

HARMONICZNE NAPIĘCIA I PRĄDU GENEROWANE PRZEZ NOWOCZESNE NAPĘDY STOSOWANE W KOPALNIACH KRUSZYWA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań pomiarowych napięcia i prądu pobieranego przez system napędowy kopalni kruszywa. Badania przeprowadzono dla trzech stanów pracy urządzeń zainstalowanych w kopalni, przeanalizowano wpływ nieliniowych odbiorników na kształt prądu i napięcia zasilania. Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci przebiegów chwilowych napięć i prądów oraz wykresów obrazujących udział poszczególnych harmonicznych w analizowanych przebiegach.

Abstract. The paper presents the results of voltage and current measurements made in drive system of broken stone mines. The tests were provided for three conditions of mines devices work. There were analyzed the influence of nonlinear devices on current and voltage forms. The measurement results are shown as current and voltage course transitional, and charts present individual harmonical participation in analyze courses. (**Voltage and Current Harmonicals Generate by Modern Drivers Used in Broken Stone Mines**).

Słowa kluczowe: odkształcenie napięcia i prądu, wyższe harmoniczne, przemiennik częstotliwości, kopalnia kruszywa.

Keywords: Voltage and Current Distortion, Higher Harmonicals, Frequency Converter, Broken Stone Mines.

Wstęp

Kruszywa, to szeroki asortyment produktów, znajdujących zastosowanie w drogownictwie, budownictwie, kolejnictwie oraz wielu innych gałęziach przemysłu. Ich pozyskiwanie odbywa się najczęściej drogą wydobywczą w kopalniach odkrywkowych, aczkolwiek można spotkać również inne metody.



Rys. 1. Widok na typowe urządzenia stosowane w kopalniach kruszywa (fot. własna).

Typowymi urządzeniami wykorzystywanymi w kopalniach kruszywa są maszyny do odspajania gruntów pozwalające na jego transport na niewielką odległość. Urobek pozyskiwany przez nie jest transportowany przez przenośniki taśmowe, wyciągi pochyłe do sortowni (rys. 1). Kluczowym elementem każdego urządzenia jest jego napęd – wymaga się od niego dużej niezawodności podczas pracy w trudnych warunkach. Bardzo ważnym elementem jest również aspekt kosztowności zarówno w kontekście energetycznym jak i osobowym.

Kopalniane maszyny mogą być napędzane silnikami spalinowymi, elektrycznymi lub napędami spalinowo-elektrycznymi. Najczęściej wykorzystuje się do napędu silniki indukcyjne zasilane poprzez przełącznik gwiazda-trójkąt, które za pośrednictwem przekładni mechanicznych lub hydrokinetycznych (rys. 2) napędzają maszyny wydobywcze i transportujące.

Obecnie coraz częściej do sterowania silników napędowych koparek stosuje się układy przekształtnikowe, które dają możliwość pracy jak w układzie ze sprzęgłem hydrokinetycznym, ponadto umożliwiają regulację prędkości obrotowej silnika i płynne dostosowanie jego mocy do aktualnych potrzeb. Daje to oszczędność energii

elektrycznej i elastyczną pracę układu [3]. Tej możliwości nie było w układach ze sprzęgłem hydrokinetycznym.

Dobór odpowiedniego układu wymaga rozważenia nie tylko problemów technicznych, ale i ekonomicznych rozwiązań. Nakłady na nowoczesne układy napędowe średnich i dużych mocy są znaczące, stąd wynika konieczność przeprowadzenia analizy różnych możliwych wariantów rozwiązań. Koszty eksploatacji układów napędowych nie są sprawą obojętną dla użytkownika. W praktyce zdarza się, iż przy długoletnim użytkowaniu układów napędowych koszty ich eksploatacji przewyższają nakłady na ich zakup. Otwarte pozostają jednak pytania:

- jak nowoczesne układy zasilania wpływają na jakość energii elektrycznej,
- czy ich zastosowanie przynosi wymierne efekty ekonomiczne.



Rys. 2. Widok sprzęgła hydrokinetycznego (fot. własna)

W artykule przedstawiono wyniki badań pomiarowych oraz analizy pozwalające na wstępną odpowiedź na pierwsze z postawionych pytań.

Odkształcenia w przebiegach napięcia i prądu, a jakość energii

Idealne (teoretyczne) napięcie zasilające ma charakter sinusoidalny, jednak pracujące w sieci odbiorniki bardzo często posiadają charakter nieliniowy i prąd, który pobierają znacznie odbiega od sinusoidy. Zniekształcony prąd powoduje odkształcenie napięcia zasilającego, w którym pojawiają się harmoniczne wyższych rzędów. Występowanie wyższych harmonicznych w przebiegach prądu w sieci zasilającej jest zjawiskiem bardzo

niekorzystnym, gdyż zakłóca prawidłową pracę innych urządzeń oraz powoduje przegrzewanie się instalacji elektrycznej i transformatorów. Odształcone napięcie zasilania również wpływa negatywnie na pracę urządzeń elektrycznych, a w skrajnych przypadkach może doprowadzić do ich uszkodzenia [6].

