

Zygmunt SZYMAŃSKI, Brunon MAREK
Politechnika Śląska

METODY KOMPENSACJI WYŻSZYCH HARMONICZNYCH W KOPALNIANYCH SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono konsekwencje zastosowania układów przekształtnikowych w napędach maszyn górniczych z uwagi na jakość energii w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych. W celu ograniczenia zawartości wyższych harmonicznych w prądach i w napięciach zasilania układów przekształtnikowych stosowane są statyczne filtry pojemnościowe. W referacie zaproponowano wykorzystanie filtrów aktywnych do kompensacji wyższych harmonicznych w sieciach kopalnianych. Dla układu sieci kopalnianej zasilającej maszynę wyciągową z silnikiem prądu stałego, zasilaną z 3-fazowego prostownika mostkowego, symetrycznego, przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych modelu matematycznego układu oraz porównanie statycznych i dynamicznych metod kompensacji wyższych harmonicznych.

HIGH HARMONICS COMPENSATION METHOD'S IN MINING ELECTROENERGETIC'S SETS

Summary. The paper presents the consequences of application a converter supply systems in mines machines drives systems, considering for quality of energy in mining electroenergetic set's. For minimization of capability of high harmonics in current and in voltage of converter supply systems, are applied a static capacity filters. In the paper proposed utilization of active filters for compensation of high harmonics spectrum in mining sets. For supply system consisting of: hoisting machine driven by DC motor and supplied with 3 phase symmetric bridge rectifier, are presented a result's of simulation performances for the mathematical model of drive system, and a comparison of static and dynamic compensation method's

1. Wprowadzenie

W polskich kopalniach węgla kamiennego stosowane są głównie systemy eksploatacji oparte na wysokiej koncentracji wydobycia. Wymaga to stosowania wydajnych maszyn urabiających oraz niezawodnych systemów transportowych: transportu poziomego oraz

transportu pionowego. Systemy transportu poziomego powinny pracować w sposób ciągły i zapewniać płynną odstawę urobku do stacji załadunkowych na podszybiu lub bezpośrednio na powierzchni. Praca systemów transportu pionowego (skipowe szyby wydobywcze, skipokatki, szyby zjazdowe) powinna być skoordynowana z dopływem urobku do stacji przeładunkowych oraz ze zjazdami i wyjazdami załóg górniczych. Systemy transportu poziomego i pionowego kopalni muszą więc być oparte na racjonalnej logistyce przewozu materiałów i urobku, natomiast procesy technologiczne wszystkich ciągów wydobywczych powinny być monitorowane. Na głównych szbach wydobywczych kopalń węgla kamiennego stosowane są przeważnie maszyny wyciągowe napędzane silnikami obcowzbudnymi prądu stałego, zasilanymi z układów prostownikowych oraz w ograniczonym zakresie maszyny wyciągowe napędzane silnikami indukcyjnymi pierścieniowymi lub synchronicznymi, zasilanymi z przemienników częstotliwości (kaskada podsynchroniczna, cyklokonwertor, silnik zintegrowany) [3, 4, 6, 7]. Moce silników napędowych maszyn wyciągowych osiągają poziom (1000-6000) kW [3, 7]. Maszyny wyciągowe są zasilane z rozdzielni głównej kopalni siecią trójfazową o napięciu znamionowym- 6 kV przez transformatory obniżające - 110 kV/6 kV, przy mocach zwarciowych sieci nie przekraczających 300 MVA. Konsekwencją stosunkowo małej mocy zwarciowej sieci są duże spadki napięć w sieciach zasilających [3, 4, 7]. Zastosowanie zasilaczy prostownikowych zwiększa sprawność energetyczną maszyn wyciągowych ($\eta \approx 0,85$), ogranicza liczbę maszyn wirujących oraz zwiększa niezawodność pracy układu elektromaszynowego. Negatywne skutki wprowadzenia prostowników tyrystorowych do układów zasilania maszyn wyciągowych to: zwiększenie stopnia deformacji napięcia i prądu zasilania (generowanie wyższych harmonicznych), duże wahania napięcia sieci w wyniku skokowych zmian mocy biernej, załamania komutacyjne napięcia zasilającego, stosunkowo mała wartość współczynnika mocy ($\cos\varphi \approx 0,55-0,60$) [3, 4, 7]. W celu ograniczenia negatywnych skutków oddziaływania układów przekształtnikowych na sieć zasilającą należy: zwiększyć moc zwarciową sieci, zastosować filtry wyższych harmonicznych (statyczne lub dynamiczne) oraz zastosować układy kompensacji mocy biernej [4, 5, 7]. W referacie zaproponowano modyfikację klasycznego układu kompensacyjnego zbudowanego ze statycznych filtrów rezonansowych LC przez wprowadzenie kompensacji dynamicznej wykorzystującej filtry aktywne szeregowo- równoległe oraz filtry hybrydowe [1, 2, 5, 6]. W referacie przedstawiono przykładowe schematy filtrów: rezonansowy oraz mieszany (szeregowo-równoległy), filtry hybrydowe w układzie szeregowym oraz równoległym, a

