

Marek Gała, Kazimierz Jagieła, Marian Kępiński, Janusz Rak
Politechnika Częstochowska, Częstochowa

ODDZIAŁYWANIE DUŻYCH NAPĘDÓW PRZEKSZTAŁNIKOWYCH PRĄDU STAŁEGO NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH

INFLUENCE OF HIGH POWER DC CONVERTER DRIVES ON OPERATING PARAMETERS OF INDUCTION MACHINES

Abstract: In the paper we determined the content of higher harmonics in medium voltage supplying power units of hoisting machines on the basis of measured voltage and current signals. Next a procedure for calculation of voltage harmonic factor HVF is presented as well as its influence on real efficiency of induction motors fed from the same voltage source. There are also presented results that make possible calculation of the HVF factor with respect to load factor and applied reactive power compensation as well as higher harmonics filters.

1. Wstęp

Energia elektryczna stanowi produkt, w stosunku do którego stosowane są kryteria ilościowe jak również jakościowe. Jakość energii elektrycznej charakteryzowana jest za pomocą określonych wielkości i wskaźników, do których zaliczyć należy przede wszystkim:

- częstotliwość napięcia i jej odchylenie od wartości znamionowej,
- wartość napięcia i jej odchylenie od wartości znamionowej,
- współczynniki niesinusoidalności napięcia i prądu z określeniem widma zawartości wyższych harmonicznnych,
- wskaźniki wahań napięcia,
- współczynniki asymetrii napięcia i prądu.

Pojawianie się zjawiska asymetrii napięcia oraz odkształcenia napięcia od przebiegu sinusoidalnego wpływa negatywnie nie tylko na jakość pobieranej energii [10,13], ale także na straty mocy oraz energii w urządzeniach i instalacjach zasilanych ze źródeł o odkształconym napięciu. Wyższe harmoniczne napięć i prądów powodują dodatkowe straty mocy wpływając na obniżenie parametrów znamionowych dla silników asynchronicznych, transformatorów i kondensatorów [3,4,15,18]. W polskiej literaturze niewiele jest publikacji poświęconych opisowi wpływu asymetrii i odkształcenia napięcia na parametry znamionowe maszyn asynchronicznych. Natomiast norma amerykańska [15] oraz odpowiednie dyrektywy unijne [4] a także publikacje [3,19] określają współczynnik harmonicznnych napięcia HVF wpływający na parametry eksploatacyjne maszyn asynchronicznych

klatkowych. W definicji współczynnika HVF istnieją rozbieżności polegające na sumowaniu rzędów harmonicznnych od 2. do 13. [4] lub do 40., ewentualnie od 5. do ∞ [3,15,18]. Zakres sumy rzędów harmonicznnych w definicji nie ma istotnego wpływu na efekt końcowy, gdyż zazwyczaj harmoniczne powyżej trzydziestego rzędu są mało znaczące i nie wpływają na końcowy rezultat obliczeń. W artykule przedstawiono zespół odbiorników dużej mocy złożony z napędów przekształtnikowych prądu stałego maszyn wyciągowych, układu kompensacji mocy biernej i filtrów biernych LC. Urządzenia te zasilane są z rozdzielni średniego napięcia stanowiącej węzeł w przemysłowej sieci rozdzielczej, z której zasilane mogą być silniki asynchroniczne wentylatorów i pomp. Z punktu widzenia uzyskania nominalnych parametrów dla silników asynchronicznych znajomość odkształcenia napięcia i jego asymetrii jest bardzo istotna, gdyż pozwala na oszacowanie wydajności energetycznej pozostałych górniczych urządzeń napędowych zasilanych z sieci przemysłowej.

2. Współczynnik harmonicznnych napięcia HVF i rzeczywista sprawność η_h

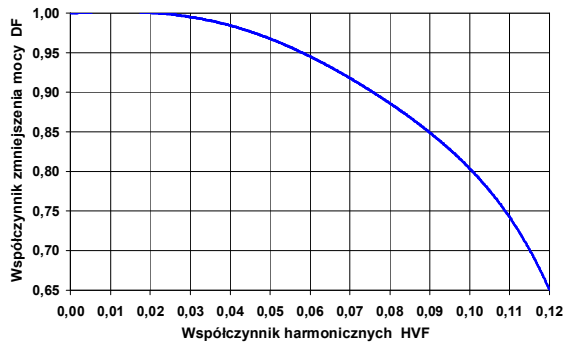
Współczynnik harmonicznnych napięcia HVF definiowany jest zgodnie z zależnością (1), przy czym zakres sumowania do rzędu harmonicznnych N, jest różnie określany w literaturze.

