

UKŁADY KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ MASZYN WYCIĄGOWYCH
ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM UKŁADÓW STATCOMŁukasz MATYJASEK¹, Krzysztof MATYJASEK²

1. ELMA energia Sp. z o.o.

tel. 89 523 84 90

e- mail: l.matyjasek@elma-energia.pl

2. ELMA energia Sp. z o.o.

tel. 89 523 84 90

e- mail: k.matyjasek@elma-energia.pl

Streszczenie: Kopalniane maszyny wyciągowe z napędami tyrystorowymi są bardzo specyficznymi, niespokojnymi, generującymi wyższe harmoniczne prądu odbiorami energii elektrycznej. Stosunkowo duża moc tych odbiorów rzutuje znacząco na jakość energii elektrycznej w układach zasilająco-rozdzielczych kopalń. Jednym z podstawowych problemów jest kompensacja mocy biernej w środowisku wyższych harmonicznych. W artykule przedstawiono podstawowe rozwiązania techniczne w tym zakresie.

Słowa kluczowe: kompensacja mocy biernej, wyższe harmoniczne, maszyny wyciągowe, układy STATCOM.

1. WSTĘP

Mimo ciągłego rozwoju alternatywnych źródeł energii, w przeciągu najbliższych lat górnictwo głębinowe (podziemne) będzie miało nadal znaczący udział w krajowej gospodarce. Świadczy o tym otwarcie we wrześniu 2019 roku kopalni „Bzie-Dębina” w strukturach JSW S.A., plany reaktywacji kopalni „Dębieńsko” w Czerwionce-Leszczynach czy budowy kopalni „Jan Karski” w pobliżu Lublina. Należy również pamiętać o tym, że oprócz górnictwa węgla kamiennego, w Polsce funkcjonują również kopalnie głębinowe miedzi oraz soli.

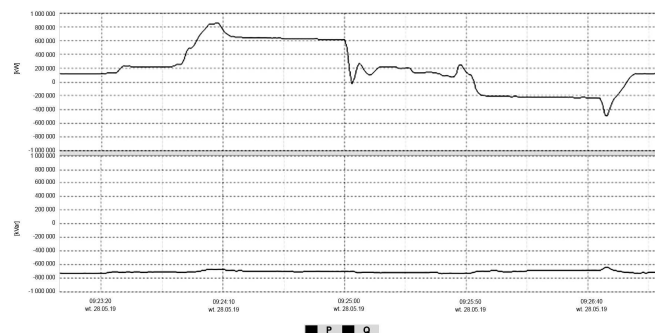
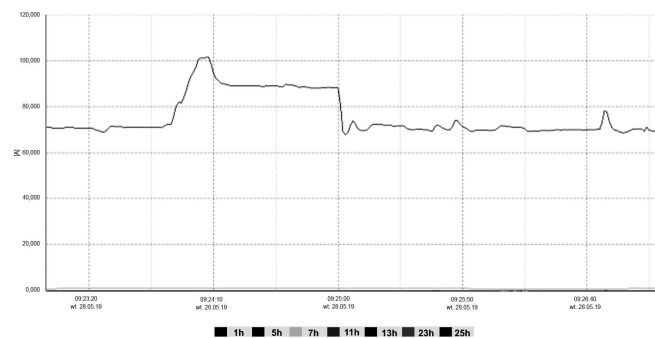
Z tych powodów maszyny wyciągowe prądu stałego (będące podstawą transportu pionowego) będą nadal szeroko wykorzystywane w kopalnianych układach napędowych.

Przez wiele lat, dominującymi rozwiązaniami były maszyny wyciągowe pracujące w układzie Leonarda (pierwsze rozwiązanie na Śląsku zostało uruchomione w 1902 roku [1]). W układzie Leonarda silnik synchroniczny napędza prądnicę prądu stałego. Poprzez regulację prądu wzbudzenia silnika synchronicznego można zmieniać charakter pobieranego prądu. Może wówczas silnik synchroniczny spełniać rolę kompensatora mocy biernej. Zasadniczą wadą takiego rozwiązania są znaczne straty mocy czynnej [2].