także wyniki symulacji komputerowych modelu systemu energetycznego złożonego z odcinka sieci kopalnianej oraz maszyny wyciągowej zasilanej z prostownika tyrystorowego.

2. Oddziaływanie układów przekształtnikowych na górnictwą sieć zasilającą

W polskich kopalniach węgla kamiennego systematycznie wzrasta ilość napędów maszyn górniczych zasilanych z układów przekształtnikowych. Są to układy napędowe maszyn wyciągowych (silniki prądu stałego, silniki prądu przemiennego), napędy maszyn transportowych (przenośniki taśmowe, przenośniki łańcuchowe), napędy maszyn przepływowych (wentylatory, sprężarki oraz pompy w ograniczonym zakresie). Negatywnym skutkiem wzrostu mocy znamionowej zasilaczy przekształtnikowych zasilanych z sieci kopalnianej jest: wzrost poboru mocy biernej przez przekształtniki statyczne, generowanie wyższych harmonicznych 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 określone przez obowiązujące przepisy energetyczne [3, 4, 5, 7]:

- wielkość załamania komutacyjnego sinusoidy napięcia zasilającego nie powinna przekraczać 20% napięcia zasilania, dla napięcia 6 kV,
- wielkość odkształcenia sinusoidy napięcia zasilającego nie może przekraczać 5%,
- wielkość wahań napięcia przy udarach mocy biernej nie może przekroczyć wartości napięcia: $0,03 U_{1n}$.

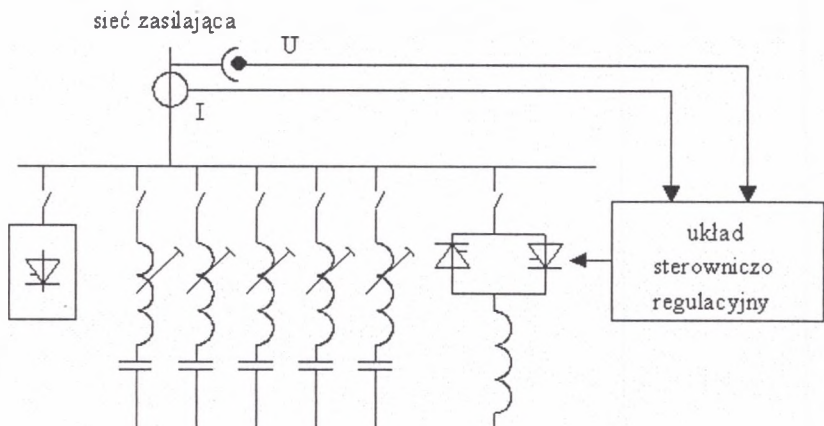
Przykładowe wartości oddziaływania napędu prostownikowego maszyny wyciągowej na sieć zasilającą przedstawiono w tabl. I. Spadki napięcia w sieci zasilającej, spowodowane udarami mocy biernej, można ograniczyć stosując nadążną kompensację mocy biernej lub ograniczając pobór mocy biernej przez sterowanie 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).

