

Analiza napięć i prądów pobieranych przez zespół pomp wodociągowych

Streszczenie. Praca dotyczy pomiarów i analiz napięć oraz prądów pobieranych przez zespół pomp wodociągowych. Zespół składa się z czterech pomp napędzanych silnikami indukcyjnymi z regulowaną prędkością obrotową, pracujących w układzie wędrującego falownika. Analizie poddano różne punkty pracy układu wymuszając tym samym jego funkcjonowanie w różnych konfiguracjach, wymagających pracy różnej liczby pomp oraz silników. Oceniono stopień odkształcenia prądu w badanych punktach, wykorzystując do tego celu analizy czasowe oraz częstotliwościowe. Badania wykonano na specjalnie przygotowanym stanowisku laboratoryjnym, wykorzystując do rejestracji napięć oraz prądów analizator jakości energii Elspec BlaxBox4500 oraz dedykowane oprogramowanie.

Abstract. The work concerns the measurement and analysis of voltage and current drawn by the water supply pump station. The set consists of four pumps driven by induction motors with adjustable speed, working in the system of a traveling inverter. Various work points of the system have been analyzed, thus forcing its functioning in various configurations requiring the work of various numbers of pumps and engines. The degree of current distortion in the tested points was evaluated using time and frequency analyzes for this purpose. The tests were carried out on a specially prepared laboratory bench, using the Elspec BlaxBox4500 energy quality analyzer and dedicated software to record voltages and currents. (Analysis of voltage and current drawn by the water supply pump station)

Słowa kluczowe: przebiegi odkształcone, pompy wodociągowe, harmoniczne, silnik indukcyjny.

Keywords: distorted waveforms, water pumps, harmonics, induction motor.

Wstęp

Wykorzystanie na szeroką skalę przemienników częstotliwości do regulacji prędkości obrotowej silników indukcyjnych spowodowało przełom w technice pompowej. Umożliwiło ono poprawę energochłonności zespołów pompowych, co jest korzystne ze względów ekologicznych, ale także pozwoliło obniżyć koszty ich eksploatacji. W przypadku stosowanej wcześniej regulacji ciśnienia przez dławienie energia przekazana przez pompę do cieczy była tracona bezpowrotnie na zaworze dławiącym. Natomiast w przypadku regulacji przez zmianę prędkości obrotowej, pompa przekazuje do cieczy ilość energii adekwatną do aktualnych potrzeb. W konsekwencji regulacja przez zmianę prędkości obrotowej jest zawsze korzystniejsza energetycznie niż regulacja przez dławienie [1].

Przez długi okres czasu przeszkodą w upowszechnieniu regulacji ciśnienia wody w sieci wodociągowej przez prędkość obrotową był koszt przemienników częstotliwości. W miarę wzrostu wielkości produkcji koszt ten stopniowo ulegał zmniejszeniu i obecnie urządzenia te weszły do powszechnego użycia, stając się niemal standardowym składnikiem zespołu pompowego. Stosowanie przemienników częstotliwości powoduje wprowadzenie silnych nieliniowości do obwodu elektrycznego, czego konsekwencją jest odkształcenie pobieranego przez odbiornik (zespół pompowy) prądu [2-4] oraz negatywne oddziaływanie na źródło zasilania. Analizy odkształcenia napięcia i prądu wywołane nieliniowością odbiornika energii są szeroko dyskutowane w literaturze [2, 4-11] i najczęściej bazują na metodach czasowych oraz częstotliwościowych. Obszerne badania przebiegu napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości, którego funkcjonowanie jest przyczyną nieliniowości tegoż elementu przedstawiono w pracach [3, 12-15].

