

Zygmunt SZYMAŃSKI, Brunon MAREK
Politechnika Śląska, Gliwice

ANALIZA KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ UKŁADÓW ZASILANIA MASZYN GÓRNICZYCH ZASILANYCH Z UKŁADÓW PRZEKSZTAŁNIKOWYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono konsekwencje zastosowania układów przekształtnikowych w napędach maszyn górniczych oraz ich wpływ na jakość energii w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych. Do ograniczania zawartości wyższych harmonicznych w prądach i w napięciach zasilania układów przekształtnikowych stosowane są przeważnie statyczne filtry pojemnościowe. W referacie zaproponowano wykorzystanie filtrów aktywnych lub hybrydowych do kompensacji wyższych harmonicznych w sieciach kopalnianych. W referacie zamieszczono analizę kompatybilności elektromagnetycznej układów zasilania maszyn górniczych zasilanych z układów przekształtnikowych. W pracy przedstawiono wybrane wyniki symulacji komputerowych, przeprowadzonych dla wybranej konfiguracji kopalnianej sieci energetycznej, zasilającej układy maszyn górniczych.

ANALYSIS ELECTROMAGNETIC COMPABILITY OF MINING MACHINES SUPPLY SYSTEM SUPPLYING WITH CONVERTERS SYSTEMS

Summary. The paper presents consequences of application converters systems in mining machines drive systems, and their influences on energy quality in mining electro energetic sets. For limitation of contents high harmonics in supply current and supply voltage of converters systems, static capacity filters are used. The paper presents an application of actives filters and hybrid filters for compensation of high harmonics in mining sets. Analysis of electromagnetic compability, of mining machine supply systems, supplied for converters system is presented in the paper. The paper presents also selected results of computer simulation, performed for selected configuration mining energetic set, supplied of mining machines systems.

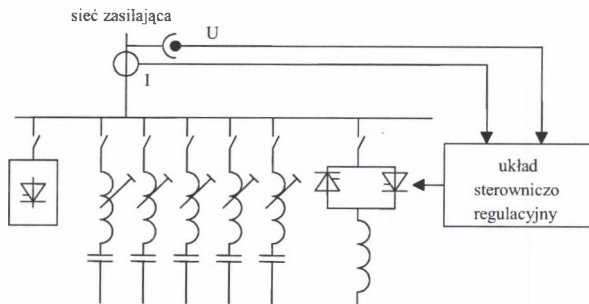
1. Wprowadzenie

W polskich kopalniach węgla kamiennego stosuje się systemy eksploatacji oparte na wysokiej koncentracji wydobywania. Wymaga to zastosowania wydajnych maszyn urabiających oraz niezawodnych systemów transportowych: transportu poziomego oraz transportu pionowego. Na głównych szybach wydobywczych stosowane są przede wszystkim maszyny wyciągowe napędzane silnikami obcowzbudnymi prądu stałego zasilane z układów prostownikowych, oraz w ograniczonym zakresie maszyny wyciągowe napędzane silnikami indukcyjnymi pierścieniowymi lub synchronicznymi, zasilane z przemienników częstotliwości (kaskada podsynchroniczna, cyklokonwertor, silnik zintegrowany) [1, 4, 7, 8]. Moce silników napędowych maszyn wyciągowych osiągają poziom (1000-6000) kW. Maszyny wyciągowe są zasilane z sieci średniego napięcia przez transformatory obniżające, przy mocach zwarciovych sieci nie przekraczając 300MVA. Konsekwencją tego są duże spadki napięć w sieciach zasilających, oraz znaczny pobór prądu z sieci zasilającej dochodzący do 1000A. W układach zasilania maszyn transportu poziomego stosowane są zasilacze przekształtnikowe oraz układy łagodnego rozruchu, natomiast w układach napędowych wentylatorów stosowane są kaskady podsynchroniczne. [2, 3, 4]. Negatywnym skutkiem wprowadzenia układów przekształtnikowych do układów zasilania maszyn górniczych jest: zwiększenie stopnia deformacji napięcia i prądu zasilania (generowanie wyższych harmonicznych), duże wahania napięcia sieci zasilającej w stanach dynamicznych systemu, załamania komutacyjne napięcia zasilającego, wzajemne oddziaływanie układów zasilania maszyn górniczych, obniżona wartość współczynnika mocy ($\cos\varphi\approx 0,55-0,60$) [2, 3, 4]. W celu ograniczenia negatywnych skutków oddziaływania układów przekształtnikowych na sieć zasilającą należy: zwiększyć moc zwarciovą sieci, zastosować filtry wyższych harmonicznych (statyczne lub dynamiczne), zastosować racjonalne sterowanie układami sterowania maszyn górniczych dla ograniczenia ich wzajemnej interakcji, oraz zastosować układy kompensacji automatycznej mocy biernej [2, 3, 4, 5]. W referacie zamieszczono analizę kompatybilności elektromagnetycznej układów zasilania maszyn górniczych zasilanych z układów przekształtnikowych pod kątem ich wzajemnej interakcji. W pracy przedstawiono wybrane wyniki symulacji komputerowych, przeprowadzonych dla wybranej konfiguracji kopalnianej sieci energetycznej, zasilającej układy maszyn górniczych.