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=k}^N \frac{V_n^2}{n}} \quad (1)$$

gdzie:

n – rząd harmonicznej napięcia należący do zbioru $N \in \{2, 13\}$ [4], lub $N \in \{5, \infty\}$ według [3,15,18], V_n – względna wartość n -tej harmonicznej napięcia w stosunku do harmonicznej podstawowej.

Norma amerykańska [15] podaje w formie graficznej (jak na rysunku 1), dla silników asynchronicznych niskiego i średniego napięcia, zależność współczynnika obniżenia mocy znamionowych DF w funkcji wskaźnika HVF.



Rys. 1. Zależność współczynnika obniżenia mocy znamionowej DF silnika asynchronicznego w funkcji wskaźnika HVF [3,15,18]

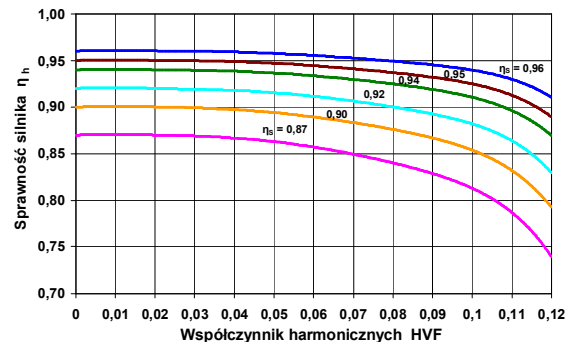
Z powyższego wykresu wynika, iż dopuszczalna granica wartości współczynnika HVF nie powinna przekraczać 3%, co można zapisać:

$$\text{HVF}_{\text{dop}} \leq 0,03 \quad (2)$$

aczkolwiek w literaturze [4] wartość ta przyjmowana jest na poziomie 0,02. Obniżenie wartości nominalnych parametrów silników indukcyjnych wiąże się ze zmniejszeniem rzeczywistej sprawności silnika w odniesieniu do sprawności η_s określonej przez wytwórców dla sinusoidalnego napięcia zasilania. Rzeczywista sprawność silnika asynchronicznego η_h przy napięciu odkształconym wyliczana jest z zależności (3) [18]:

$$\eta_h = \frac{DF^2}{1/\eta_s + DF^2 - 1} \quad (3)$$

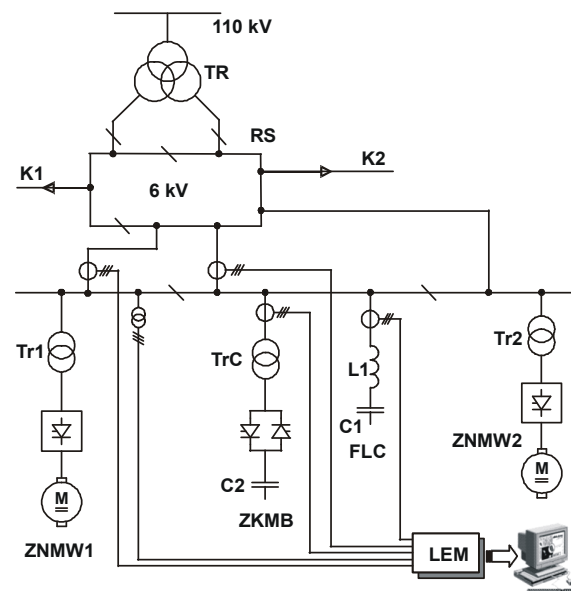
Przykładowo na rysunku 2 przedstawiono rodzinę charakterystyk zmian rzeczywistej wartości sprawności silników asynchronicznych klatkowych średniego napięcia produkcji EMIT Żychlin [20] przeznaczonych do napędów górniczych. Wartości sprawności katalogowych η_s dotyczyły różnych maszyn od wolnoobrotowych ($\eta_s = 0,87$) do wysokoobrotowych, dla których $\eta_s = 0,96$.