W celu określenia zawartości harmonicznych w przebiegu sinusoidalnym zdefiniowano współczynnik THD (Total Harmonic Distortion) jako stosunek wartości skutecznej wyższych harmonicznych sygnału, do wartości skutecznej składowej podstawowej:

$$(1) \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n X_k^2}}{X_1}$$

gdzie: X_1 - skuteczna wartość sygnału (napięcia (U)/prądu (I)) składowej podstawowej, X_k - skuteczna wartość sygnału (napięcia (U)/prądu (I)) k-tej harmonicznej.

W oparciu o powyżej zdefiniowany współczynnik określono dopuszczalną zawartość harmonicznych napięcia w sieci niskiego i średniego napięcia w Polsce – reguluje to Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [DzU nr 93 z 2007 r., poz. 623] i norma PN EN 50160 [8],[9].

Tab.1. Ogólne standardy dla zakłóceń harmonicznych napięcia wg IEEE-519-92 [10]

Klasa zastosowania	THDu (%)
Zastosowanie wrażliwe: Lotniska, Szpitale, Telekomunikacja	3%
Zastosowanie ogólne: Biura, Szkoły	5%
Zastosowanie lokalne: Fabryki	10%

W przypadku napięć trójfazowych niesymetrycznych należy współczynnik THD napięcia obliczać odrębnie dla każdej z faz [7]. Obliczona wartość współczynnika THD napięcia jest jednoznaczna, natomiast nie zawsze tak jest w przypadku THD prądu. Obliczana wartość THD prądu wyrażona w procentach może wprowadzać dezinformację, ponieważ istnieje nieliniowy związek pomiędzy wartością bezwzględną składowych harmonicznych, a procentem THD. Przykładowo przebieg o odształceniu 120% nie zawiera dwa razy więcej składowych harmonicznych niż przebieg o odształceniu 60%. Ta niedogodność może być rozwiązana przez odniesienie THD do podstawy maksymalnej wartości skutecznej prądu obciążenia mierzonego przez okres 15 minut. Wówczas THD oznaczane jest jako TDD i obliczane zgodnie z formułą:

$$(2) \quad TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_L} \cdot 100\%$$

gdzie: I_L - maksymalna wartość skuteczna prądu obciążenia zmierzona w okresie 15 minut;

W celu określenia wkładu poszczególnych harmonicznych zdefiniowano współczynnik udziału harmonicznych (prądu oraz napięcia), który obliczany jest zgodnie z formułą:

$$(3) \quad w_k = \frac{X_k}{X_1} \cdot 100\%$$

gdzie: X_k – wartość skuteczna harmonicznej rzędu k , $k = 2, 3, 4, \dots, n$; n – liczba uwzględnianych w analizie harmonicznych;

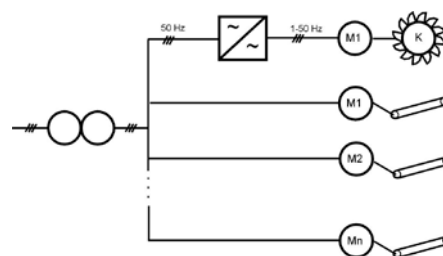
zgodnie z normą PN-EN 50160 $n=40$; X_1 – wartość skuteczna harmonicznej podstawowej.

Charakterystyka badanego obiektu oraz urządzeń pomiarowych

Pomiary zostały przeprowadzone w jednej z kopalń kruszywa na terenie województwa podkarpackiego przy pomocy wysokiej klasy analizatora parametrów sieci elektrycznej Skylab.

Opis badanego obiektu

Wybrany do pomiarów obiekt (kopalnia kruszywa) stanowi przykład zakładu wydobywczego w którym dokonano modernizacji elektrycznych układów napędowych. Kopalnia wykorzystuje wyłącznie napędy elektryczne indukcyjne, zasilana jest z sieci 15kV za pośrednictwem dedykowanego transformatora 15/0.4kV, z którego w układzie sieci promieniowej (rys.3) zasilane są poszczególne napędy maszyny wydobywczej i maszyn transportowych (taśmociągi). Modernizacji poddano układ napędzający element tnący koparki wydobywczej (oznaczony na rysunku 3 literą K). Istniejący silnik indukcyjny dotychczas zasilany za pośrednictwem przełącznika gwiazda trójkąt po modernizacji jest zasilany poprzez przemiennik częstotliwości, w skład którego wchodzi falownik Omron F7, o sterowaniu wektorowym. Zdecydowano się na modernizację tego właśnie napędu ze względu na zmienność obciążenia występującą w czasie wydobywania kruszywa oraz ze względu na znaczną moc silnika napędowego. Pozostałe napędy posiadają silniki indukcyjne o mniejszych mocach, a ich obciążenie ma charakter bardziej równomierny.