2. Oddziaływanie układów przekształtnikowych na górnictwą sieć zasilającą

W polskich kopalniach węgla kamiennego wzrasta liczba napędów maszyn górniczych zasilanych z układów przekształtnikowych. Są to przede wszystkim: układy napędowe maszyn wyciągowych, napędy maszyn transportowych (przenośniki taśmowe, przenośniki łańcuchowe), napędy maszyn przepływowych (wentylatory). Negatywnym skutkiem wzrostu mocy znamionowej zasilaczy przekształtnikowych zasilanych z sieci kopalnianej jest: zwiększenie poboru mocy biernej przez przekształtniki statyczne, generowanie wyższych harmoniczných prądu i napięcia w sieciach zasilających, występowanie komutacyjnych spadków napięcia oraz pojawienie się zakłóceń elektromagnetycznych wpływających na pracę układów sterowania oraz systemów transmisji sygnałów. Dopuszczalne wartości poziomów zakłóceń są narzucone przez obowiązujące przepisy energetyczne [4, 7]: wielkość załamania komutacyjnego sinusoidy napięcia zasilającego (w sieciach średniego napięcia) nie powinna przekraczać 20% napięcia zasilania, stopień deformacji sinusoidy napięcia zasilającego nie może przekroczyć ($THD < 5\%$), wielkość wahań napięcia przy udarach mocy biernej nie może przekroczyć $< 0,03U_{1n}$, zakłócenia radioelektryczne emitowane przez zasilacze przekształtnikowe nie powinny zakłócać prawidłowej pracy innych urządzeń. Spadki napięcia w sieci zasilającej spowodowane udarami mocy biernej można ograniczyć stosując nadążną kompensację mocy biernej lub ograniczając pobór mocy biernej przez sterowanie sekwencyjne prostownika. Stopień załamania komutacyjnego napięcia zasilania można ograniczyć przez zastosowanie dodatkowych dławików sieciowych lub zmieniając przesunięcia godzinowe na stronach wtórnych transformatorów zasilających (układ H). Poziom wyższych harmoniczných w górniczych sieciach energetycznych można ograniczyć stosując filtry wyższych harmoniczných prądu oraz napięcia. W górniczych sieciach energetycznych stosuje się przede wszystkim różne kombinacje rezonansowych filtrów LC (szeregowe lub równoległe połączenie pojemności oraz indukcyjności), dostrojonych do poszczególnych harmoniczných (5h, 7h, 11h, 13h) odkształconego napięcia. Filtry statyczne LC są załączane w sposób indywidualny lub grupowy przez układy odłączników liniowych wyposażonych w blokady uniemożliwiające pracę filtrów wyższych harmoniczných przy odłączonych filtrach niższego rzędu. Na rys.1 przedstawiono schemat grupowego załączania statycznych filtrów rezonansowych LC. Do ograniczenia poziomu pola elektromagnetycznego emitowanego przez układy sterowania zasilaczy przekształtnikowych należy zastosować specjalne ekrany magnetyczne, filtry aktywne, kable ekranowane oraz dobrać odpowiednie częstotliwości układu PWM zapewniających właściwy zakres sterowania

zasilaczy przekształtnikowych, oraz ograniczających emisję pasożytniczych oddziaływań. Nowoczesne zasilacze przekształtnikowe są budowane nie z elementów tyrystorowych, lecz w oparciu o tranzystory IGBT. Umożliwia to zwiększenie częstotliwości modulacji PWM do częstotliwości kilkudziesięciu kHz [6].