Tablica 1

Zestawienie wybranych wielkości negatywnego wpływu napędu prostownikowego na sieć zasilającą [7]

Rodzaj oddziaływania	Moc silnika napędowego [kW]	Wielkość oddziaływania w sieci 6 kV [%]				
Moc zwarciova sieci 6 kV		100	150	200	250	300
Załamanie komutacyjne sinusoidy napięcia	2400	20,6	15,0	11,7	9,6	8,2
	2x2900	23,0	16,7	13,2	10,9	9,3
Odształcenie sinusoidy napięcia	2400	7,3	4,9	3,6	2,9	2,4
	2x2900	13,9	9,3	6,9	5,6	4,6
Wahania napięcia od udarów mocy biemej	2400	5,9	3,9	2,9	2,3	1,9
	2x2900	9,5	6,3	4,7	3,8	3,2

Poziom wyższych harmonicznych w górniczych sieciach energetycznych można ograniczyć stosując filtry wyższych harmonicznych 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 harmonicznych (5h, 7h, 11h, 13h,...) odształconego napięcia. Filtry statyczne LC są załączane w sposób indywidualny lub grupowy przez układy odłączników liniowych wyposażonych w blokady uniemożliwiające pracę filtrów wyższych harmonicznych przy odłączonych filtrach niższego rzędu. Na rysunku 1 przedstawiono schemat grupowego układu kompensacyjnego statycznych filtrów rezonansowych LC.



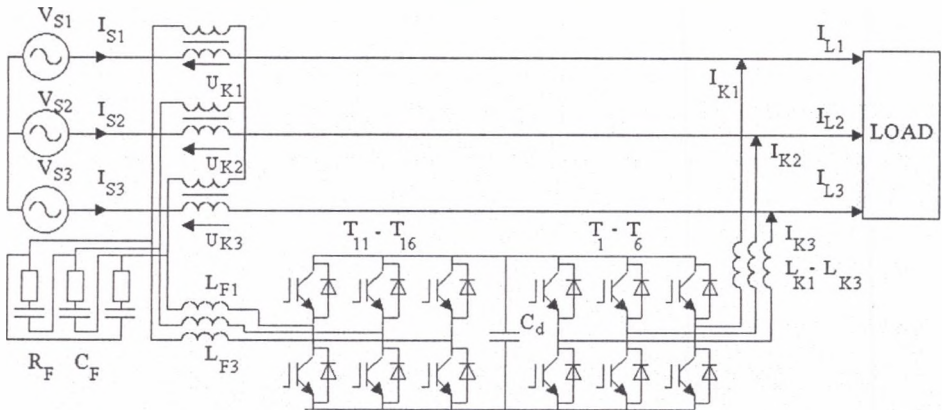
Rys.1. Schemat układu kompensacyjnego z filtrami LC
Fig.1. Scheme of static compensation system with LC filter's

3. Aktywne filtry kompensacyjne w kopalnianych sieciach zasilających

Wzrost liczby napędów 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 szereg mankamentów: 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 stosując w układach przekształtnikowych filtry aktywne AFP (Active Power Filter) [1, 2, 3, 5, 6].

Filtry 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 rysunku 2 przedstawiono schemat poglądowy trójfazowego filtra szeregowo-równoległego. Głównymi elementami filtra szeregowo-równoległego są: sterowane źródło napięciowe U_K włączone szeregowo z napięciem sieci V_S , sterowane źródło prądowe I_K włączone równoległe do odbiornika. W układach filtrów AFP jako źródła wykorzystuje się falowniki prądowe lub napięciowe. W układzie filtra zastosowano kondensator C_d , który jest źródłem napięcia stałego V_C . Rozwiązanie to umożliwia stabilizację wartości napięcia na kondensatorze U_C 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 LOAD. Na wyjściu falownika filtra szeregowego znajduje się filtr bierny ($L_F C_F R_F$), ograniczający odkształcenia napięcia dodatkowego składowymi o wysokiej częstotliwości, spowodowane częstotliwością modulacji PWM falownika. Innym rozwiązaniem filtrów AFP są filtry hybrydowe, zawierające oprócz filtrów aktywnych także filtry bierne. W układzie kompensacji hybrydowej filtr aktywny małej mocy (falownik napięcia lub prądu) jest źródłem