Rys. 3. Schematyczny rozkład urządzeń w kopalni kruszywa

Opis urządzenia pomiarowego

Wykorzystywany do pomiarów analizator jest nowoczesnym urządzeniem umożliwiającym nie tylko pomiar podstawowych wielkości elektrycznych takich jak napięcie i prąd w każdej z faz, ale posiada również funkcje oscyloskopu, rejestratora i analizatora harmonicznych. Urządzenie umożliwia automatyczną rejestrację w zadanym okresie czasowym (doba, tydzień, miesiąc) mierzonych wartości napięć i prądów oraz samodzielnie wyliczonych wartości mocy, współczynnika zawartości harmonicznych THD (Total Harmonic Distortion) wartości wybranych harmonicznych itp.

Wielkości mierzone przez miernik analizowane są metodą cyfrową: każdy sygnał wejściowy (napięcia i prądu) próbkowany jest 128 razy w każdym okresie (20ms dla częstotliwości 50 Hz). Częstotliwość modulowania wynosi 6400 Hz. Przejście między dziedziną czasu, a dziedziną częstotliwości obliczane jest za pomocą transformaty Fouriera - dzięki wykorzystaniu techniki mikroprocesorowej jest to możliwe w czasie kilku milisekund. Efektywność przyrządu zależy od częstotliwości pobierania próbek, z których odtwarzane są przebiegi przedstawiane jako ciągłe w czasie. W celu rejestracji danych należy analizatorowi zadać przedział czasu, zwany *czasem całkowania* (od 1

sekundy do 15 minut) – jego wielkość powinna zależeć od dynamiki mierzonych sygnałów. Po upływie tego czasu przyrząd wylicza ze spróbkowanych wartości następujące dane dla każdego parametru przechowywanego w pamięci:

- minimalną wartość parametru w całkowanym okresie,
- średnią wartość parametru (średnią arytmetyczną wszystkich wartości zapisanych w całkowanym okresie),
- maksymalną wartość parametru w całkowanym okresie.

Te trzy wartości są zapisywane do pamięci analizatora i następnie cały cykl się powtarza. Tak dzieje się dla każdego mierzonego sygnału. W przeprowadzonych pomiarach czas całkowania został ustawiony na 1 sekundę.

Wyniki pomiarów

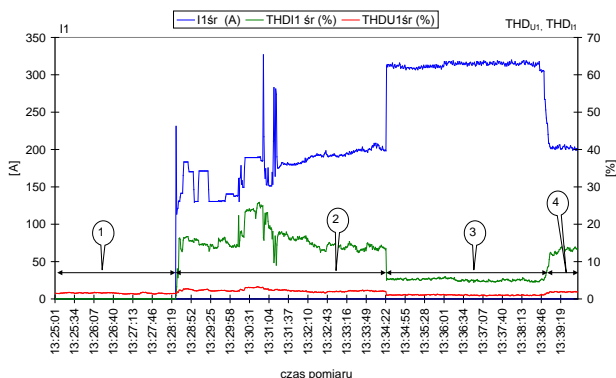
Pomiary wykonano w dwóch punktach zlokalizowanych na terenie kopalni:

- w rozdzielni głównej na szynach zasilających, po stronie niskiego napięcia,
- na zaciskach wejściowych przekształtnika AC/AC.

Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci przebiegów chwilowych napięć i prądów oraz wykresów obrazujących udział poszczególnych harmonicznych. Zaprezentowane na wykresach udziały poszczególnych harmonicznych w przebiegach prądów oraz napięć wyznaczono zgodnie z zależnością (3). Według tej zależności udział harmonicznych wyraża się w procentach w odniesieniu do harmonicznej podstawowej. Prowadzi to w oczywisty sposób do wniosku, iż współczynnik udziału pierwszej harmonicznej wynosi 100%. W celu zachowania czytelności prezentowanych wykresów – ze względu na niewielki udział wyższych harmonicznych – oś rzędnych ograniczono do poziomu kilku procent. Na wykresach obrazujących wkład poszczególnych harmonicznych przedstawiono również wartości współczynnika THD dla poszczególnych faz (trzy ostatnie słupki - po jednym dla każdej fazy). Wartości tego współczynnika obliczono zgodnie z formułą (1), w obliczeniach uwzględniono harmoniczne do 63 rzędu ($n=63$).

Pomiary w rozdzielni głównej

Pomiary w rozdzielni głównej wykonano dla różnych stanów pracy kopalni: przy włączonych i wyłączonych napędach elektrycznych maszyn roboczych. Rysunek 4 przedstawia zmiany wartości skutecznej prądu, współczynnika zawartości harmonicznych prądu oraz współczynnika zawartości harmonicznych napięcia w funkcji czasu, które zarejestrowano w rozdzielni głównej dla fazy pierwszej.

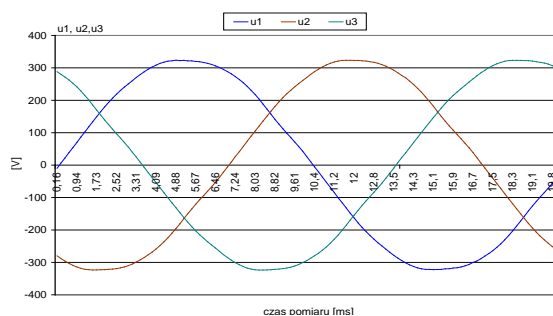


Rys. 4. Zmiany wartości skutecznej prądu, THD prądu oraz THD napięcia, zarejestrowane w rozdzielni głównej dla fazy pierwszej. 1 stan wyłączenia, 2- stan rozruchu, 3- stan pełnego obciążenia, 4- stan w którym ponownie zmniejszono obciążenie.