Już w latach 90. wskazywano na nieefektywność energetyczną takich rozwiązań i konieczność ich modernizacji [3]. W ostatnich latach, kolejne maszyny wyciągowe w układzie Leonarda przebudowywane są na układy z przekształtnikami tyrystorowymi.

Porównanie przebiegów mocy czynnej i biernej oraz wartości generowanych wyższych harmonicznych prądów

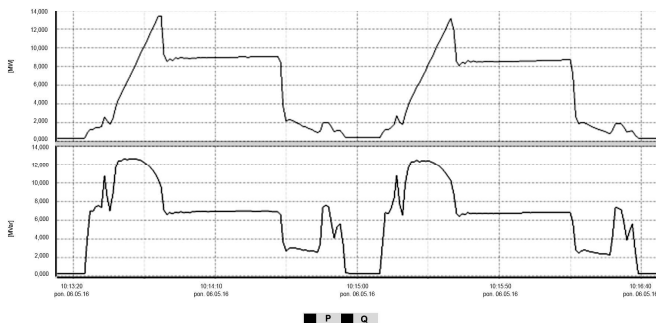
maszyny wyciągowej z napędem synchronicznym oraz tyrystorowym przedstawiono na rysunkach od 1 do 4 oraz w tabelach 1 i 2.

Rys. 1. Przebieg poboru mocy czynnej P i biernej Q przez maszynę wyciągową z silnikiem synchronicznym 950 kW

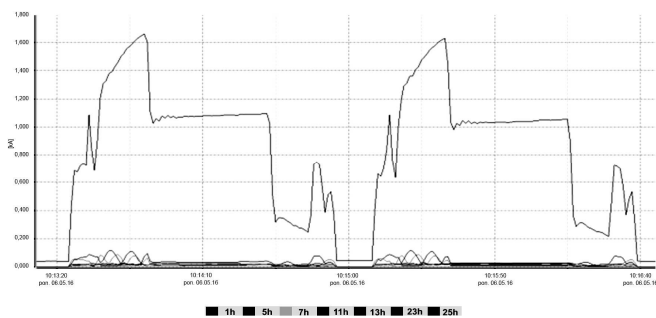
Rys. 2. Wartości znaczących w.h. prądu odniesione do prądu składowej podstawowej maszyny z napędem synchronicznym 950 kW

Tabela 1. Wartości zarejestrowanych wyższych harmonicznych oraz składowej podstawowej dla przebiegów jak na rysunku 2

I_v	I_1	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	I_{23}	I_{25}
I_{sr} (A)	75,81	0,20	1,03	0,19	0,16	0,07	0,05
$I_{sr}/I_{1, sr}$ (%)		0,26	1,36	0,25	0,21	0,09	0,07
I_{max} (A)	101,5	0,25	1,11	0,25	0,19	0,11	0,11
$I_{max}/I_{1, max}$ (%)		0,25	1,09	0,25	0,19	0,11	0,11



Rys. 3. Przebieg poboru mocy czynnej P i biernej Q przez maszynę wyciągową prądu stałego z napędem tyrystorowym w układzie 12-pulsowym) o mocy 2×3600 kW



Rys. 4. Znaczące wyższe harmoniczne prądu odniesione do prądu składowej podstawowej dla maszyny z napędem tyrystorowym 2×3600 kW

Tabela 2. Wartości zarejestrowanych wyższych harmonicznych oraz składowej podstawowej dla przebiegów jak na rysunku 4

I_v	I_1	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	I_{23}	I_{25}
I_{sr} (A)	810,1	8,1	6,4	33,1	18,2	16,2	13,8
I_{sr} / I_{1sr} (%)		1,00	0,79	4,09	2,25	2,00	1,70
I_{max} (A)	1660,1	19,1	17,5	113,9	85,6	27,3	24,0
I_{max} / I_{1max} (%)		1,15	1,05	6,86	5,16	1,64	1,45

Na podstawie tabel 1 i 2 wynika, że zastosowanie maszyny wyciągowej z napędem tyrystorowym prądu stałego wiąże się z kilkoma negatywnymi aspektami:

- znacznym i dynamicznym poborem mocy biernej indukcyjnej,
- generacją wyższych harmonicznych.