dodatkowego napięcia proporcjonalnego do spektrum wyższych harmonicznych prądu sieciowego. Układ ten może być dołączany szeregowo z filtrami biernymi w układzie równoległym lub szeregowo ze źródłem zasilania w układzie szeregowym.

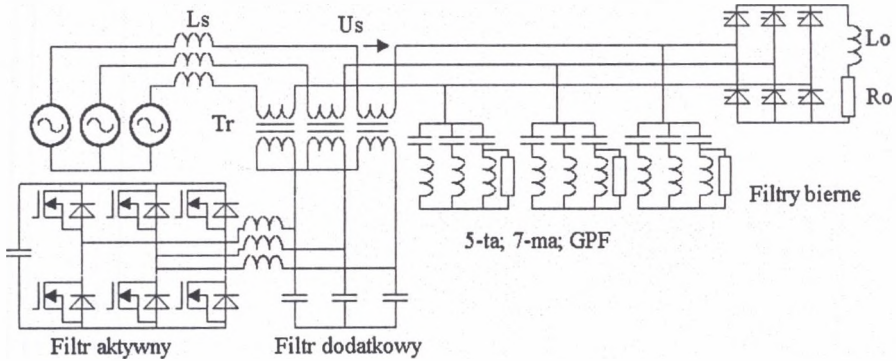


Rys.2. Schemat trójfazowego filtra aktywnego szeregowo-równoległego
Fig.2. Scheme of series-parallel active filter

4. Sterowanie dynamiczne filtrów aktywnych w układach kompensacji wyższych harmonicznych

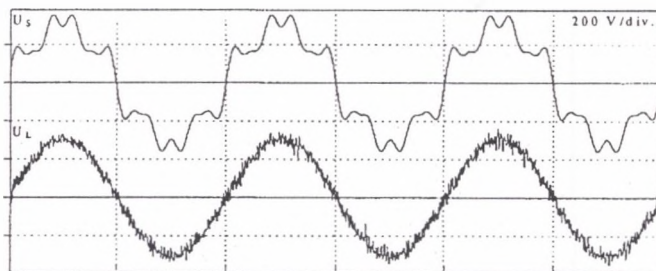
Klasyczny układ filtra hybrydowego składa się z: filtra aktywnego AFP, statycznego filtra LC, filtrów górnoprzepustowych GFP tłumiących wyższe harmoniczne modulacji PWM falownika oraz układu kondensatorów statycznych C_d , będących źródłem energii. Maszyny wyciągowe napędzane silnikami prądu stałego zasilane z prostowników tyrystorowych są podstawowym źródłem zniekształcenia napięcia i prądu sieciowego. Stopień zniekształcenia zależy od rodzaju pracy maszyn wyciągowych i osiąga najwyższy poziom dla stanów dynamicznych (rozruch, hamowanie elektryczne). Występują wtedy udary mocy czynnej oraz biernej. W zależności od kąta wysterowania tyrystorów prostownika, liczby pulsów układu prostownika oraz charakteru obciążenia w napięciu zasilania prostownika dominować będą harmoniczne $q \cdot n$ (q - liczba pulsów prostownika, n - liczba naturalna). Dla prostownika mostkowego trójfazowego będą to harmoniczne - 6, 12, 18, $6n$. Dla prądu pobieranego z sieci oprócz podstawowej harmonicznej pojawiają się harmoniczne $q \cdot n \pm 1$. Dla prostownika trójfazowego będą to harmoniczne: 1, 5, 7, 11, 13, $6n-1$, $6n+1$. Polaryzacja wyższych harmonicznych będzie zależała od układu połączeń transformatora zasilającego oraz od

parametrów sieci zasilającej. Na rysunku 3 przedstawiono schemat strukturalny układu dynamicznego filtra hybrydowego AFP w układzie szeregowym.