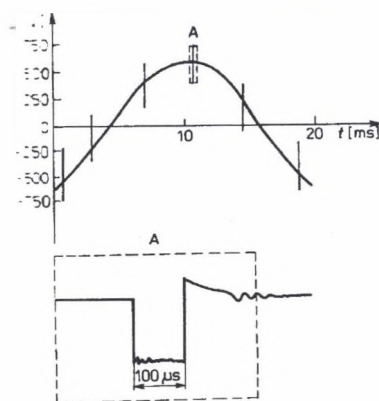


Rys. 1. Schemat układu kompensacyjnego z filtrami LC
Fig. 1. Scheme of compensation system with LC filters

3. Kompatybilność elektromagnetyczna układów zasilania maszyn górniczych

Kompatybilność elektromagnetyczna systemu elektroenergetycznego jest to zdolność systemu do zachowania prawidłowej pracy, niezależnie od poziomu zakłóceń periodycznych lub stochastycznych. Zakłócenia mogą być spowodowane: stanami awaryjnymi systemu (stany zwarciove, obciążenie niesymetryczne), odbiornikami nieliniowymi lub zasilaczami przekształtnikowymi. Kopalniane sieci zasilające są to przeważnie sieci średniego napięcia, o mocy zwarciovej nieprzekraczającej 300MVA (dla powierzchni kopalń) [2, 3]. Moce maszyn górniczych zasilanych z układów przekształtnikowych są rzędu kilkunastu MW[3]. Wzajemna interakcja poszczególnych maszyn górniczych może powodować zakłócenia w ich prawidłowej pracy. Zjawisko to jest szczególnie widoczne m.in.: podczas rozruchu silników napędowych maszyn wyciągowych ich oddziaływania na układy zasilania wentylatorów kopalnianych napędzanych silnikami synchronicznymi, przy rozruchu przenośnika taśmowego napędzanego układem silników indukcyjnych, przejeździe kilku lokomotyw przewodowych po odcinku trakcji zasilanym ze stacji prostownikowych typu: APSP lub APST. Na rys.2 przedstawiono przebieg czasowy napięcia sieci zasilającej zniekształconego pracą zasilacza przekształtnikowego, a na rys.3 zaprezentowano przebiegi czasowe napięcia

na wyjściu zasilacza przekształtnikowego. Przepisy górnicze ograniczają poziom spadków napięcia do wartości: $0,2 U_{1n}$. Oddziaływanie to można ograniczyć przez zwiększenie mocy stacji transformatorowej lub zastosowanie sterowania sekwencyjnego układów przekształtnikowych w podziemiach kopalń. Pewne zakłócenia w pracy stacji wentylatorowych może spowodować praca maszyny wyciągowej dużej mocy zasilanej z układu prostowników statycznych, zasilanej z tej samej rozdzielni głównej. Trudny rozruch silników napędowych może spowodować duży spadek napięcia na szynach rozdzielni głównej, a w efekcie wypadnięcie z synchronizmu silników napędowych i zatrzymanie stacji wentylatorowej. Spadek napięcia może być spowodowany prądem rozruchowym silników napędowych, wyższymi harmonicznymi generowanymi przez zasilacz prostownikowy. Na rys.4 przedstawiono przebiegi czasowe 11 i 13 harmonicznymi napięcia wyjściowego prostownika podczas cyklu pracy maszyny wyciągowej.