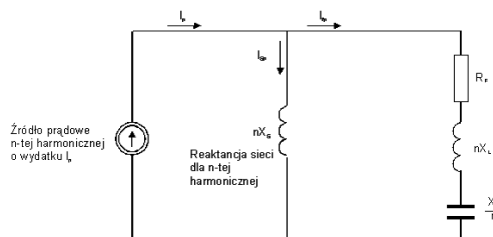
W celu kompensacji mocy biernej stosowane są następujące rozwiązania techniczne:

- pasywne filtry wyższych harmonicznych,
- dynamiczne układy kompensacji mocy biernej,
- układy nadążne STATCOM.

2. ROZWIĄZANIA TECHNICZNE UKŁADÓW DO KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ

Filtry pasywne tworzą układ LC, w których indukcyjność dławika szeregowego wraz z pojemnością baterii kondensatorów tworzą obwód rezonansowy o częstotliwości rezonansowej własnej f_{rw} . Dla częstotliwości mniejszych od f_{rw} , w tym dla częstotliwości podstawowej 50 Hz, filtr posiada charakter pojemnościowy (kompensuje wówczas moc bierną indukcyjną). Dla częstotliwości wyższych, obwód dławik-kondensatory posiada charakter indukcyjny, uniemożliwiając dla tych częstotliwości wystąpienie rezonansu w obwodzie bateria-

sięć. Podstawowy schemat zastępczy rozplywu wyższych harmonicznych w gałęzi filtra z uwzględnieniem reaktancji sieci przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Uproszczony schemat układu filtru w. h. – sieć zasilająca

Częstotliwość rezonansową własną oblicza się z zależności:

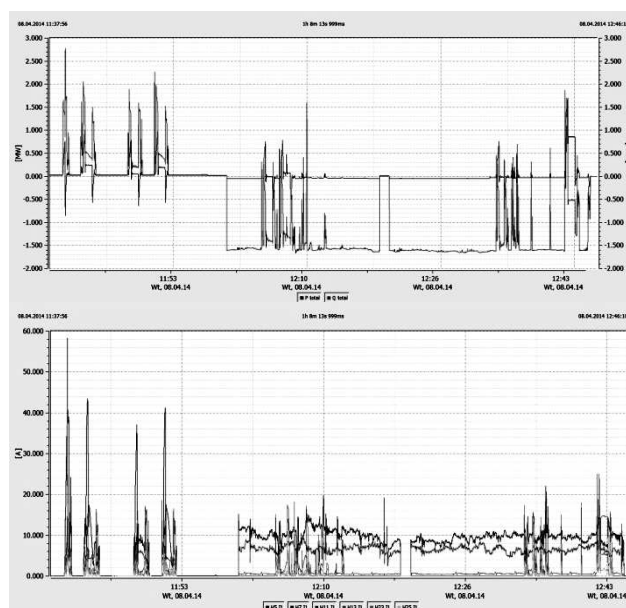
$$f_{rw} = f_N \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (1)$$

gdzie: f_N – częstotliwość znamionowa, X_C – reaktancja pojemnościowa, X_L – reaktancja indukcyjna.