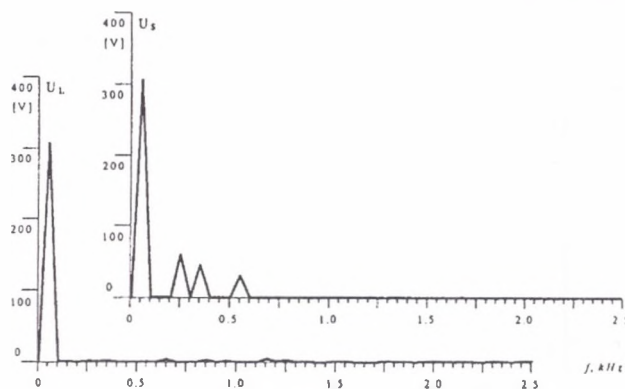
Rys.3. Schemat strukturalny aktywnego filtra hybrydowego
Fig.3. Structural scheme of active hybrid filter

Dominującą rolę w spektrum harmonicznych odgrywają harmoniczne 5 i 7. W układzie kompensacji zastosowano statyczne filtry LC, dostrójone do tłumienia tych harmonicznych. Do kompensacji harmonicznych wyższych rzędów zastosowano filtr góroprzepustowy GFP. Filtr aktywny jest połączony przez transformator prądowy do obwodu głównego. Kondensator C_d oraz filtr dodatkowy służą do tłumienia oscylacji wysokiej częstotliwości generowanych przez filtr aktywny. Dla filtru równoległego zastosowano nadążne kształtowanie prądu, polegające na porównaniu w komparatorze prądu z układu sterowania z wzorcowym przebiegiem prądu obliczonym z algorytmu sterowania. Układ modulacji nadążnej prądu jest taktowany zegarem 16kHz. W falowniku filtra szeregowego AFP zastosowano modulację PWM. W celu sprawdzenia skuteczności kompensacji wyższych harmonicznych przez układ filtra AFP przeprowadzono obliczenia symulacyjne na uproszczonym modelu matematycznym sieci. Model 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 przeprowadzono wykorzystując procedury pakietów TCAD6,2 oraz PSPICE 5,2. Obliczenia przeprowadzono dla następujących parametrów modelu: napięcie zasilania sieci $U_s = 380V$, rezystancja podłużna sieci $R_L = 0,082\Omega$, indukcyjność podłużna $L_L = 0,4mH$, moc silnika napędowego $P_M = 50kW$.



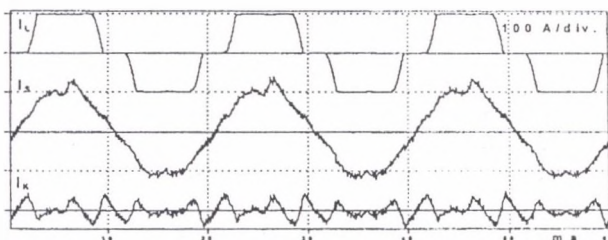
Rys.4. Przebiegi czasowe napięcia zasilającego oraz napięcia na odbiorniku
 Fig.4. Supply voltage and load voltage timing function

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4 - 7. Na rysunku 4 zamieszczono przebiegi czasowe napięcia sieci oraz napięcia odbiornika po zastosowaniu aktywnego filtra AFP w układzie równoległym, natomiast na rys.5 widma harmonicznych tych napięć.