Możliwy zakres regulacji prędkości obrotowej zespołu pompowego

Zastosowanie w zespole pompowym napędu z regulowaną prędkością obrotową może powodować pewne problemy w eksploatacji. Aktualnie produkowane silniki indukcyjne są przystosowane do współpracy z przemiennikami częstotliwości i na ogół nie obserwuje się podczas ich eksploatacji negatywnych skutków termicznych wynikających z zasilania ich napięciem o częstotliwości odbiegającej od nominalnej [16]. Ze względów

wytrzymałościowych częstotliwość napięcia zasilającego nie powinna jednak przekraczać w znaczący sposób 50Hz. Należy pamiętać, że ciśnienie wytwarzane przez pompę, a także moment skręcający wału rosną z kwadratem prędkości obrotowej [17].

W przypadku pomp prawdopodobne jest zaistnienie większej liczby problemów niż w przypadku silników. Najpoważniejszym z nich jest możliwość wystąpienia rezonansu przy niektórych prędkościach obrotowych. Wprawdzie najczęściej prędkości krytyczne, powodujące niebezpieczny wzrost drgań pompy, są znacznie wyższe od prędkości osiąganych przez silnik indukcyjny, jednak przy szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej istnieje niebezpieczeństwo, iż pokryje się ona z podzielnikiem prędkości krytycznej pompy co spowoduje wzrost drgań. Z kolei zbyt duże obniżenie prędkości obrotowej może spowodować zmniejszenie nośności łożysk ślizgowych oraz wywołać problemy w zespole uszczelnień mechanicznych, w których przepływ cieczy chłodzącej wymuszany jest przez wirujące elementy [17].

Ocena odkształcenia przebiegów

Analiza napięć i prądów zespołu pompowego w kontekście odkształcenia ich przebiegów wymaga zdefiniowania wskaźników, które pozwolą uzyskać obiektywne informacje. Najczęściej analizy prowadzi się w dziedzinie czasu - wykorzystując bezpośrednio wartości pomiarów lub w dziedzinie częstotliwości. Analizy częstotliwościowe wymagają transformacji sygnału z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości, do tego celu wykorzystuje się najczęściej Szybką Transformatę Fouriera (FFT) [2-4, 6-8, 18]. W wyniku zastosowania transformaty uzyskujemy widmo częstotliwościowe sygnału, składające się z kolejnych harmonicznych, których wartości wskazują na wkład poszczególnych składowych w kształt przebiegu. Analizy częstotliwościowe umożliwiają wydobycie z przebiegu cech, których obserwacja nie jest możliwa w dziedzinie czasu [19].

Poniżej zestawiono wskaźniki, które zostały wykorzystane w niniejszej pracy.

Wartość skuteczna

Wartość skuteczna przebiegu okresowego opisana jest wzorem:

$$(1a) \quad Y = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} y(t)^2 dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2}$$

Na potrzeby analiz wiele przyrządów pomiarowych wyznacza wartość skuteczną wg zależności:

$$(1b) \quad Y = \sqrt{\sum_{h=1}^H Y_h^2}$$

Współczynnik zawartości k-tej harmonicznej

Współczynnik zawartości harmonicznej określa wkład poszczególnych harmonicznych w przebieg sygnału.

$$(2) \quad w_h = \frac{Y_h}{Y_1} \cdot 100\%$$

Współczynnik zawartości wyższych harmonicznych (THD)

Współczynnik THD odzwierciedla stosunek wartości skutecznej harmonicznych wyższego rzędu do wartości skutecznej składowej podstawowej:

$$(2) \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H Y_h^2}}{Y_1}$$

gdzie: $y(t)$ - analizowany przebieg, H - liczba harmonicznych uwzględnianych w analizie, h - indeks oznaczający numer harmonicznej, Y_1 - podstawowa harmoniczna przebiegu, Y_h - h -ta harmoniczna przebiegu, T_0 - okres..

Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze wykorzystywane do badań składało się z następujących elementów:

- szafy sterującej z przemiennikiem częstotliwości Emerson Commander SK,
- zespołu pompowego złożonego z 4 pomp napędzanych silnikami indukcyjnymi (rys.1.),
- analizatora jakości energii Elspec Blackbox G4500,
- serwera baz danych MS SQL,
- mikrokomputera ze specjalistycznym oprogramowaniem PQScada oraz PQInvestigator.