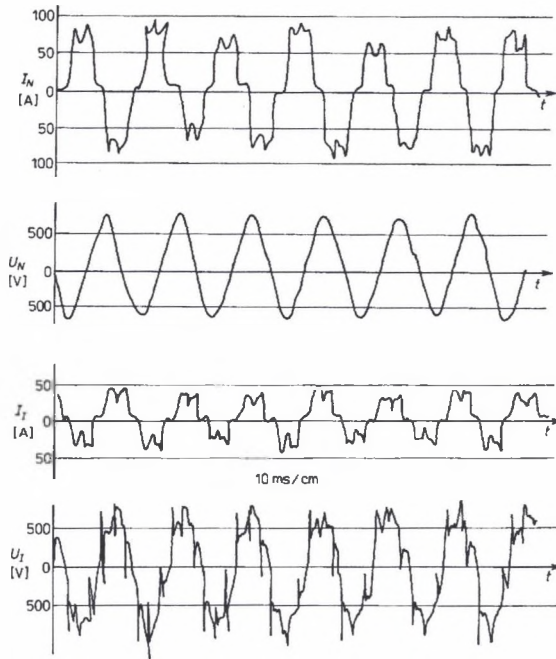
Rys. 2. Przykładowy przebieg czasowy napięcia zasilania maszyny górniczej
Fig. 2. Hypothetical timing route of supply voltage mining machine

W celu ograniczenia spadków napięcia należy wykorzystać sterowanie sekwencyjne zasilaczy prostownikowych oraz ograniczyć poziom wyższych harmonicznymi przez zastosowanie: układu H transformatorów zasilających z odpowiednim przesunięciem godzinowym, pasywnych oraz aktywnych filtrów wyższych harmonicznymi, wprowadzić sterowanie adaptacyjne do układu sterowania maszyny wyciągowej. Szczegółowy opis nowoczesnej metody sterowania będzie przedstawiony w dalszych publikacjach autorów.

4. Aktywne filtry kompensacyjne w kopalnianych sieciach zasilających

Wzrost liczby napędów maszyn górniczych zasilanych z układów przekształtnikowych powoduje znaczne pogorszenie parametrów energii elektrycznej w kopalnianych sieciach zasilających. Znaczny stopień deformacji napięcia i prądu sieci zasilających, spowodowany przez aktywne odbiorniki nieliniowe, wymaga wprowadzania nowych metod kompensacji zniekształceń. Stosowane obecnie statyczne kompensatory rezonansowe, oprócz zalet, posiadają także wiele mankamentów, jak np.: skokowa regulacja mocy biernej, ograniczona szybkość regulacji mocy chwilowej oddawanej do sieci, duży wpływ parametrów sieci zasilającej na efektywność filtracji filtrów pasywnych LC, możliwość powstawania rezonansów: szeregowych lub równoległych pomiędzy układem filtrów a źródłami zasilania. Wady te można znacznie ograniczyć używając w układach przekształtnikowych filtrów aktywnych AFP (Active Power Filter) [1, 2, 8]. Filtry aktywne AFP mogą pracować jako filtry szeregowo, filtry równoległe, filtry szeregowo-równoległe lub jako filtry aktywne hybrydowe, współpracujące z filtrami pasywnymi LC. Filtry aktywne AFP zapewniają skuteczną kompensację wyższych harmonicznych prądu i napięcia, ograniczają skutki niesymetrii napięć i prądów sieci, stabilizują wartość napięcia na zaciskach odbiornika, kompensują spadki napięcia na reaktancji sieci zasilającej oraz umożliwiają kompensację mocy biernej.

