Przebieg napięcia i prądu przekształtnika częstotliwości zasilającego silnik indukcyjny pokazano na rys. 1. Oba przebiegi są odkształcone, w szczególności kształt przebiegu prądu jest daleki od sinusoidy. Przekształtniki częstotliwości należy więc zaliczyć do typowych przedstawicieli nieliniowych odbiorników energii. Pobierany przez nie prąd ma charakter bardzo odkształcony, co wpływa na kształt napięcia zasilającego. Dodatkowo prąd pobierany przez przekształtnik ma przebieg niestacjonarny, co utrudnia prowadzenie analiz.

Nieliniowe odbiorniki energii to rzeczywistość. Ich udział w przestrzeni odbiorników energii elektrycznej jest coraz większy. Konieczne staje się prowadzenie badań dotyczących ich wpływu na sieć elektryczną. Dotychczas prowa-

dzzone analizy wykazały, iż zalety eksploatacyjne tego typu odbiorników okupione są ich negatywnym oddziaływaniem na inne odbiorniki energii. Oddziaływanie to wynika ze zniekształceń napięcia powodowanych przez pobór prądu odkształconego przez odbiorniki nieliniowe.

Literatura

- Baranecki A., Niewiadomski M., Płatek T. (2004), *Odbiorniki nieliniowe – problemy, zagrożenia*, „Wiadomości Elektrotechniczne” vol. 3.
- Bartman J., Koziarowska A., Kuryło K., Malska W. (2011), *Analiza rzeczywistych parametrów sygnałów elektrycznych zasilających układy napędowe pomp wodociągowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” vol. 87/8.
- Bartman J., Sobczyński D. (2016), *The Analysis of the Voltage and Current Waveforms of Frequency Inverter Fed Induction Motor*, „Computing in Science and Technology”, red. M. Kruk.
- Binkowski T. (2015), *Universal High Speed Induction Motor Driver*, „Lecture Notes in Electrical Engineering”, red. L. Gołębiowski, D. Mazur, Wyd. Springer Verlag.
- Czarnecki L. (2009), *Uwagi do artykułu „Możliwość przedstawienia jednolitej nowej koncepcji mocy biernej prądu niesinusoidalnego w dziedzinie czasu”*, „Przegląd Elektrotechniczny” vol. 85/6.
- Hanzelka Z., Bień A. (2004), *Harmonics, Interharmonics*, Wyd. Power Quality Application Guide.
- Każmierkowski M., Tunia H. (1994) *Automatic Control of Converter-fed Drives*, Wyd. Elsevier.
- Koziarowska A., Bartman J. (2014), *The Influence of Reactive Power Compensation on the Content of Higher Harmonics in the Voltage and Current Waveforms*, „Przegląd Elektrotechniczny” vol. 90/1.
- Koziarowska A., Kuryło K., Bartman J. (2010), *Harmoniczne napięcia i prądu generowane przez nowoczesne napędy stosowane w kopalniach kruszywa*, „Przegląd Elektrotechniczny” vol. 86/6.
- Lin H.C. (2012), *Current Harmonics and Interharmonics Measurement Using Recursive Group-Harmonic Current Minimizing Algorithm*, „IEEE Transactions on Industrial Electronics” vol. 59/2.
- Pawłowski M. (2010), *Podstawy analizy harmonicznej odkształconych przebiegów prądów i napięć w sieciach zasilających*, „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa” vol. 7.
- Rezmer J., Leonowicz Z., Gono R. (2011), *Analysis of Distorted Waveform in Power Converter Systems*, „Przegląd Elektrotechniczny” vol. 87/1.
- Shmilovitz D., Duan J., Czarkowski D., Zabar Z., Lee S. (2007), *Characteristics of Modern Non-linear Loads and Their Influence on Systems With Distributed Generation*, „International Journal Energy Technology and Policy” vol. 5/2.
- Sobczyński D. (2015), *A Concept of a Power Electronic Converter for a BLDC Motor Drive System in Aviation*, „Aviation” vol. 19/1.
- Wciślik M. (2014), *Bilans mocy w obwodzie prądu przemiennego z odbiornikiem nieliniowym*, „Przegląd Elektrotechniczny” vol. 90/2.