Rys.1. Widok zespołu pomp

Przemiennik częstotliwości służy do zasilania silników indukcyjnych napędzających pompy. Pracuje on w układzie tzw. wędrującego falownika - regulowana jest prędkość tylko jednego silnika, pozostałe pracują z sieci lub są wyłączone. Jeżeli zapotrzebowanie na wodę wzrasta silnik jest rozpędzany i po osiągnięciu częstotliwości 50Hz,

zostaje on przełączony na sieć, a przemiennik załącza kolejny silnik, regulując poprzez zmianę częstotliwości jego prędkość. W analogiczny sposób przy spadku zapotrzebowania na wodę kolejne silniki są wyłączane.

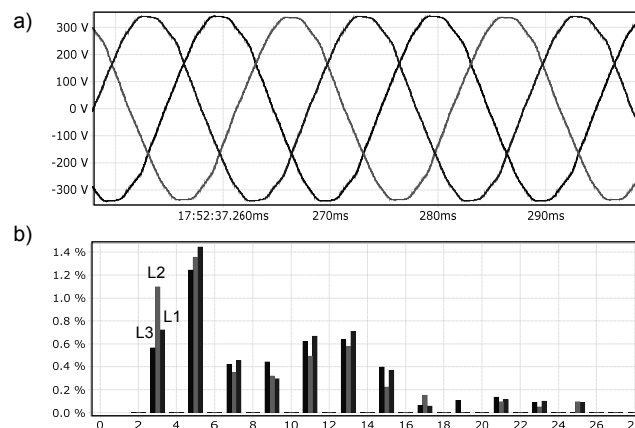
Do pomiarów wykorzystano mikroprocesorowy analizator jakości energii klasy A firmy Elspec z serii Blackbox G4500. Urządzenie posiada 11 kanałów pomiarowych, co pozwala na jednoczesny pomiar napięć oraz prądów w każdej z faz. Częstotliwość próbkowania napięcia wynosi 1024 próbek na okres, zaś prądu 256 próbek na okres, co pozwala uzyskać bardzo szerokie spektrum napięcia (do 511 składowych) oraz szerokie widmo prądu (do 127 składowych). Oprócz analizy harmonicznych przyrząd umożliwia przeprowadzenie analizy interharmonicznych oraz analiz statystycznych. Analizator umożliwia rejestrację parametrów jakości energii zgodnie z normą EN 50160 oraz IEC 61000-4-15 (PN-EN-61000-4-30).

Wyniki badań eksperymentalnych

Badania przeprowadzono na opisanym powyżej stanowisku pomiarowym wykonując pomiary w trybie cyklu po cyklu. W pierwszym kroku przeprowadzono analizę napięcia zasilającego, a w kolejnym analizę pobieranego przez zespół pomp prądu.

Analiza napięcia zasilającego

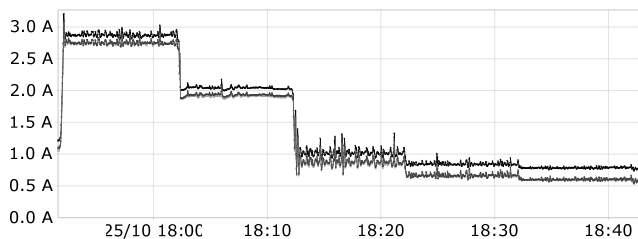
Badany zespół pomp wraz z układem napędowym zasilono z sieci publicznej. Kształt napięcia w poszczególnych fazach pokazano na rys. 2a. Napięcie posiada charakter praktycznie nieodkształcony. W jego spektrum pokazanym na rys. 3b. widoczny jest niewielki udział wyższych harmonicznych, największy wkład posiada 5 harmoniczna i wynosi on ok. 1,4%. Kształt napięcia zasilającego pozostawał praktycznie stały i nie zaobserwowano aby zależał on od punktu pracy zespołu napędowego.



