

Zygmunt SZYMAŃSKI, Brunon MAREK
Politechnika Śląska, Gliwice

NOWOCZESNE METODY OGRANICZANIA WPLYWU ZASILACZY PRZEKSZTAŁNIKOWYCH MASZYN GÓRNICZYCH NA ELEKTROENERGETYCZNY UKŁAD ZASILANIA KWK

Streszczenie. W referacie przedstawiono konsekwencje zastosowania układów przekształtnikowych w napędach maszyn górniczych, oraz ich wpływ na jakość energii w kopalnianych sieciach elektroenergetycznych. W referacie przedstawiono analizę teoretyczną wybranego fragmentu kopalnianej sieci SN, zasilającej maszynę wyciągową z zasilaczem prostownikowym, oraz wentylatory głównego przewietrzania. Dla wybranej konfiguracji sieci SN, opracowano modele symulacyjne, wykorzystując procedury programu Matlab-Simulink, oraz przeprowadzono obliczenia symulacyjne. Wyniki obliczeń komputerowych, zweryfikowane pomiarami na rzeczywistych obiektach, umożliwiają przeprowadzenie analizy wzajemnego oddziaływania napędów zasilanych z układów przekształtnikowych. 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 do kompensacji wyższych harmonicznych w sieciach kopalnianych.

MODERN METHOD LIMITATIONS OF INFLUENCES MINE MACHINE CONVERTER SUPPLY SYSTEM FOR ELECTRO-ENERGETIC MINE SUPPLY SYSTEM

Summary. The paper present a consequence of application converter systems in mining machine drives systems, and their influence on energy quality in electro-energetic mining sets. The paper present s an theoretical analysis of selected fragment mining MV sets, supplied of hoisting machine with diode supply system, and ventilator of main ventilation. For selected configuration of MV sets realized of simulation models, applied Matlab-Simulink procedures, and realized an computer calculation. Results of computer calculation will verified a measurement realized for real objects. That results enables realization of analysis interaction of drives systems supplies with converter supply system. For limitation of high harmonics in supply voltage and supply current are applied static condenser filter. In the paper proposed application of active filter (AFP) or hybrid active filter.

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. Istotną rolę w logistyce transportu kopalni odgrywa: transport urobku, transport materiałów oraz przewóz załogi. W głównych szybach wydobywczych kopalń węgla kamiennego stosowane są przede wszystkim 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, zasilacz cyklokonwertorowy, silnik zintegrowany) [1, 3, 4, 5, 6]. Moce silników napędowych maszyn wyciągowych osiągają wartości 1000–6000 kW [4, 5]. Maszyny wyciągowe są zasilane napięciem znamionowym: 6 kV, przez transformator obniżający: 110 kV/6 kV, przy mocach zwarciovych sieci nie przekraczających 300 MVA. Konsekwencją stosunkowo wartości małej mocy zwarciovej sieci są duże spadki napięć w sieciach zasilających oraz znaczny pobór prądu dochodzący do 1000 A [2, 3, 4]. W układach zasilania maszyn transportu poziomego stosowane są pośrednie przemienniki częstotliwości oraz układy łagodnego rozruchu, natomiast w układach napędowych wentylatorów stosowane są kaskady podsynchroniczne [2, 3, 4]. Negatywnymi skutkami wprowadzenia układów przekształtnikowych do układów zasilania maszyn górniczych są: 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 ($\cos\varphi \approx 0,55-0,60$) [2, 3, 4]. Zakłócenia te mogą oddziaływać na inne napędy zasilane z tej samej rozdzielni, powodując zakłócenia ich pracy (zakłócenia pracy wentylatorów głównego przewietrzania napędzanych silnikami synchronicznymi lub napędy z silnikami indukcyjnymi pierścieniowymi w układzie kaskady podsynchronicznej). 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 automatycznej kompensacji mocy biernej [2, 3, 4, 5]. Znaczne odkształcenia napięć i prądów zasilających mogą również zakłócać pracę zabezpieczeń analogowych oraz cyfrowych (Multimuz), stosowanych w obwodach zasilania maszyn górniczych. W niniejszym referacie przedstawiono analizę teoretyczną wybra-