W celu filtracji wyższych harmonicznych, stosowane są układy filtrów dostrojonych do odpowiedniej częstotliwości, zgodnie ze wzorem (1). Najczęściej układ kompensacyjno-filtracyjny składa się z kilku gałęzi filtrów pasywnych, który obejmuje filtry 5h, 7h, 11h oraz ewentualnie 13h, niezależnie czy stosowane są prostowniki 6-cio i 12-to pulsowe.

Przy doborze filtrów wyższych harmonicznych należy wziąć pod uwagę nie tylko spodziewany poziom wyższych harmonicznych generowanych przez kompensowany odbiornik, lecz również wyższe harmoniczne generowane w innych punktach układu zasilająco-rozdzielczego.

Ze względu na krótki czas pracy maszyny wyciągowej, układy filtrów wyższych harmonicznych najczęściej wykonywane są jako nieregulowane. Przykładowo na rysunku 6 w części górnej pokazano przebiegi mocy czynnej P (kolor niebieski) i mocy biernej Q (kolor czerwony) oraz w części dolnej zarejestrowane wartości harmonicznych prądów: I_5 (granatowy), I_7 (czerwony) i I_{11} (zielony).



Rys. 6. Oscylogramy poboru mocy czynnej i biernej oraz zmiany prądów harmonicznych od I_5 do I_{25} dla maszyny wyciągowej z układami filtrów 5h i 7h

Do podstawowych wad filtrów pasywnych, takich jak przedstawiono na rys. 7, należy zaliczyć:

- trudności z pełnym dostrojeniem filtra, wynikające z dopuszczalnych normatywnie tolerancji parametrów L , C zastosowanych urządzeń,
- zależność skuteczności filtracji od impedancji sieci zasilającej i dobroci dławika,
- ograniczenia możliwość regulacji mocy w czasie cyklu pracy maszyny wyciągowej.



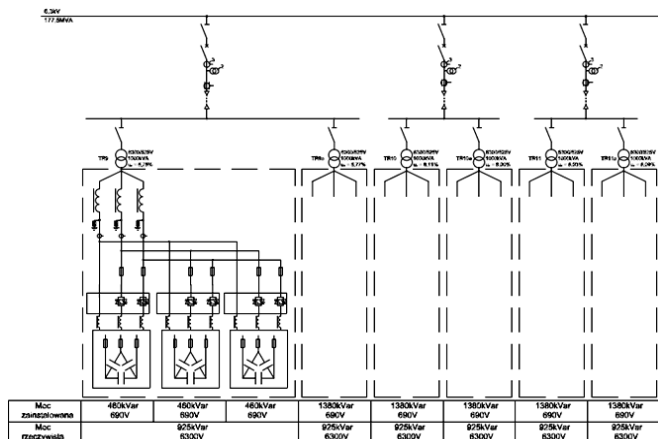
Rys. 7. Przykładowy układ filtrów pasywnych 6 kV

Kompensacja dynamiczna ma zastosowanie w punktach sieci, gdzie maszyna wyciągowa jest jedynym urządzeniem zasilanym z pola rozdzielni wyposażonego w punkt rozliczeniowy pobieranej energii elektrycznej. W takich przypadkach stosuje się układy z łącznikami tyrystorowymi (TSC).

Rozwiązanie to bazuje na zasadzie transformatorowych filtrów pasywnych. Człon kondensatorowy składa się z transformatora obniżającego oraz baterii kondensatorów niskiego napięcia przyłączonych do niego z wykorzystaniem łączników tyrystorowych (rys. 8). Parametry reaktancyjne obu elementów dobrane są tak, aby tworzyły układ filtra odstrojonego dla danej harmonicznej.

Zastosowanie łączników tyrystorowych zapewnia:

- nadążne dostosowanie mocy systemu do chwilowego zapotrzebowania na moc bierną pojemnościową (czas regulacji do 20 ms),
- brak stanów nieustalonych w czasie operacji łączeniowych,
- redukcję do minimum zjawiska przekompensowania.