Rys. 2. Kształt napięcia zasilania (a) oraz jego spektrum (b) w fazach L1, L2, L3

Analiza prądu

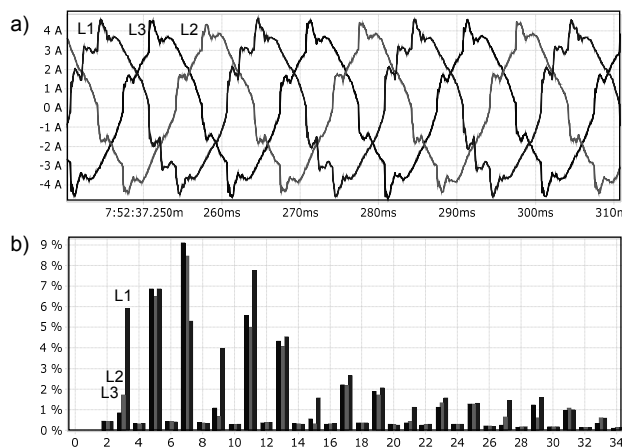
W pierwszej kolejności dokonamy oceny wartości skutecznej natężenia prądu oraz jej zmiany podczas badań (rys. 3), które są spowodowane zmianami zapotrzebowania na wodę. W celu utrzymania stałego ciśnienia w rurociągu „wędrujący falownik” odłącza/dołącza kolejne silniki oraz dostosowuje prędkość jednego z nich do aktualnych wymagań. Widoczne na przebiegu „falowanie” jest efektem działania układu sterującego, który w celu utrzymania wymaganych parametrów przesyłu wody permanentnie zmienia częstotliwość zasilania.



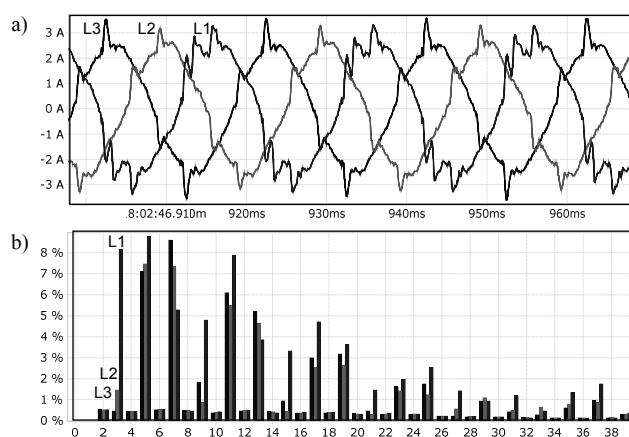
Rys. 3. Wartość skuteczną prądu podczas badań w fazach L1, L2, L3.

Badania rozpoczęto od dużego zapotrzebowania na wodę, stopniowo je zmniejszając, początkowo pracowały wszystkie cztery pompy, zaś pod koniec badań tylko jedna. Widoczne jest to na rys. 3, gdzie wartość skuteczną prądu stopniowo maleje.

Kształt prądu dla największego zapotrzebowania na wodę (zakres 1 na rys. 3) pokazano na rys. 4a. Jego amplituda wynosi średnio ok. 4,5A, jest on odkształcony, jednak widoczny jest zarys sinusoidy. Widmo prądu dla tego stanu pracy widoczne jest na rys. 4b, dominują w nim kolejno składowe 7, 5 i 11, zaś współczynnik THD wynosi ok. 15%. Widoczny jest nieco inny rozkład widma w fazie L1 niż w dwu pozostałych



Rys. 4. Kształt pobieranego prądu (a) oraz jego spektrum (b) w fazach L1, L2, L3 podczas pracy w zakresie 1