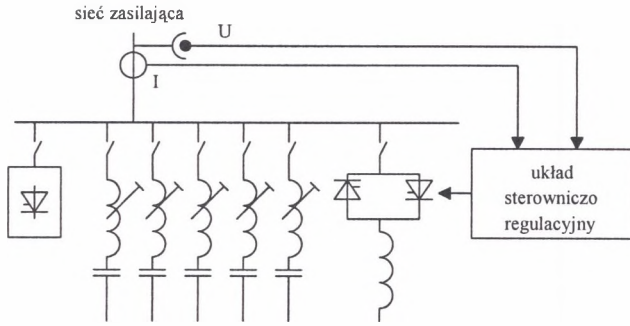
nego fragmentu kopalnianej sieci SN, zasilającej maszynę wyciągową z zasilaczem prostownikowym, oraz wentylatory głównego przewietrzania. Dla wybranej konfiguracji sieci SN, opracowano modele symulacyjne, wykorzystując procedury programu Matlab-Simulink, oraz przeprowadzono obliczenia symulacyjne. Wyniki obliczeń komputerowych, zweryfikowane pomiarami na rzeczywistych obiektach, umożliwiają przeprowadzenie analizy wzajemnego oddziaływania napędów zasilanych z układów przekształtnikowych.

2. Oddziaływanie układów przekształtnikowych na górnictwiczną sieć zasilającą

W polskich kopalniach węgla kamiennego wzrasta liczba 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). Negatywnymi skutkami wzrostu mocy znamionowej zasilaczy przekształtnikowych zasilanych z sieci kopalnianej są: 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 narzucone przez obowiązujące przepisy energetyczne [1, 4]. 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: $0,03 U_{1n}$.

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 po stronach wtórnych transformatorów zasilających (układ H). 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). Filtry statyczne LC są załączane w sposób indywidualny lub grupowy przez układy odłączników liniowych wyposażonych

w blokady uniemożliwiającej pracę filtrów wyższych harmonicznych przy odłączonych filtrach niższego rzędu. Na rys.1 przedstawiono schemat grupowego załączania statycznych filtrów rezonansowych LC.



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

3. Model matematyczny kopalnianej sieci SN

Kopalniana sieć zasilająca składa się z sieci powierzchniowej prowadzonej linią powietrzną lub linią kablową, układu transformatorów energetycznych, dopasowujących napięcia sieci do poziomu napięć znamionowych zasilanych odbiorów, oraz odbiorów wyposażonych w zasilacze przekształtnikowe: silniki indukcyjne, silniki prądu stałego, baterie kondensatorów. Do analizy stanów przejściowych sieci kopalnianej przyjęto kaskadowe połączenie czwórników typu G. W gałęzi podłużnej znajdują się szeregowo połączone elementy R_s oraz L_s , w gałęzi poprzecznej włączona jest pojemność odcinka sieci C_s . Kopalnianą sieć elektroenergetyczną średniego napięcia można opisać układami równań różniczkowych kaskadowego układu czwórników (1):

$$\begin{aligned} \frac{di_{k-1}}{dt} &= \frac{1}{X_k} (U_k - \alpha_k - i_{k-1} R_{k-1}) \frac{dU_k}{dt} = \frac{i_k}{b_{k-1}} \\ \frac{di_k}{dt} &= \frac{1}{X_k} (U_{k-1} - \alpha_{k-1} - i_k R_k) \frac{dU_{k-1}}{dt} = \frac{i_{k-1}}{b_k} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

α_{k-1} , α_k , b_{k-1} , b_k – współczynniki macierzy czwórnika,

R_{k-1} , R_k , X_{k-1} , X_k – rezystancja i reaktancja podłużna k -tego czwórnika,

U_{k-1} , U_k , i_{k-1} , i_k – napięcia i prądy na wejściu i wyjściu k -tego czwórnika.