Rys. 2. Zależność zmian rzeczywistej sprawności η_h w funkcji współczynnika HVF dla silników asynchronicznych średniego napięcia

3. Topografia układu zasilania oraz metoda pomiaru wielkości elektrycznych i wskaźników jakości pobieranej energii

Do określenia wpływu odkształcenia napięcia zasilania na parametry energetyczne silników asynchronicznych posłużyła analiza jakości średniego napięcia rozdzielni RS zasilającej napędy przekształtnikowe prądu stałego maszyn wyciągowych pracujące w układzie rewersyjnych mostków tyrystorowych typu 6T. Z poziomu rozdzielni silnikowej RS (rys. 3) zasilane są poprzez połączenia kablowe K1/K2 inne urządzenia, w tym silniki asynchroniczne klatkowe średniego i niskiego napięcia.



Rys. 3. Uproszczony schemat rozdzielni maszyn wyciągowych RS wraz z układem pomiarowym. ZNMW1, ZNMW2 – zespoły napędowe maszyn wyciągowych, FLC – filtr bierny LC, ZKMB – zespoły kompensacji mocy biernej

W prezentowanej rozdzielni silnikowej RS wyodrębnione są pola układu kompensacji mocy biernej, w postaci bezstykowych łączników tyrystorowych baterii kondensatorów C_2 wraz z transformatorami TrC (6 kV/0,4 kV) oraz pole zasilania biernego filtru wyższych harmonicznym – układ szeregowy L_1C_1 o częstotliwości rezonansowej $f_R \approx 5f_1$. Określenie stopnia odkształcenia napięć oraz prądów w poszczególnych gałęziach rozdzielni przeprowadzono w układzie jak na rysunku 3 z przetwornikami pomiarowymi włączonymi w zaznaczonych punktach instalacji. Do pomiaru i rejestracji wartości chwilowych poszczególnych napięć i prądów użyto komputera PC wyposażonego w kartę pomiarową A/C oraz przetworników napięcia i prądu typu LEM. Pomiary realizowano jednocześnie w zaznaczonych miejscach rozdzielni na poziomie średniego napięcia dla kilku cykli pracy maszyn wyciągowych oraz stanu załączenia lub wyłączenia filtrów LC i układu kompensacji mocy biernej ZKMB (rys. 3). Notebook współpracujący poprzez szybki interfejs USB 2.0 z kartą pomiarową oraz oprogramowaniem aplikacyjnym DASYLab umożliwiał rejestrację i przetwarzanie piętnastu sygnałów (trzech napięć międzyfazowych i dwunastu prądów) uzyskanych z obwodów wtórnych przekładników pomiarowych. Częstotliwość próbkowania karty pomiarowej wynosiła 10 kHz na kanał przetwarzania, a maksymalne napięcie wejściowe - $\pm 5V$. Jedną z głównych zalet komputerowej rejestracji sygnałów jest możliwość dalszej cyfrowej analizy przebiegów poprzez zastosowanie metod statystycznych oraz szybkiej transformaty Fouriera FFT w celu określenia jakości parametrów pobieranej energii. Wszystkie obliczenia numeryczne były prowadzone w pakiecie MATLAB za pomocą odpowiedniego programu wykorzystującego dane pomiarowe z plików DASYLab zapisanych w formacie tekstowym. Do obliczeń numerycznych wykorzystano znane z literatury zależności na wartości mocy [1,14,17]:

- czynnej wyliczonej według relacji:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (4)$$

- pozornej dla przebiegów niesinusoidalnych:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} \quad (5)$$

- biernej, zgodnie z teorią C. J. Budeanu [1,17] dla przebiegów niesinusoidalnych:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n \quad (6)$$