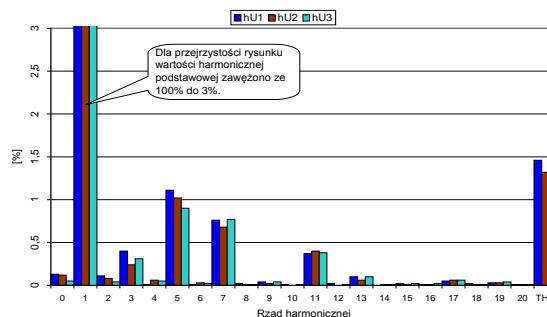
Można na nim wyróżnić cztery czasookresy związane ze zmianami stanów pracy napędów elektrycznych:

- stan wyłączenia - wszystkie odbiorniki wyłączone (1)
- stan rozruchu - stopniowo włączanie napędów kruszarki, koparki oraz taśmociągów (2),
- stan pracy normalnej – pracują wszystkie napędy zainstalowane w kopalni (3),
- stan pracy przejściowej – pracują tylko niektóre napędy (część jest wyłączona) (4)

W artykule opisano stan (1), (2) i (3). Wykonane dla tych stanów pracy pomiary pozwalają na ocenę wpływu pracujących maszyn na kształt przebiegu napięcia zasilającego poprzez analizę zawartości harmonicznych. W praktyce bardzo rzadko istnieje możliwość wykonania takich pomiarów, gdyż całkowite wyłączenie pracujących w przedsiębiorstwie napędów powoduje przerwę w produkcji, co z punktu widzenia ekonomiki jest niekorzystne.



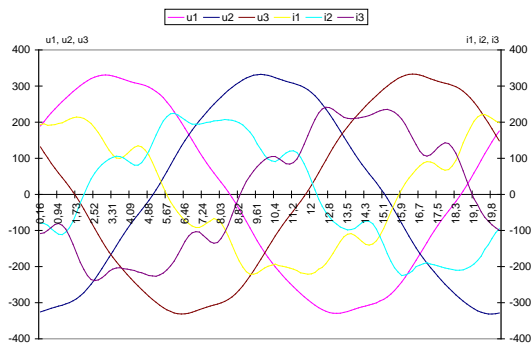
Rys. 5. Przebiegi napięć fazowych w stanie nie obciążonym.



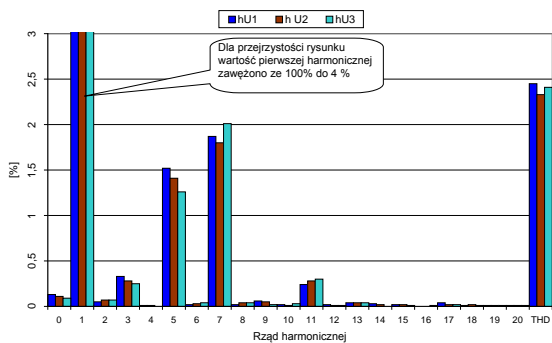
Rys. 5a. Analiza harmoniczna napięć przedstawionych na rys. 5

Na rysunku 5 przedstawione są przebiegi napięć fazowych (u_1 , u_2 , u_3) zmierzonych dla przypadku, gdy wszystkie odbiorniki zasilane z rozdzielni głównej zostały wyłączone. Wydaje się, że przebiegi nie zawierają lub zawierają bardzo nieznaczne wartości wyższych harmonicznych. W celu potwierdzenia tej hipotezy przeprowadzono analizę harmonicznych (rys. 5a). Zaobserwowano, że oprócz harmonicznej podstawowej (pierwszej) występują harmoniczne wyższych rzędów (trzecia, piąta, siódma, jedenasta) ale ich procentowy udział jest niewielki i maleje wraz ze wzrostem rzędu analizowanej harmonicznej. Z tego względu na wykresie pokazano jedynie harmoniczne do 20-tego rzędu, ale w obliczeniach współczynnika THD uwzględniono harmoniczne do 63-go rzędu. Procentowe wartości współczynnika THD dla poszczególnych faz są bardzo niewielkie i wynoszą 1,5%, 1,32% oraz 1,29%.