Wartości współczynników a_k , b_k zależą od parametrów obciążenia sieci kopalnianej oraz od pojemności baterii kondensatorów, włączanych do sieci w celu kompensacji statycznej mocy biernej oraz ograniczenia poziomu wyższych harmonicznych napięcia zasilania i prądach pobieranych ze źródeł zasilania. Szczegółową analizę stanów dynamicznych zachodzących w sieciach kopalnianych średniego napięcia przedstawiono w [4]. Dynamikę maszyny wyciągowej napędzanej silnikiem obcowzbudnym prądu stałego opisuje układ równań (2):

$$\begin{aligned} U_M &= R_M i_M + L_M \frac{di_M}{dt} + E_M \\ U_w &= R_w i_M + L_w \frac{di_w}{dt} \\ E_M &= k_M \Phi_w \omega_M \\ M_M &= k_M \Phi_M i_M \\ U_M - U_M &= J_z \frac{d\omega_M}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

R_M , L_M – rezystancja i indukcyjność twornika silnika,

R_w , L_w – rezystancja i indukcyjność wzbudzenia silnika,

W stanach dynamicznych, prostownik tyrystorowy można przedstawić jako element inercyjny I rzędu z niewielką wartością opóźnienia czasowego, związanego z komutacją zaworów prostownika [5, 6]. W referacie ograniczono analizę elektromagnetycznych stanów dynamicznych systemu tylko do warunków spowodowanych zmianami parametrów zasilania silnika, pominięto natomiast elektromechaniczne stany dynamiczne wynikające z realizacji cyklu pracy maszyny wyciągowej. Dynamikę silnika indukcyjnego opisuje układ równań różniczkowych (3):

$$\begin{aligned} u_s &= R_{s,s} i_s + L_{\sigma s} \frac{di_s}{dt} + M_{s,r} \frac{di_r}{dt} \\ u_r &= R_{r,r} i_r + L_{\sigma r} \frac{di_r}{dt} + M_{r,s} \frac{di_s}{dt} \\ M_{M1} &= i_s^T \frac{\partial}{\partial \phi_{M1}} [M_{s,r}] i_r \\ M_{M1} - M_{M1} &= J_{M1} \frac{d\omega_{M1}}{dt} + D_1 \omega_{M1} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

R_s , R_r – rezystancje uzwojeń stojana oraz uzwojenia wirnika,

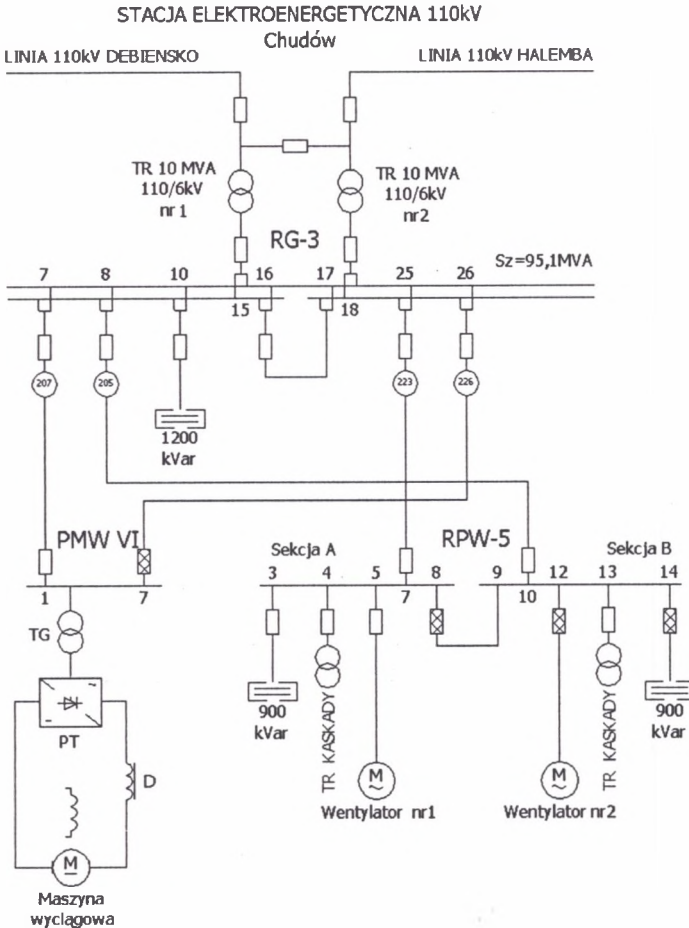
L_s , L_r – indukcyjności własne uzwojeń stojana oraz wirnika,

L_{σ} , $M_{s,r}$ – indukcyjność rozproszenia, indukcyjność wzajemna stojana oraz wirnika,

M_{M1} – moment elektromagnetyczny silnika,

i_s , i_{r1} , i_{r2} – prąd stojana, oraz wirnika: r1

u_s, u_{r1} – napięcia zasilania uzwojenia stojana oraz wirnika r1.