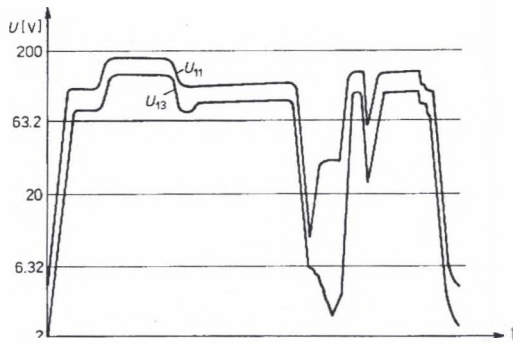
Na rys.5 przedstawiono schemat trójfazowego filtra szeregowo-równoległego, natomiast na rys.6 schemat filtra hybrydowego. W układach filtrów AFP jako źródła wykorzystuje się falowniki prądowe lub napięciowe. W układzie filtra zastosowano kondensator C_d , który jest źródłem napięcia stałego dla falownika napięcia (T_{11} - T_{16}) i falownika prądu (T_1 - T_6) filtra aktywnego. Rozwiązanie to umożliwia stabilizację wartości na kondensatorze w układzie filtra równoległego. Na wyjściu filtra równoległego umieszczone są dławiki L_K , które ograniczają odkształcenia wysokiej częstotliwości prądu I_K , spowodowane modulacją PWM falowników [5, 6]. Filtr szeregowy jest połączony z siecią przez transformator trójfazowy, którego uzwojenia wtórne są włączone szeregowo do źródła zasilania odbiornika. Na wyjściu falownika filtra szeregowego znajduje się filtr bierny L_F, C_F, R_F ograniczający odkształcenia napięcia dodatkowego wysokiej częstotliwości, spowodowane częstotliwością modulacji PWM falownika.



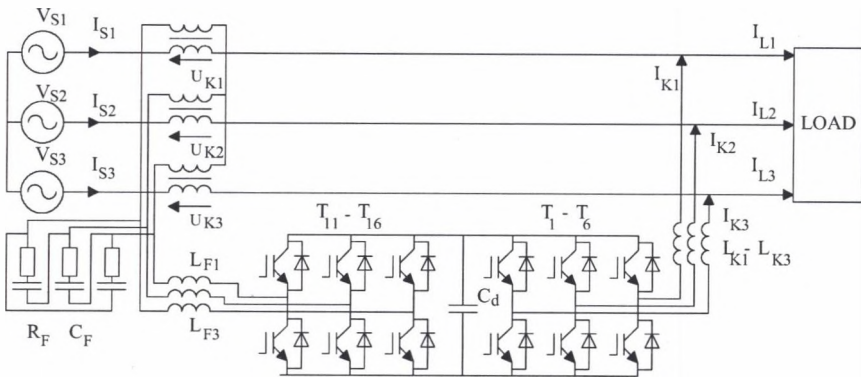
Rys. 3. Przebiegi czasowe napięcia oraz prądu tyrystorowego zasilacza przekształtnikowego

Fig. 3. Timing route of voltage and current of thyristor converter power supply

Innym rozwiązaniem filtrów AFP są filtry hybrydowe, zawierające oprócz filtrów aktywnych także filtry biernie. W układzie kompensacji hybrydowej filtr aktywny małej mocy (falownik napięcia lub prądu) jest źródłem dodatkowego napięcia proporcjonalnego do spektrum harmonicznego prądu sieciowego. Układ ten może być dołączany szeregowo z filtrami biernymi w układzie równoległym lub szeregowo ze źródłem zasilania w układzie szeregowym. Klasyczny układ filtru hybrydowego składa się z: filtru aktywnego AFP, statycznego filtru LC, filtrów górnoprzepustowych GFP tłumiących wyższe harmoniczne modulacji PWM falownika oraz układu kondensatorów statycznych C_d , będących źródłem energii.



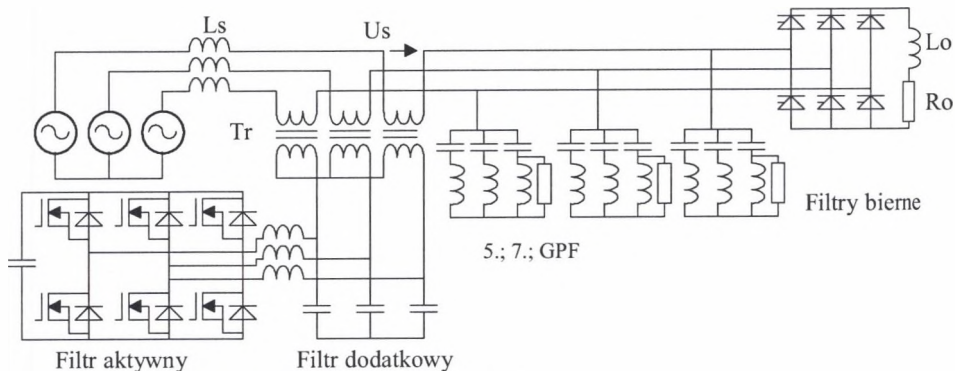
Rys. 4. Przebiegi czasowe 11 i 13 harmonicznej napięcia wyjściowego prostownika
Fig. 4. Timing route of 11th and 13th harmonic of rectifier output voltage