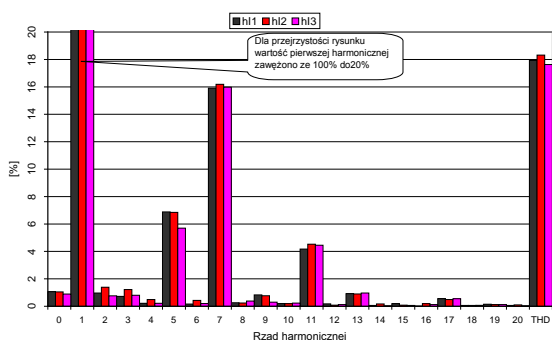
Rysunek 6 przedstawia przebiegi napięć i prądów dla przypadku gdy włączono przekształtnik oraz silniki napędzające koparkę i niezbędne taśmociągi (stan 2). Załączenie obciążenia wpłynęło na jakość napięcia zasilającego (rys. 6 oraz rys. 6a), gdyż współczynnik zawartości harmonicznych THD wzrósł o 1% i wynosi ok. 2,5%.



Rys. 6. Przebiegi napięć i prądów fazowych po włączeniu falownika i części urządzeń.



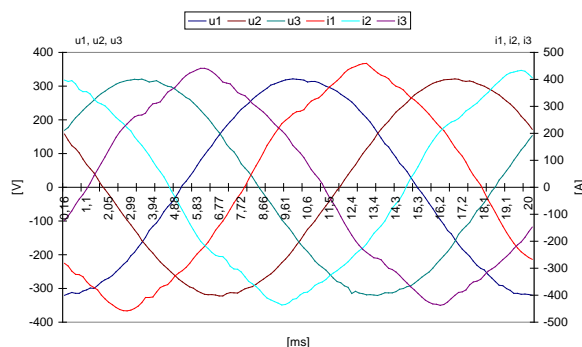
Rys. 6a. Analiza harmoniczna napięć przedstawionych na rysunku 6.



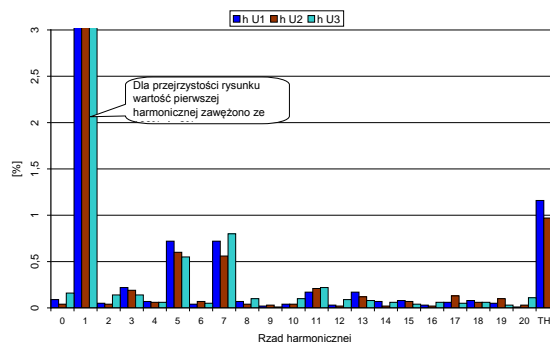
Rys. 6b. Analiza harmoniczna prądów przedstawionych na rysunku 6.

Z rysunku 6 widać, że prądy pobierane przez odbiorniki w czasie rozruchu są w znacznym stopniu odkształcone, a obliczone dla poszczególnych faz współczynniki THD wynoszą odpowiednio 17,9%, 18,3% i 17,6%. Przedstawiona na rysunku 6b analiza harmoniczna prądów pobieranych przez włączone odbiorniki pokazuje, że dominują harmoniczne piąta, siódma i jedenasta i właśnie one mają największy wpływ na odkształcenie napięcia. Potwierdza to analiza harmonicznych napięcia przedstawiona na rysunku 6a. Porównując ze sobą przedstawione na rysunku 5a i 6a udziały wyższych rzędów harmonicznych w napięciu zasilania widać, że zmienia się rząd harmonicznej dominującej. Dla stanu rozruchu (stan 2) harmoniczną dominującą staje się harmoniczna siódma, zamiast dominującej w stanie wyłączenia (stan 1) harmonicznej piątej. Nadal wyróżniającymi się harmonicznymi są harmoniczne piąta, siódma i jedenasta. Jednak wzrastają ich udziały w przebiegu napięcia (względne wartości). W konsekwencji wzrastają wartości współczynnika THD napięcia obliczone dla poszczególnych faz o około 1%. Co jest znacznym wzrostem w przypadku THD napięcia.

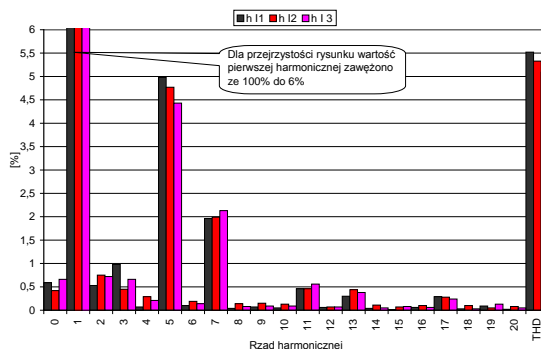
Należy zaznaczyć, że stan rozruchu nie oznacza jednoczesnego załączenia wszystkich napędów ale stopniowe ich załączanie.



Rys. 7. Przebiegi napięć i prądów fazowych po włączeniu wszystkich urządzeń.