Rys. 2. Schemat elektroenergetycznej sieci 6kV

Fig. 2. Scheme of mining electro energetic MV set

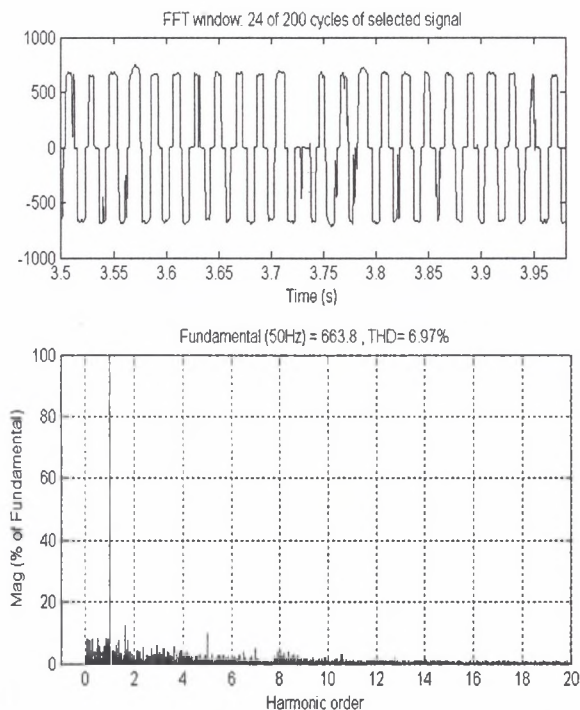
W analizie rozpatrzono dwa układy zasilania wentylatorów kopalnianych: napęd klasyczny z rozrusznikiem rezystorowym oraz napęd w układzie kaskady podsynchronicznej. Analiza zjawisk zachodzących w układach napędowych wentylatora, dotyczy tylko stanów quasi-dynamicznych, związanych ze zmianami napięcia zasilania silnika. Układy równań różniczkowych opisujących zjawiska zachodzące w systemie elektroenergetycznym fragmentu sieci kopalnianej są podstawą do opracowania modelu symulacyjnego sieci kopalnianej w programie Matlab-Simulink [5, 6].

4. Model symulacyjny kopalnianej sieci SN

Analizę zjawisk zachodzących w sieciach zasilających ograniczono do wycinka systemu zasilania KWK w obrębie Rozdzielni RG-3 (rys. 2). Rozdzielnia RG-3 jest zasilana dwoma liniami napowietrznymi 110 kV, przez transformatory 110 kV/6 kV o mocy znamionowej: 10 MVA. Rozdzielnia RG-3 jest rozdzielnią dwusekcyjną. Do sekcji S1A podłączono odbiory o mocy: 14,7 MVA, natomiast do sekcji S1B odbiory o mocy: 14,3 MVA. Sekcje S1A i S1B rozdzielni RG-3 stanowią dwa źródła zasilania maszyny wyciągowej PMW VI N, napędzanej silnikiem prądu stałego o mocy znamionowej: 2400 kW. Schemat poglądowy sieci kopalnianej zawierającej rozdzielnię RG-3 oraz szczyby peryferyjne V i VI przedstawiono na rys. 2. Z rozdzielni głównej RG-3 są zasilane także dwa wentylatory głównego przewietrzania napędzane silnikami indukcyjnymi z wirnikiem pierścieniowym o mocy 2500 kW. Wentylatory te pracują w układzie: główny–rezerwowy, zapewniając ciągłość przewietrzania kopalni. Do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych układów napędowych z zasilaczami przekształtnikowymi razem ze strukturą układu regulacji, oraz do badania wpływu ich wzajemnego oddziaływania wykorzystano program Simulink. Do modelowania poszczególnych elementów systemu zasilania wykorzystano dane katalogowe oraz parametry rzeczywistego obiektu. Uproszczony schemat blokowy wycinka kopalnianego systemu zasilania siecią SN przedstawiono na rys. 3.

W układzie napędowym wentylatora przyjęto napęd z rozrusznikiem rezystorowym, a w układzie zasilania maszyny wyciągowej uproszczony model zasilacza (zastępczy prostownik 6T). W ramach obliczeń symulacyjnych przeprowadzono także analizę zawartości wyższych harmonicznych przebiegów czasowych poszczególnych napięć oraz prądów zasilania.