Zarejestrowane w odpowiednich cyklach pracy napędów tyrystorowych i zespołów kompensacyjnych, sygnały pomiarowe napięć i prądów w poszczególnych torach instalacji zasilania maszyn wyciągowych, przetworzono z wykorzystaniem pakietu DASYLab do formatu tekstowego. Następnie obliczono za pomocą procedur programu MATLAB chwilowe wartości poboru mocy czynnej, biernej i pozornej uwzględniając ich zmienność w czasie. Równolegle zarejestrowane przebiegi czasowe napięć i prądów zostały przetworzone za pomocą szybkiej transformaty Fouriera FFT [11,12,14] do postaci widm harmonicznym, które posłużyły do określenia współczynników THD napięcia i prądu oraz współczynnika harmonicznym napięcia HVF (1). Współczynniki zawartości harmonicznym napięcia THD_U i prądu THD_I określane są jako:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N=\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (7)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N=\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (8)$$

gdzie: U_1 , I_1 – wartość skuteczna pierwszej (podstawowej) harmonicznym przebiegu, U_n , I_n – wartość skuteczna n-tej harmonicznym napięcia względnie prądu: w praktyce $N = 40$ [5,9,19].

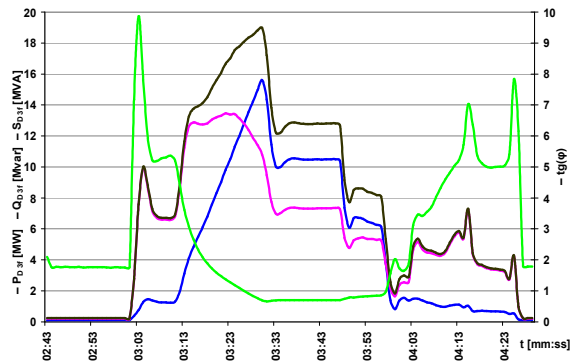
Prezentowane procedury obliczeniowe, według zależności od (4) do (8) oraz (1), były prowadzone w pakiecie MATLAB, a następnie wynikiowo zestawione w arkuszu kalkulacyjnym EXCEL.

4. Wyniki pomiarów i obliczeń komputerowych

Zarejestrowane i przetworzone wyniki pomiarów dotyczyły stanów pracy maszyn wyciągowych przy załączonym lub wyłączonym filtrze piątej harmonicznym oraz aktywnym bądź wyłączonym układzie kompensacji mocy biernej.

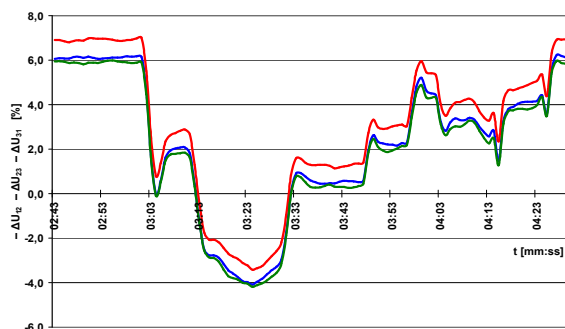
Na potrzeby analizy wpływu pracy zespołów napędowych dużej mocy na warunki pracy silników asynchronicznych zasilanych z tego sa-

mego źródła przedstawiono na rysunku 4 wykres poboru mocy P , Q , S oraz $\text{tg } \varphi$ przy wyłączonych obwodach kompensacji mocy biernej i filtra LC.

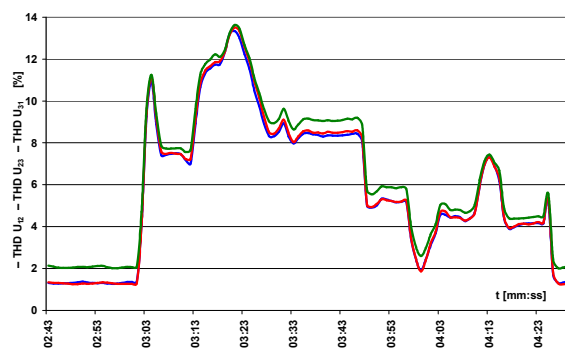


Rys. 4. Histogram poboru mocy czynnej P , biernej Q i pozornej S oraz $\text{tg } \varphi$ na dopływie rozdzielni maszyn wyciągowych przy wyłączonej kompensacji i filtrach wh

Dla stanów pracy zespołów napędowych określonych jak na rysunku 4, na kolejnym rysunku 5 zilustrowano zmiany wartości odchyłek napięć międzyprzewodowych na szynach rozdzielni średniego napięcia RS.