Rys. 5. Schemat trójfazowego filtra aktywnego szeregowo-równoległego
Fig. 5. Threephase active series – parallel filter scheme

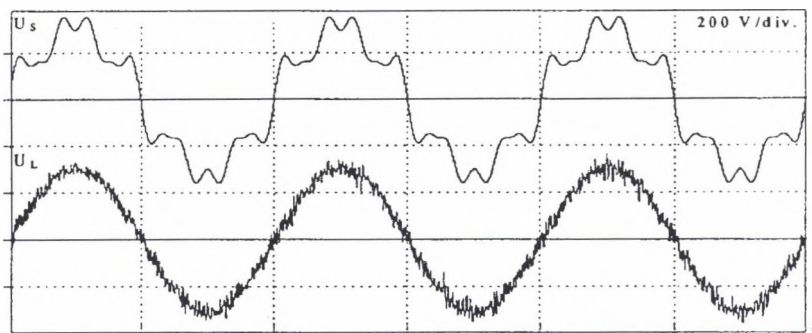
5. Wyniki obliczeń symulacyjnych

W celu sprawdzenia kompatybilności układów zasilania maszyn górniczych oraz skuteczności kompensacji wyższych harmonicznych przez układ filtra AFP przeprowadzono obliczenia symulacyjne na uproszczonym modelu matematycznym układu zasilania. Układ ten zawiera: idealne źródło napięcia trójfazowego, sieć zasilającą o parametrach skupionych podłużnych R_L , L_L , idealny prostownik tyrystorowy oraz silnik obcowzbudny prądu stałego. Obliczenia symulacyjne zrealizowano wykorzystując procedury programów: TCAD6,2 oraz PSPICE 5,2.



Rys. 6. Schemat trójfazowego filtra hybrydowego
 Fig. 6. Three-phase hybrid filter scheme

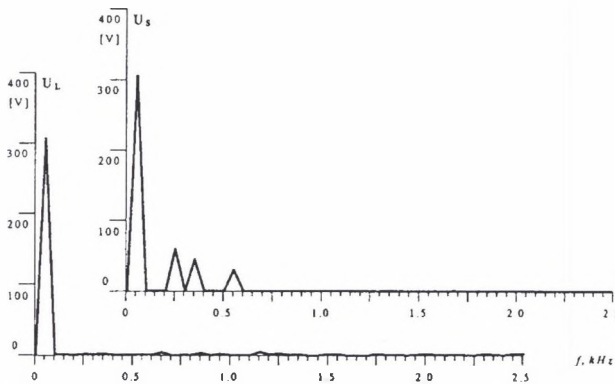
Obliczenia przeprowadzono dla następujących parametrów modelu: napięcie zasilania sieci $U_S = 380V$, rezystancja podłużna sieci $R_L = 0,082\Omega$, indukcyjność podłużna $L_L = 0,04H$, moc silnika napędowego $P_M = 50kW$. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 7, 8. Na rys.7 zamieszczono przebiegi czasowe napięcia sieci oraz napięcia odbiornika po zastosowaniu aktywnego filtra AFP w układzie równoległym, natomiast na rys.8 widma harmonicznnych tych napięć. Algorytmy procesu stabilizacyjnego są wprowadzone do obwodu sterowania falownika w aktywnym filtrze równoległym. Filtry AFP zmniejszają także poziom zakłóceń przy niesymetrii obciążenia odbiornika. Dla analizowanego modelu sieci kopalnianej uzyskano skuteczność kompensacji wyższych harmonicznnych o 50% większą niż dla kompensacji statycznej.