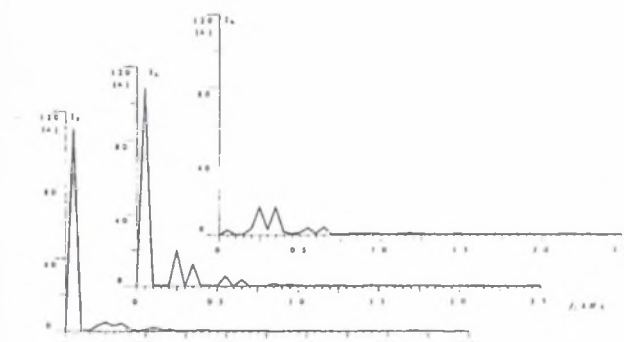


Rys.5. Widmo harmonicznych napięć: zasilania - U_s , odbiornika U_L
 Fig.5. Spectrum of voltage harmonics: supply- U_s , load U_L

Przebiegi czasowe prądów: obciążenia I_L , sieci I_S oraz kompensacyjnego I_K po zastosowaniu równoległego filtra aktywnego przedstawiono na rys.6. Z analizy widma harmonicznych prądów obciążenia, prądów sieci oraz prądu kompensacyjnego przedstawionych na rys.7 wynika wyraźny wpływ filtra AFP na ograniczenie poziomu wyższych harmonicznych. Minimalne zniekształcenia prądu sieciowego są spowodowane skuteczną stabilizacją napięcia na kondensatorze C_d . Algorytmy procesu stabilizacyjnego, które są wprowadzone do obwodu sterowania falownika w aktywnym filtrze równoległym zmniejszają także poziom zakłóceń przy asymetrii obciążenia odbiornika. Dla analizowanego modelu sieci kopalnianej uzyskano zwiększenie skuteczności kompensacji wyższych harmonicznych o 50% w stosunku do kompensacji statycznej.



Rys.6. Przebiegi czasowe prądów: zasilania I_S , odbiornika I_L , kompensującego I_K
 Fig.6. Current timing function of: supply I_S , load I_L , and compensation I_K



Rys.7. Widma harmonicznych prądów: zasilania I_S , odbiornika I_L , kompensującego I_K
 Fig.7. Spectrum current harmonics: supply I_S , load I_L , and compensation I_K

5. Wnioski

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). Zastosowanie filtrów AFP w sieciach kopalnianych powinno przynieść zdecydowaną poprawę skuteczności tłumienia harmonicznych. Zastosowanie filtrów hybrydowych zapewnia 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 przede wszystkim w rzeczywistych układach sieci górniczych

LITERATURA

1. Aredes M., Heumann K.: A unified power flow controller with active filtering capabilities. PEMC'96, vol.III, Budapest, Hungary 1996.
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. Hanzelka Z.: Szeregowe układy kompensacji. Materiały Konferencyjne. Energoelektronika w zastosowaniach przemysłowych EZZ'96, Warszawa 1996.
4. Marecki J., Łaszcz J.: Koncepcja kompensacji mocy biernej i filtracji wyższych harmoniczných dla maszyn wyciągowych. Biuro Projektów Górniczych, Gliwice 1978.
5. Strzelecki R., Rusinowski J.: Szeregowo-równoległy filtr aktywny. Materiały Konferencyjne SENE'97, Łódź listopad 1997.
6. Supronowicz H.: Metody zmniejszania wyższych harmoniczných w prądach pobieranych przez odbiorniki nieliniowe z siecią zasilającą. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995.
7. Szklarski L., Zarudzki J.: Elektryczne maszyny wyciągowe. PWN, Warszawa 1998.

Recenzent: Doc. dr inż. Franciszek Szczucki

Abstract

The paper presents the consistency of application a converter supply systems in mines machines drives systems, considering for quality of energy in mining electroenergetic set's. For minimization of capability of high harmonics in current and in voltage of converter supply systems, are applied a static capacity filters. In the paper proposed utilization of active filters for compensation of high harmonics spectrum in mining sets. For supply system consisting of: hoisting machine driven by DC motor and supplied with 3 phase symmetric bridge rectifier, are presented a result's of simulation performances of the mathematical model of drive system, and comparison of static and dynamic compensation method's.