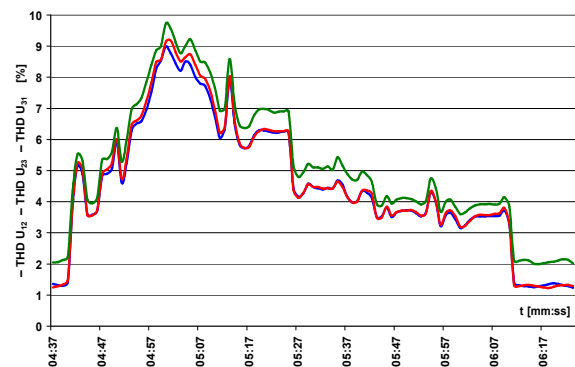


Rys. 5. Odchyłki napięć międzyprzewodowych ΔU_{12} , ΔU_{23} , ΔU_{31} w rozdzielni RS przy wyłączonej kompensacji i filtrach wh



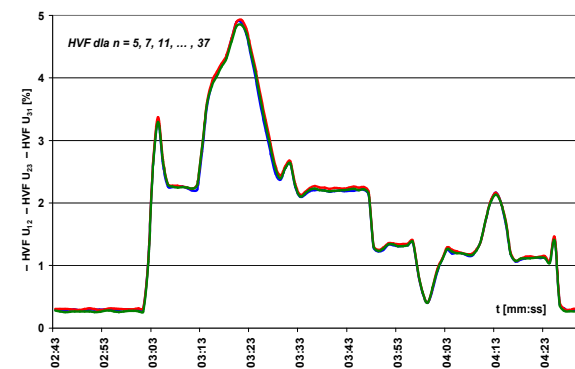
Rys. 6. Średnie wartości wskaźników $THD U_{12}$, $THD U_{23}$, $THD U_{31}$ napięć międzyfazowych na szynach rozdzielni maszyn wyciągowych przy wyłączonej kompensacji i filtrach wh

Jak już wcześniej wspomniano w celu wyznaczenia wartości skutecznych napięć dla poszczególnych rzędów harmonicznych zastosowano algorytm szybkiej transformaty Fouriera FFT. Procedura FFT pozwala pośrednio na uzyskanie wyników średnich wartości THD_U (7) oraz HVF (1) dla określonych warunków i czasu pracy urządzeń zlokalizowanych w rozdzielni RS (rys. 3). Średnie wartości wskaźników THD_U dla napięć w rozdzielni silnikowej RS przedstawione zostały na rysunkach 6 i 7.

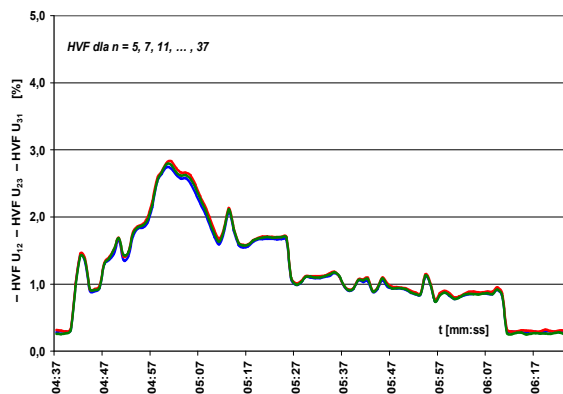


Rys. 7. Średnie wartości wskaźników $THD U_{12}$, $THD U_{23}$, $THD U_{31}$ napięć międzyfazowych na szynach rozdzielni maszyn wyciągowych przy włączonych filtrach wh i wyłączonej kompensacji mocy biernej

Wykorzystując rozkłady widma harmonicznych napięć międzyprzewodowych dla wybranych warunków pracy instalacji zasilania napędów maszyn wyciągowych, obliczono współczynniki HVF dla różnych rzędów N (1). Wyniki zmian wskaźnika HVF w funkcji czasu przedstawiono na kolejnych dwóch rysunkach 8 i 9.