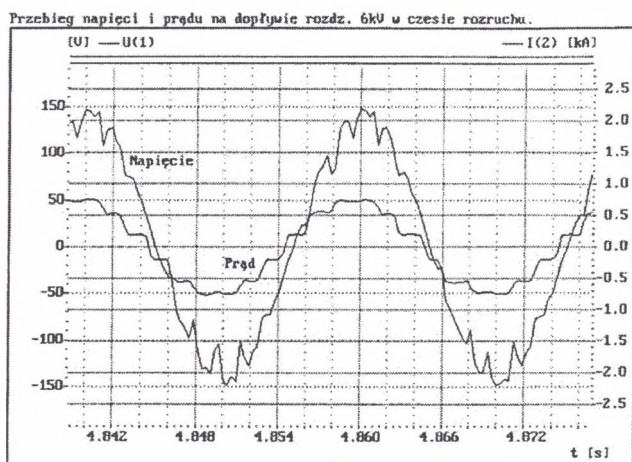
Wyniki obliczeń umożliwiają obliczenie wypadkowego współczynnika odkształceń (THD). Przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rys. 4a, 4b. Na rys. 4a przedstawiono przebieg czasowy prądu w szynach rozdzielni RG-3 podczas pracy ustalonej maszyny wyciągowej i pracy ustalonej wentylatora głównego przewietrzania, natomiast na rys. 4b analizę harmonicznych. Wypadkowy współczynnik odkształcenia wynosi $THD_1 = 6,97\%$.



Rys. 4. Przebieg czasowy prądu zasilania maszyny wyciągowej
 Fig. 4. Hoisting machine supply current timing signal

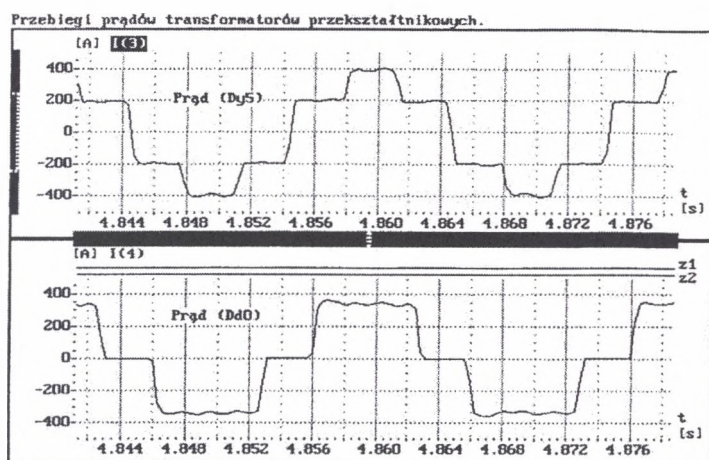
Model ten spełnia także funkcje archiwizacyjne, przechowując w pamięci historie zdarzeń zachodzących w okresie jego pracy. Zespół ten określa wartości skuteczne oraz maksymalne napięć i prądów dla przebiegów praktycznie sinusoidalnych (wypadkowy współczynnik zniekształceń THD nie powinien przekroczyć 5 %). Analiza komputerowa zjawisk zachodzących w sieci kopalnianej zasilanej z rozdzielnic RG-3 oraz RPW-5 oraz przeprowadzona analiza zawartości wyższych harmonicznnych w przebiegach czasowych napięć zasilających oraz prądów pobieranych z sieci na tych rozdzielniach, wykazała znaczne deformacje przebiegów napięć i prądów w stanach dynamicznych maszyny wyciągowej zasilanej z zasilacza przekształtnikowego. Wartości maksymalne THD uzyskane w czasie różnych warunków pracy systemu zasilania osiągają wartości od 10 % do 42 %. Przy analizie pracy zabezpieczeń cyfrowych należy zwrócić uwagę na przyczyny ich za- lub niezadziałania. Ewentualnym powodem nieprawidłowej pracy może być znaczny stopień deformacji mierzonych napięć lub prądów. Jako środek zaradczy należy zastosować inne przetworniki pomiarowe, które będą zapewniały prawidłowy pomiar mierzonych wartości przy ich znacznej deformacji w stosunku do przebiegu sinusoidalnego, oraz zastosować filtry wyższych harmonicznnych nowej gene-

racji, np. filtry aktywne [2, 5]. Wyniki obliczeń symulacyjnych zostały częściowo zweryfikowane badaniami eksperymentalnymi przeprowadzonymi w KWK. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 5, 6. Na rys. 5 przedstawiono przebieg napięcia i prądu pobieranego z sieci 6 kV podczas rozruchu maszyny wyciągowej, a na rys. 6 przebieg prądu zasilania transformatora 6 kV. Analiza harmoniczných potwierdziła wyniki obliczeń komputerowych.