Rys. 7a. Analiza harmoniczna napięć przedstawionych na rys. 7



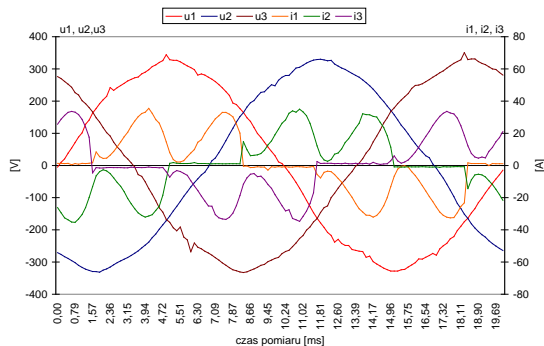
Rys. 7b. Analiza harmoniczna prądów przedstawionych na rys. 7

Kolejny etap badań obejmuje sytuację kiedy wszystkie odbiorniki obciążające rozdzielnie są załączone. Jest to stan pracy oznaczony na rysunku 4 cyfrą 3. Z analizy rysunku 4 wynika, że włączenie wszystkich odbiorników korzystnie wpływa na kształt napięcia. Wraz ze wzrostem prądu obciążenia maleje odkształcenie prądu i napięcia - zmniejsza się widoczna na rysunku wartość współczynnika THDU1 i THDI1. Zarejestrowane przebiegi napięć i prądów, dla opisywanego przypadku przedstawia rysunek 7. Napięcia fazowe zobrazowane na tym rysunku są w niewielkim stopniu odkształcone. Z przebiegu prądu możemy wnioskować, że dominującą harmoniczną jest harmoniczna piąta. To spostrzeżenie potwierdza przedstawione na rysunku 7b widmo harmonicznych prądu. Porównując je z widmem przedstawionym na rysunku 6b widzimy, że w rozważanym aktualnie przypadku znacznie zmniejszyła się wartość siódmej harmonicznej i wynosi ona obecnie 1,96; 1,99; 2,13% odpowiednio dla fazy pierwszej, drugiej i trzeciej.

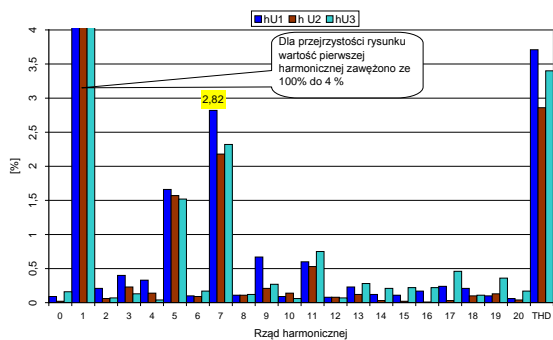
Zmalała również wartość piątej harmonicznej prądu. W konsekwencji zmniejszeniu uległy wartości współczynnika THD prądu i wynoszą 5,52; 5,33 i 5,06% odpowiednio dla fazy pierwszej drugiej i trzeciej. Nastąpiło więc około trzykrotne zmniejszenie wartości współczynnika THD prądu w porównaniu do wartości tego współczynnika w stanie rozruchu (rys. 6b). Następnym zmniejszenia odkształcenia prądu jest zmniejszenie odkształcenia napięcia. Wartości współczynnika THD napięcia są przedstawione na rysunku 7a i wynoszą: 1,16; 0,97 i 1,15% odpowiednio dla pierwszej, drugiej i trzeciej fazy. Dokładna analiza widma napięcia widoczna na rysunku 7a pozwala zauważyć, iż zmniejszeniu uległy wartości harmonicznych piątej, siódmej oraz jedenastej, ale minimalnie wzrosły wartości harmonicznych wyższych rzędów, to jest trzynastej, piętnastej, siedemnastej itd. Pojawienie się tych harmonicznych może być spowodowane załączeniem do sieci koparki zasilanej za pośrednictwem przekształtnika częstotliwości. Dlatego w następnej części artykułu zostaną przedstawione wyniki pomiarów przeprowadzone na zaciskach zasilających przekształtnik.

Pomiary na wejściu przekształtnika

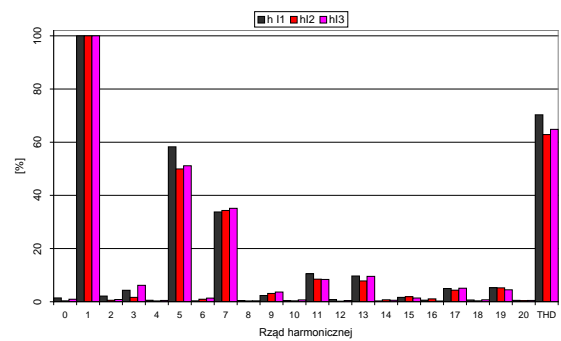
Kolejnym miejscem w którym dokonano rejestracji sygnałów elektrycznych w kopalni kruszywa była sterownia napędu koparki, gdzie wykonano pomiary na wejściu przemiennika częstotliwości. Wykonano pomiary analityczne jak w rozdziale głównej oraz przeprowadzono identyczną analizę. Główna różnica polega na tym, iż pomiary wykonane w punkcie poprzednim obejmowały sygnały ze wszystkich odbiorników, natomiast pomiary przedstawiane w niniejszym punkcie dotyczą tylko silnika koparki, zasilanego poprzez przemiennik częstotliwości – pozostałe napędy są poza obwodem pomiarowym. Wyniki pomiarów i analiz przedstawione są na kolejnych rysunkach.