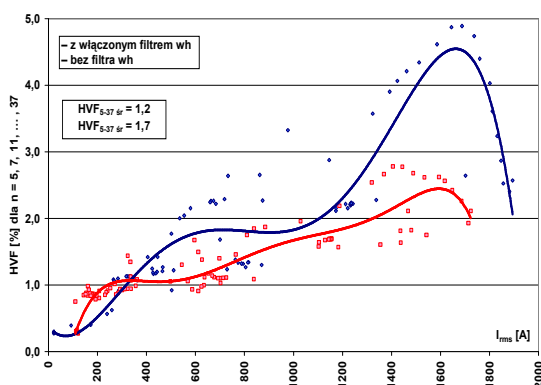


Rys. 8. Średnie wartości wskaźników $HVF U_{12}$, $HVF U_{23}$, $HVF U_{31}$ napięć międzyfazowych na szynach rozdzielni maszyn wyciągowych przy wyłączonej kompensacji i filtrach wh



Rys. 9. Średnie wartości wskaźników HVF U_{12} , U_{23} , U_{31} napięć międzyfazowych na szynach rozdzielni maszyn wyciągowych przy włączonych filtrach wh i wyłączonej kompensacji mocy biernej

Współczynnik HVF dla napięcia w rozdzielni RS zależy od wartości prądu na dopływie do tej rozdzielni. Prąd ten odzwierciedla dynamiczne stany pracy napędów przekształtnikowych maszyn wyciągowych z obciążeniem wnoszonym przez obwody kompensacji mocy biernej oraz filtr wh. Wykres na rysunku 10 jest graficznym obrazem zmian HVF w funkcji prądu dopływu do rozdzielni zasilającej maszyny wyciągowe. Z przebiegu zmian współczynnika HVF wynika, iż najbardziej niekorzystny wpływ na pozostałe silniki indukcyjne występuje wówczas, gdy pracują jednocześnie dwa napędy maszyn wyciągowych przy całkowicie wyłączonych filtrach wh i kompensacji mocy biernej. Dla tego przypadku rzeczywista sprawność silników asynchronicznych zostaje pomniejszona o ok. 1,5 – 2%.



Rys. 10. Średnie wartości wskaźnika HVF napięć międzyfazowych w funkcji prądu dopływów rozdzielni maszyn wyciągowych dla opcji zał/wył filtra wh i kompensacji mocy biernej

5. Uwagi i wnioski

Asymetria, odchyłki napięć oraz wskaźniki zawartości wyższych harmonicznych są parametrami charakteryzującymi jakość energii elektrycznej i w związku z tym zakres dopuszczalnych zmian ich wartości jest definiowany odpowiednimi normami i rozporządzeniami [2,5,6,7,19]. W Polsce nie opracowano odpowiednich norm określających negatywny wpływ napięć odkształconych na parametry silników asynchronicznych. Niemniej wiele firm posiłkuje się normą amerykańską [15], która w sposób ilościowy określa straty powstałe w maszynach indukcyjnych, transformatorach i kondensatorach zasilanych napięciem odkształconym. Choć istnieją rozbieżności definicyjne wskaźnika HVF dotyczące uwzględniania zakresu rzędu harmonicznych napięcia, to na podstawie przeprowadzonych pomiarów i analiz obliczeniowych można stwierdzić, że pominięcie harmonicznych powyżej czterdziestego rzędu nie ma istotnego wpływu na wartość HVF, a w konsekwencji rzeczywista sprawność silnika η_h zasilanego napięciem odkształconym. Przy obliczaniu współczynnika HVF pominięto krotności trzeciej harmonicznej z uwagi na stosowane w praktyce układy połączeń uzwojeń (Δ) silników asynchronicznych średniego napięcia. Z przedstawionego trendu zmian wskaźnika HVF (rys. 10) w funkcji prądu dopływu do rozdzielni RS napędów maszyn wyciągowych wynika, że pomimo zastosowania filtrów wyższych harmonicznych i kompensacji mocy biernej, przy jednoczesnej pracy maszyn wyciągowych zostaje przekroczona dopuszczalna wartość współczynnika harmonicznych napięcia, co niekorzystnie wpływa, poprzez zwiększenie strat, na obniżenie sprawności silników asynchronicznych klatkowych zasilanych z tej samej sieci przemysłowej. Należy zaznaczyć, że współczynnik HVF zależy także od wartości mocy zwarcia w punkcie wspólnego przyłączenia do sieci elektroenergetycznej, która to w analizowanym przypadku wynosiła ok. 3,1 GVA. Ewentualne zmiany konfiguracji sieci powodujące obniżenie mocy zwarcia wpłyną będą niekorzystnie na parametry silników asynchronicznych.