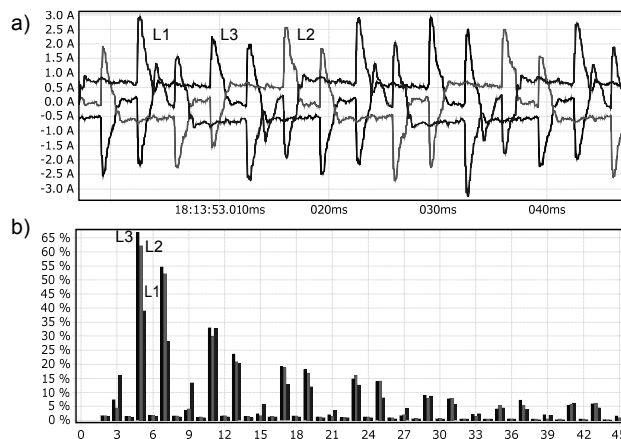


Rys. 5. Kształt pobieranego prądu (a) oraz jego spektrum (b) w fazach L1, L2, L3 podczas pracy w zakresie 2

W kolejnym 2 zakresie pracy (rys. 3.), ze względu na mniejszy pobór wody, zauważalny jest spadek wartości skutecznego prądu do ok. 2A oraz jego amplitudy do ok. 3,4A (rys.5a). Nieco wzrosło odkształcenie prądu (THD=18%), nadal największy udział posiadają w nim składowe 5, 7 i 11.

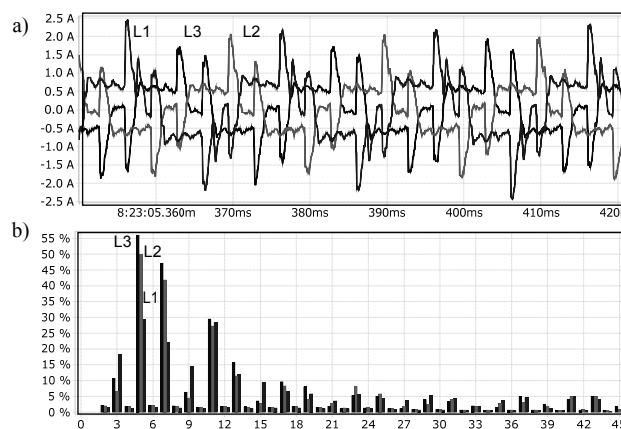
W dalszym ciągu widmo dla fazy L1 różni się od widma faz L2 i L3.

Analizując 3 zakres pracy zespołu pompowego (rys.6) należy stwierdzić, iż wartość skuteczną prądu zmniejszyła się do ok. 1A. Nieproporcjonalnie do jej spadku zmalała amplituda prądu, w konsekwencji bardzo wzrósł współczynnik odkształcenia prądu. W analizowanym zakresie pracy średnia wartość współczynnika odkształcenia prądu wynosi ok. 72% dla fazy L1 i prawie 100% dla faz L2 oraz L3. Największy wkład w odkształcenia posiadają kolejno składowe 5, 7 i 11.



Rys. 6. Kształt pobieranego prądu (a) oraz jego spektrum (b) L1, L2, L3 podczas pracy w zakresie 3

Kształt prądu dla 4. zakresu pokazano na rys. 7a, a jego widmo na rys. 8b. Obserwujemy spadek wartości prądu oraz jego odkształcenia, ciągle jest jednak ono duże, dla fazy L1 - THD≈60%, dla L2 - THD ≈75% i L3 - THD ≈85%.



Rys. 7. Kształt napięcia zasilania (a) oraz jego spektrum (b) w fazach L1, L2, L3 podczas badań podczas pracy w zakresie 4

Podsumowanie

Praca dotyczy badania kształtu prądu płynącego przez regulowany zespół pompowy. Zespół składa się z 4 pomp napędzanych silnikami elektrycznymi i pracuje w układzie tzw. "wędrującego falownika". Badania pozwalają stwierdzić, iż prąd zespołu pompowego ma charakter odkształcony. Za odkształcenie odpowiadają głównie harmoniczne 5, 7 i 11, chociaż zauważalny jest również wkład innych harmonicznych nieparzystych. Odkształcenie prądu jest zdecydowanie mniejsze jeżeli konieczna jest praca większej liczby silników. Wynika to ze specyfiki pracy systemu, w którym dokładnie jeden silnik jest zasilany z przemiennika częstotliwości, zaś pozostałe (jeżeli są wymagane) zasilane są z sieci.