Rys. 8. Przebiegi napięć fazowych zmierzone na zaciskach zasilających przekształtnik



Rys. 8a. Analiza harmoniczna napięć przedstawionych na rysunku 8

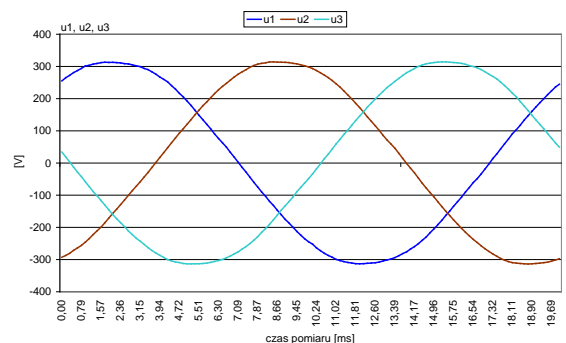


Rys. 8b. Analiza harmoniczna prądów przedstawionych na rysunku 8

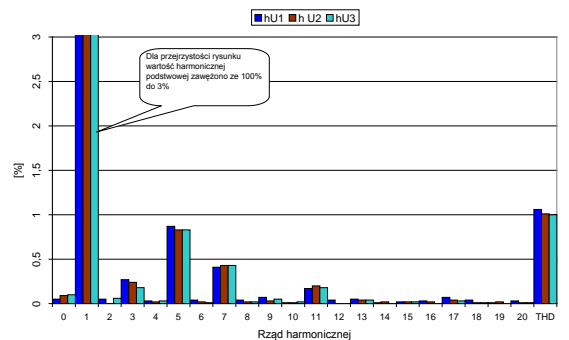
Rysunek 8 przedstawia przebiegi napięć i prądów zmierzone na zaciskach zasilających przekształtnika, analiza harmonicznych napięć przedstawiona jest na rysunku 8a, a prądów na rysunku 8b.

Zarejestrowane na zaciskach obciążonego przekształtnika przebiegi napięć są odkształcone. Obliczone dla tych napięć wartości współczynnika THD wynoszą: 2,82, 2,23, 2,34% odpowiednio dla fazy pierwszej drugiej i trzeciej. Z przedstawionego na rysunku 8a widma harmonicznych napięcia wynika, że oprócz harmonicznych dominujących takich jak piąta, siódma, jedenasta, pojawiają się harmoniczne wyższych rzędów. Jest to wynik wpływu na napięcie zasilające odkształconych prądów pobieranych przez przekształtnik.

Widmo harmonicznych prądu przedstawione jest na rysunku 8b. Wynika z niego, że dominują harmoniczne piąta i siódma, charakteryzujące się znacznymi wartościami względnymi. Na przykład dla prądu w fazie pierwszej wynoszą odpowiednio 58% i 33%. Znaczne wartości przyjmują również harmoniczne jedenasta, trzynasta, siedemnasta i dziewiętnasta. Przykładowo wartości względne dziewiętnastej harmonicznej prądu wynoszą: 5,26; 5,22 i 4,5% odpowiednio dla fazy pierwszej, drugiej i trzeciej.



Rys. 9. Przebiegi napięć fazowych na zaciskach przekształtnika gdy nie zasila on silnika (stan jałowy)



Rys. 9a. Analiza harmoniczna napięć przedstawionych na rys. 9

Kolejne pomiary wykonano dla przypadku, gdy nie pracował silnik koparki obciążający badany przemiennik częstotliwości, ale zaciski wejściowe przekształtnika były pod napięciem. Pracowały również pozostałe napędy i odbiorniki elektryczne zainstalowane w kopalni. Zarejestrowane przebiegi napięć zmierzone na zaciskach wejściowych przekształtnika pokazano na rysunku 9. Wynika z nich, że napięcia zasilające są w bardzo małym stopniu odkształcone.

Z przedstawionej na rysunku 9a analizy harmoniczných napięć wynika że w widmie dominują harmoniczne piąta, siódma i jedenasta, jednak ich względne wartości są bardzo małe. Znikome wartości mają również pozostałe harmoniczne - trzynasta, siedemnasta i dziewiętnasta, które miały znaczne wartości dla przypadku gdy przekształtnik pracował pod obciążeniem – rysunek 8a.

Posumowanie przeprowadzonych analiz

W celu sprawdzenia czy zmierzone wartości poszczególnych harmoniczných prądu nie przekraczają wartości dopuszczalnych przez normę IEEE 519-92, konieczne jest wyznaczenie stosunku wartości prądu zwarcia transformatora (I_z) do wartości maksymalnego prądu obciążenia (I_L). Prąd zwarcia obliczono uwzględniając:

- moc pozorną transformatora,
- napięcie zwarcia,
- przekładnię,
- straty w miedzi,
- impedancję kabla zasilającego.