Rys. 5. Przebiegi napięcia i prądu podczas rozruchu
Fig. 5. Voltage and current timing signal during starting

Filtry aktywne (AFP) mogą pracować jako filtry szeregowe, filtry równoległe, filtry szeregowo-równoległe lub jako filtry aktywne hybrydowe współpracujące z filtrami pasywnymi LC [2, 6]. Filtry aktywne zapewniają skuteczną kompensację wyższych harmoniczných 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. Innym rozwiązaniem filtrów aktywnych 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 harmoniczných 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, statycznego filtru LC, filtrów górnoprzepustowych tłumiących wyższe harmoniczne modulacji PWM falownika oraz układu kondensatorów statycznych będących źródłem energii.



Rys. 6. Przebieg prądu transformatora zasilającego
Fig. 6. Timing signals of supply transformer current

Opisy sposobu sterowania oraz projektowania filtrów aktywnych oraz hybrydowych przedstawiono w [4, 5]. Wyniki obliczeń oraz badania eksperymentalne potwierdziły celowość wprowadzania filtrów aktywnych do kopalnianych sieci SN.

5. Wnioski

Analiza pracy wycinka kopalnianego systemu zasilania siecią SN^Ź pozwoliła stwierdzić znaczny wpływ pracy maszyny wyciągowej zasilanej z zasilaczy prostownikowych na przebiegi czasowe napięć i prądów na szynach rozdzielni RG-3 oraz na szynach rozdzielni RPW-5 zasilanej linią kablową o długości 3380 m. Stany dynamiczne maszyny wyciągowej: rozruch, hamowanie odzyskowe, powodują znaczne spadki napięcia na szynach rozdzielni RPW-5 dochodzące do 30 % U_{In} , oraz duże deformacje przebiegów czasowych ($THD_{max}=45\%$). Może to spowodować zakłócenia pracy wentylatorów głównego przewietrzania oraz spowodować nieprawidłową pracę zespołów zabezpieczeń cyfrowych. Jako ewentualne środki zaradcze należy wprowadzić nowoczesne układy filtrów wyższych harmonicznych, ograniczające poziom zniekształceń, oraz odpowiednią koordynację pracy maszyny wyciągowej z innymi odbiorami KWK.

LITERATURA

1. Marecki J., Łaszcz J.: Koncepcja kompensacji mocy biernej i filtracji wyższych harmonicznych dla maszyn wyciągowych. Praca badawcza nie publikowana, Biuro Projektów Górniczych Gliwice 1978.
2. Supronowicz H.: Metody zmniejszania wyższych harmonicznych prądach pobieranych przez odbiorniki nieliniowe z siecią zasilającą. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995.
3. Szczęsny R., Chrzan P., Iwan K.: Zastosowanie technik komputerowych w symulacji i projektowaniu układów przekształtnikowych. Przegląd Elektrotechniczny, 2/2000, s. 30–35.
4. Szklarski J.: Stany nieustalone w sieci kopalnianej przy komutacji baterii kondensatorów równoległych. ZN AGH Elektrotechnika, nr 15, Kraków 1990, s. 90–100.
5. Szymański Z., Marek B.: Analiza kompatybilności elektromagnetycznej układów zasilania maszyn górniczych zasilanych z układów przekształtnikowych. ZN Politechniki Śląskiej nr 130, Gliwice, 2004, s. 497–507.
6. Szymański Z.: Analiza kompatybilności elektromagnetycznej systemów zasilania odbiorów dużej mocy, zasilanych z zasilaczy przekształtnikowych. Materiały Konferencyjne ZKWE'05, Poznań 2005., s. 70–76.

Recenzent: Dr hab. inż. Kazimierz Jaracz, prof. AP