Autorzy: dr inż. Jacek Bartman, Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katedra Inżynierii Komputerowej, ul. prof. Pigonia 1, 35-959 Rzeszów, E-mail: jbartman@ur.edu.pl; dr hab. prof. UR Aleksander Marszałek Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katedra Inżynierii Komputerowej, ul. prof. Pigonia 1, 35-959 Rzeszów, E-mail: amarsz@ur.edu.pl; mgr inż. Mateusz Drabczyk, Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katedra Mechaniki i Budowy Maszyn, ul. prof. Pigonia 1, 35-959 Rzeszów, E-mail: amarsz@ur.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Pakuła G., Kasprzyk M., Oszczędność energii w wyniku modernizacji pompowni wodociągowych, *kronikatechniki-pompowej.pl*, (2015)
- [2] Hanzelka Z., Bień A., "Harmonics, Interharmonics", Power Quality Application Guide, 04
- [3] Reźmer J., Leonowicz Z., Gono R., Analysis of distorted waveform in power concrete systems, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 1, 254-257
- [4] Bartman J., Accuracy of reflecting the waveforms of current and voltage through their spectrum determined by the standards regulating measurements, *Revue Roumaine des sciences techniques - Serie Electrotechnique et Energetique*, 61 (2016), nr. 4, 355-360
- [5] Kuryło K., Bartman J., Koziorowska A., Harmoniczne napięcia i prądu generowane przez nowoczesne napędy stosowane w kopalniach kruszywa, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 6, 279-284
- [6] Bartman J., Koziorowska A., Kuryło K., Malska W., Analiza rzeczywistych parametrów sygnałów elektrycznych zasilających układy napędowe pomp wodociągowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 8, 8-11
- [7] Lin H.C., Current harmonics and interharmonics measurement using Recursive Group-Harmonic Current Minimizing Algorithm, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (2012), nr 2, 1184-1193
- [8] Koziorowska, J. Bartman, The influence of reactive power compensation on the content of higher harmonics in the voltage and current waveforms, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.1, 136-140
- [9] Taranenko I., Pawełek R., Gorpynych O., Zastosowanie transformaty falkowej do analizy przebiegów napięć zasilających napędy z częstotliwościową regulacją prędkości obrotowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.11, 69-73
- [10] Kuryło K., Sabat W., Klepacki D., Wyższe harmoniczne prądu generowane przez kompaktowe fluorescencyjne źródła światła zasilane napięciem sinusoidalnym i odkształconym, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 60 2014, nr 8, 622-625
- [11] Bartman J., Palczak A., Voltage and current distortion generated by the CNC, *2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, Koscielisko, (2107) pp. 1-6, doi:10.1109/PAEE.2017.8008981
- [12] Bińkowski T., Buczek K., Control of high speed drive in home equipments, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr. 8, 1-7,
- [13] Bartman J., The analysis of output voltage distortion of inverter for frequency lower than the nominal, *Journal of Electrical Engineering*, 68 (2107), nr 3, 194-199, DOI:10.1515/jee-2017-0028.
- [14] Bartman J. Evaluating the level of waveform distortion, *Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems*, Springer International Publishing, (2018), 305-318, doi.org/10.1007/978-3-319-63949
- [15] Bartman J., Kwiatkowski B., The Influence of Measurement Methodology on the Accuracy of Electrical Waveform Distortion Analysis, *Measurement Science Review*, 18 (2018) nr. 2, 72-78, 2018, doi.org/10.1515/msr-2018-0011
- [16] Twaróg B., Bartman J., Thermal changes of the induction motor for different power frequencies, *2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, Kościelisko, (2018)
- [17] Pakuła G., Uwagi na temat regulacja parametrów pomp wirowych przez zmianę prędkości obrotowej, *kronikatechnikipompowej.pl*, (2015.)
- [18] Marszałek A., Elektronika. Uniwersytet Rzeszowski. Rzeszów (2013).
- [19] Langton Ch., Victor L., The Intuitive Guide to Fourier Analysis & Spectral Estimation with MATLAB, MathWorks (2017)