Aby to zjawisko ograniczyć lub wyeliminować należy dążyć do wydzielenia rozdzielni silnikowych z przekształtnikami jako niezależne autonomiczne źródła zasilania.

6. Załącznik

Parametry elektryczne urządzeń rozdzielni RS:

1. Silniki maszyn wyciągowych: $P = 3,4$ MW;
 $U = 650$ V; $I = 5640$ A; $n = 70$ obr/min
2. Transformator TR: 32/16/16 MVA;
 $U_1/U_2 = 110$ kV/6 kV
3. Transformatory Tr1 Tr2: 4 x 2 MVA;
 $U_1/U_2 = 6$ kV/0,5 kV
4. Transformatory TrC: 9 x 1 MVA;
 $U_1/U_2 = 6,3$ kV/525 V
5. Kondensatory C_2 : 9 x 0,9 Mvar
6. Kondensatory C_1 : 1,8 Mvar
7. Dławik L_1 : 4,14 mH/fazę
8. Moc zwarcia na szynach rozdzielni RS 6 kV:
 $S_{zw} \approx 180$ MVA.

7. Literatura

- [1]. Czarnecki L.S.: *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [2]. EN 50160: *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*
- [3]. Farmani I., Arefi A., Bagheri R., Oraee H.: *Industrial Electric Motor Energy Efficiency Under Testing and Practical Conditions* <http://library.iraneenergy.org.ir/> [09.03.2007]
- [4]. *Filtracja i detekcja harmoniczných*. Schneider Electric
- [5]. Hanzelka Z., Kowalski Z.: *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) i jakość energii elektrycznej w dokumentach normalizacyjnych*, Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej t. 5 z. 1 - 1999 s. 93 - 108, Komitet Elektrotechniki PAN
- [6]. IEC 61000-2-2 - *Electromagnetic compatibility (EMC), Part 2: Environment - Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems*
- [7]. IEC 61000-2-4 - *Electromagnetic compatibility (EMC), Part 2: Environment - Section 4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*
- [8]. IEC 61000-4-30 - *Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques - Section 30: Power Quality Measurement Methods*
- [9]. IEC 61000-4-7 - *Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques - Section 7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*
- [10]. Jagieła K., Gała M.: *Nomograficzna metoda wyznaczania współczynnika asymetrii w trójfazo-*

wych sieciach elektroenergetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, Rok 80 Nr 1/2004, s. 21-26

- [11]. Jagieła K., Rak J., Kępiński M.: *Jakość energii elektrycznej pobieranej przez duże napędy*. Napędy i sterowanie Nr 10/2000, s. 15-19
- [12]. Jagieła K., Rak J., Kępiński M.: *Wskaźniki THD dla tyrystorowego układu napędowego maszyny wyciągowej*. Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa Nr 6 (355)/2000 s. 9-13
- [13]. Kowalski Z.: *Asymetria w układach elektroenergetycznych*, PWN Warszawa 1987
- [14]. Kuśmierk Z.: *Pomiary mocy i energii w układach elektroenergetycznych*. WNT Warszawa 1994
- [15]. NEMA Standardars Publications Information Guide for General Purpose Industrial AC Small and Medium Squirrel-Cage Induction Motor Standards. Publ.: National Electrical Manufacturers Association 1300 North 17th Street, Suite 1847 Rosslyn, Virginia 22209
- [16]. Pierrat L, Meyer J. P.: *Unbalance factor it is as simple as ABC*, Revue Générale de l'Électricité, No 6, June 1987
- [17]. Piróg S.: *Negatywne oddziaływanie układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia*. Energoelektronika. Wyd. AGH Kraków, 1998
- [18]. Quispe E., Gonzalez G., Aguado J.: *Influence of Unbalanced and Waveform Voltage on the Performance Characteristics of Three-phase Induction Motors*. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Barcelona, 31 March, 1, 2 April, 2004*
- [19]. *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów*
- [20]. www.emit-motor.com.pl [09.03.2007]