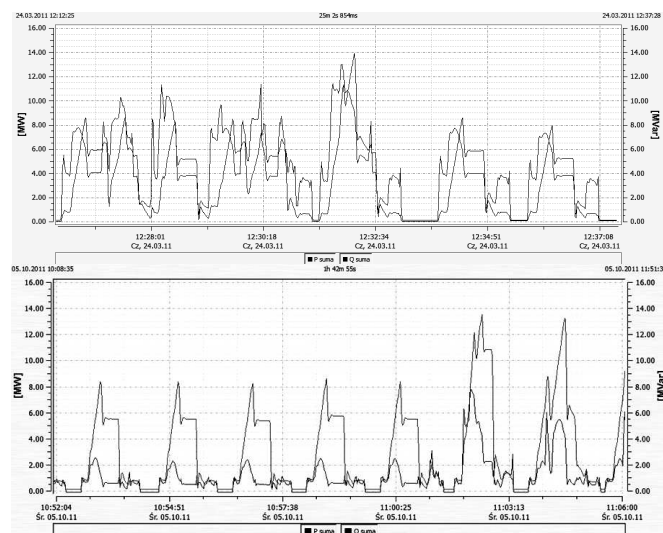


Rys. 8. Schemat układu TSC 5550 kvar / 6,3 kV



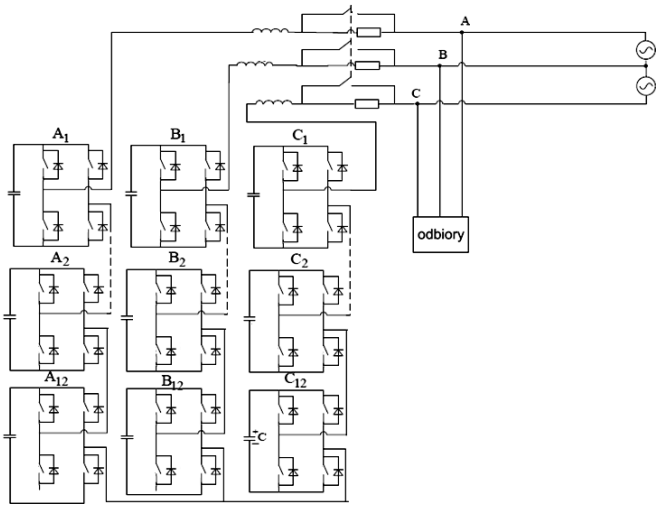
Rys. 9. Człony kondensatorowe układu TSC

Na rysunku 9 przedstawiono fotografię członów kondensatorowych układu TSC maszyny wyciągowej. Skuteczność działania układy TSC została zilustrowana wykresami zmian mocy czynnej P (linia czerwona) i mocy biernej Q (linia niebieska) dla stanu przed i po zastosowaniu kompensacji nadążnej (rys. 10). Wartość poboru mocy czynnej obniżyła się prawie czterokrotnie.

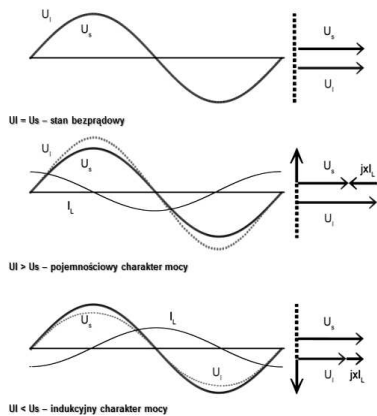


Rys. 10. Przebiegi poboru mocy czynnej i biernej przed i po zastosowaniu układu kompensacji nadążnej TSC