Dla badanego transformatora wyniósł on $I_z = 13,7kA$. Zmierzony maksymalny prąd obciążenia wyniósł $I_L=315A$. Z normy IEEE 519-92 odczytano dopuszczalne limity dla nieparzystych harmoniczných prądu. Dla badanej kopalni wynoszą one: wartość $TDD = 12\%$, a dopuszczalne limity dla wartości harmoniczných prądu do 9 rzędu - 10%, dla harmoniczných od 17 do 22 rzędu - 4%. Pomiary przeprowadzone na wejściu przekształtnika pokazują, iż w tym obwodzie dopuszczalne normą wartości harmoniczných prądu zostały przekroczone. Pomiary w rozdzielni głównej (po stronie wtórnej transformatora) pokazują, iż dopuszczalne wartości harmoniczných prądu były przekraczane tylko w stanie rozruchu (stan 2 na rys. 4).

Wnioski

Obecnie bardzo często silniki elektryczne są zasilane za pośrednictwem przekształtników. Stosowanie układów napędowych z przekształtnikami niesie wiele korzyści, między innymi pozwalają one na płynną regulację prędkości obrotowej silnika oraz płynne dopasowanie jego mocy do aktualnych potrzeb. Jednak oprócz korzyści wynikających z ich stosowania, silnik elektryczny zasilany za pośrednictwem przekształtnika jest widziany od strony sieci jako odbiornik nieliniowy. Dzieje się tak dlatego, że przekształtnik pobiera odkształcony prąd.

Przykładowe przebiegi prądów pobieranych przez przekształtnik pokazano na rysunku 8 - przebiegi są odkształcone, co jest zjawiskiem typowym dla przekształtników stosowanych w przemyśle. W widmie harmoniczných prądów dominują głównie harmoniczne piąta, siódma, jedenasta, trzynasta, siedemnasta, dziewiętnasta. Wartości tych harmoniczných przekraczają dopuszczalne przez normę limity i mają decydujący wpływ na wartość współczynnika THD prądu (rys.8b).

Pobierane przez przekształtnik odkształcone prądy powodują odkształcenie napięcia (rys.8a). Instalując przekształtniki należy mieć na uwadze aby stosunek mocy przekształtnika do mocy zwarciowej był odpowiedni,

wówczas pracujący przekształtnik nie spowoduje odkształcenia napięcia na szynach w rozdzielni głównej.

Jeżeli moc odbiorników nieliniowych jest niewielka w porównaniu do mocy odbiorników o charakterze liniowym, nie będą one powodowały znaczącego odkształcenia napięcia zasilającego (rys.4., stan pracy (3)) Naruszenie tej zasady powoduje wzrost odkształcenia prądu oraz napięcia (rys.4, stan przejściowy (4)).

Szczególnie niekorzystny przypadek, zwłaszcza dla kopalni, to chwila rozruchu, czyli stopniowe włączanie koparek, kruszarek, sortowni i taśmociągów. W przypadku tego typu obiektów rozruch trwa od 8 do 10 minut. Wówczas prądy pobierane nawet przez odbiorniki liniowe mają przebiegi odkształcone (rysunek 6 i 6b). Konsekwencją tego jest odkształcenie napięcia zasilającego (rysunek 6 i 6a). Może to wpływać na prawidłową pracę innych odbiorników zainstalowanych w kopalni.

Norma IEEE-519 stawia bardzo restrykcyjne wymagania na zawartość harmoniczných oraz THD prądu. W rzeczywistych układach spełnienie stawianych przez nią wymogów jest praktycznie niemożliwe bez zastosowania dodatkowych układów filtrujących.

Piśmiennictwo

- [1] Hanzelka Z. Jakość energii w warunkach rynku energii, Biuletyn URE 5/2003
- [2] Hoevenaars T., LeDoux K., Colosino M., Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications, IEEE Paper No. PCIC-2003-15
- [3] Kaźmierkowski M., Tunia H., Automatic Control of Converter-fed Drives, Elsevier, Amsterdam-Warsow 1994
- [4] Orłowska-Kowalska T., Stan obecny i tendencje rozwojowe napędu elektrycznego, Przegląd Elektrotechniczny 80, (2004), nr 3, str. 185-197
- [5] Piróg S., Energoelektronika. Układy o komutacji sieciowej i komutacji twardej, UWND AGH, Kraków 2006
- [6] Szymański J. Harmoniczne prądu i napięcia w sieci zasilającej wprowadzane przez prostowniki wejściowe napędowych przemienników częstotliwości, elektro.info 9/2007
- [7] Turan Gönen, Electric Power Distribution System Engineering, CRC Press 2007
- [8] PN EN 50160 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych” PKN 1998
- [9] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [DzU nr 93 z 2007 r., poz. 623]
- [10] Standard IEEE 519-92

Autorzy: dr inż. Anna Koziarowska, Uniwersytet Rzeszowski, Instytut Techniki, al. Rejtana 16c, 35-959 Rzeszów, E-mail: akoziaro@unin.rzeszow.pl; dr inż. Kazimierz Kuryło, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Pola 2, E-mail: kkurylo@prz.edu.pl; 35-959 Rzeszów ; dr inż. Jacek Bartman, Uniwersytet Rzeszowski, Instytut Techniki, al. Rejtana 16c, 35-959 Rzeszów, E-mail: jbartman@unin.rzeszow.pl;