Rys. 7. Przebiegi czasowe napięcia zasilającego oraz napięcia na odbiorniku
 Fig. 7. Timing course of supply and receiver voltage

6. Zakończenie

Wprowadzanie zasilaczy przekształtnikowych do układów zasilania maszyn górniczych, a szczególnie maszyn wyciągowych wiąże się z koniecznością kompensacji zniekształceń napięć zasilania oraz ograniczeniem poboru mocy biernej. Klasyczne układy kompensatorów rezonansowych spełniają te wymagania w ograniczonym zakresie. Lepsze efekty uzyskuje się po zastosowaniu filtrów aktywnych AFP lub filtrów hybrydowych do kompensacji wyższych harmonicznych. Filtry te zawierają układy przekształtnikowe (falowniki napięcia oraz falowniki prądu), których ochrona przeciwporażeniowa i zwarciowa może powodować pewne problemy eksploatacyjne. Zastosowanie filtrów AFP w sieciach kopalnianych powinno przynieść zdecydowaną poprawę skuteczności tłumienia harmonicznych. Zastosowanie filtrów hybrydowych zapewni równocześnie poprawę kompensacji mocy biernej. Praktyczne wprowadzenie filtrów AFP do układów rzeczywistych wymaga przeprowadzenia szeregu analiz oraz badań eksperymentalnych nie tylko na sieciach modelowych, ale także na rzeczywistych układach sieci górniczych. Zagadnienie kompatybilności elektromagnetycznej w sieciach z układami przekształtnikowymi wymaga szczegółowych analiz teoretycznych bazujących na rzeczywistych przebiegach występujących w sieciach kopalnianych. Będzie to realizowane w dalszych pracach autorów



Rys. 8. Widmo harmonicznych napięć: zasilania - U_s , odbiornika U_L

Fig. 8. Harmonic spectrum of supply voltage - U_s and receiver voltage U_L

LITERATURA

1. Aredes M., Heumann K.: A unified power flow controller with active filtering capabilities. PEMC'96, vol.III, Budapest, Hungary.

2. Barbosa P. G., Watanabe E. H.: Advanced series reactive power compensator based on voltage source inverters. Conference Proc. COBEC'95 Sao Paulo 1995.
3. Krasucki F., Miśkiewicz K., Wojaczek A., Frączek S.: Electromagnetic Compability In Underground Mining Elsevier, Amsterdam, Warszawa 1993.
4. Marecki J., Laszcz J.: Koncepcja kompensacji mocy biernej i filtracji wyższych harmonicznych dla maszyn wyciągowych. Opracowanie Biura Projektów Górniczych, Gliwice 1978.
5. Strzelecki R., Rusiński J.: Szeregowo-równoległy filtr aktywny. Materiały Konferencyjne SENE'97, Łódź, listopad 1997.
6. Supronowicz H.: Metody zmniejszania wyższych harmonicznych w prądach pobieranych przez odbiorniki nieliniowe z siecią zasilającą. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995.
7. Szklarski R., Zarudzki J.: Napędy maszyn wyciągowych. Wyd. PWN, Warszawa 2000.
8. Szymański Z., Marek B.: Metody kompensacji wyższych harmonicznych w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo, nr 2100 Gliwice 2003.

Recenzent: Doc. dr inż. Franciszek Szczucki

Abstract

The paper presents consequences of application converters systems in mining machines drive systems, and their influences on energy quality in mining electro energetic sets. For limitation of contents high harmonics in supply current and supply voltage of converters systems, static capacity filters are used. The voltage drops in supply sets caused by passive power stroke may be limited by application of special form of compensation passive energy or for limitation of energy consumption by sequence control of the converter.. Limits of commutation supply voltage brake can limit for application of additional set induction or change of hour displacement in second part windings of the supply transformer (system H). The paper presents an application of actives filters and hybrid filters for compensation of high harmonics in mining sets. Analysis of electromagnetic compability, of mining machine supply systems, supplied for converters system is presented in the paper. The paper presents also selected results of computer simulation, performed for selected configuration mining energetic set, supplied of mining machines systems.