Układy STATCOM stanowią najnowocześniejsze i wciąż udoskonalane energoelektroniczne urządzenia do kompensacji mocy biernej. Pod względem elektrycznym, układ stanowi sterowane napięciem źródło prądu dodatkowego, którym jest falownik napięciowy. Obecne rozwiązania techniczne bazujące na technice tranzystorów IGBT umożliwiają zastosowanie systemów bezpośrednio włączonych do sieci średniego napięcia, bez konieczności stosowania transformatorów obniżających. Na rys. 11 pokazano topologię połączeń modułów tranzystorowych przedstawionych symbolicznie w postaci łączników $S_{n1} - S_{n4}$ dla każdej fazy A, B, C na poziomie średniego napięcia. Włączenie dławików szeregowych w każdej fazie L_{sa} , L_{sb} i L_{sc} zapewnia pracę układu jako kompensatora mocy biernej indukcyjnej lub pojemnościowej a w skrajnym przypadku układ może być w stanie bezprądowym (rys. 12).



Rys. 11. Uproszczony schemat układu STATCOM

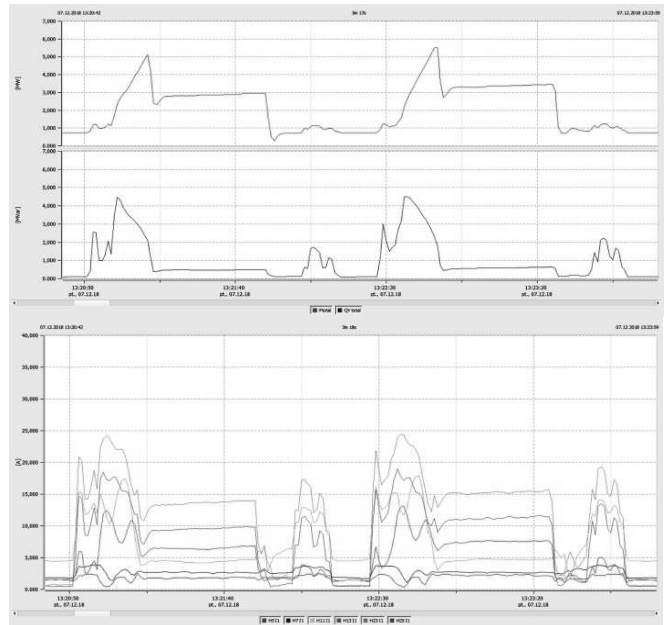


Rys. 12. Zasada działania układu STATCOM

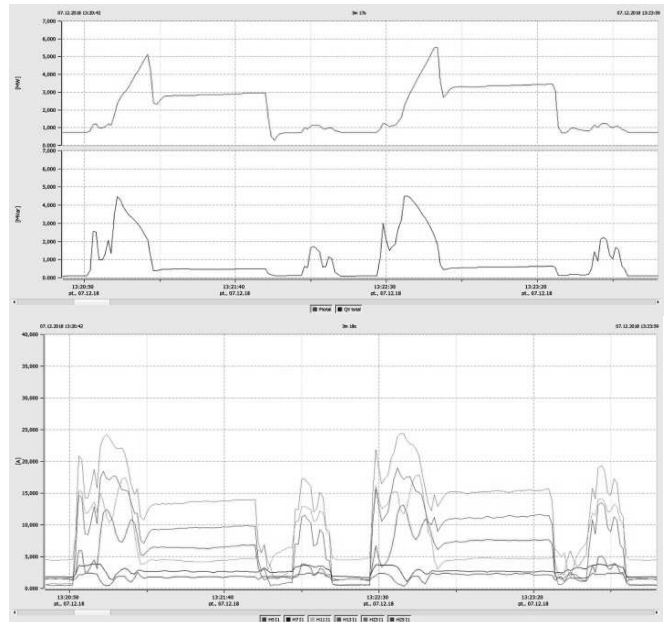
W porównaniu do rozwiązań tradycyjnych, układy STATCOM zapewniają:

- dużo mniejsze rozmiary instalacji,
- brak wzmocnienia wyższych harmonicznych, a wręcz możliwość częściowej ich kompensacji,
- brak zagrożenia ze strony wyższych harmonicznych do wystąpienia zjawisk rezonansowych,
- szybszy czas reakcji (5 – 10 μ s) umożliwia skuteczniejsze ograniczenie zjawiska migotania światła (nawet pięciokrotnie),
- bezstopniową regulację mocy biernej,
- możliwość działania zarówno jako urządzenie o charakterze pojemnościowym, jak i indukcyjnym,
- niewielki wpływ napięcia zasilającego na moc rzeczywistą – stanowiąc źródło prądowe, jego moc zmniejsza się liniowo wraz ze spadkiem wartości napięcia; w przypadku układów opartych na kondensatorach spadek mocy jest funkcją kwadratową stosunku napięcia zasilającego do napięcia znamionowego.

Efekty zastosowania układu STATCOM o mocy 2,5 Mvar/6,3 kV z funkcją kompensacji wyższych harmonicznych (1,8 Mvar kompensacja + 0,7 Mvar filtracja) przedstawiono na rysunkach 13 i 14 oraz w tabeli 3.



Rys. 13. Pobór mocy czynnej P (kolor czerwony), biernej Q (kolor niebieski) oraz poziomy harmonicznych prądu bez układu STATCOM



Rys. 14. Pobór mocy czynnej P (kolor czerwony), biernej Q (kolor niebieski) oraz poziomy harmonicznych prądu z układem STATCOM

Liczbowe wartości porównawcze dla obu stanów pracy maszyny wyciągowej pracującej bez układu STATCOM i z układem STATCOM zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości zarejestrowanych wyższych harmonicznych prądów odniesione do składowej podstawowej dla stanu pracy bez i z układem STATCOM.

Układ pracy	Maksymalne wartości prądów harmonicznych [A]					
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	I_{23}	I_{25}
bez STATCOM	3,75	4,23	35,22	29,26	20,15	16,45
ze STATCOM	2,51	3,89	17,82	13,07	24,34	19,00

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie wieloletnich doświadczeń w zakresie wdrażania układów do kompensacji mocy biernej, eliminacji generowanych wyższych harmonicznych prądów, należy stwierdzić, że:

- maszyny wyciągowe, jako obiekty o dużej mocy jednostkowej są odbiornikami niespokojnymi, charakteryzującymi się ciągłymi zmianami obciążenia w czasie krótkiego cyklu pracy,
- wyposażenie układu napędowego maszyny wyciągowej w sterowane prostowniki o topologii 6-cio lub częściej 12-to pulsowej staje się źródłem generacji zdeteminowanych wyższych harmonicznych prądu,
- najskuteczniejsze ograniczenie negatywnego oddziaływania maszyn wyciągowych na elektroenergetyczną sieć jest stosowanie układów TSC lub STATCOM (SVG), co wykazano w prezentowanych przebiegach mocy i odpowiednich harmonicznych na rysunkach 10, 13 i 14. Układy STATCOM dzięki swej specyficie sterowania umożliwiają bardzo szybką regulację oraz pozwalają na obniżenie stopnia asymetrii zasilania.

4. BIBLIOGRAFIA

1. Gierlotka S.: Rozwój napędu elektrycznego górniczych maszyn wyciągowych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 4/2016
2. Pacholski E.: Problemy eksploatacyjne występujące w elektroenergetycznych sieciach Oddziału Zakłady Wzbogacania Rud, Seminarium naukowo-techniczne Lubiatów, czerwiec 2001
3. Zaleśny P.: Możliwości modernizacji górniczych maszyn wyciągowych z zastosowaniem przekształtników tyrystorowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, 1992
4. Matyjasek Ł.: Kompensacja mocy biernej w zakładach górniczych. Filtracja aktywna i pasywna wyższych harmonicznych, Olsztyn, 2012

POWER FACTOR CORRECTION SYSTEMS FOR MINING HOISTS WITH SPECIAL CONSIDERATION OF STATCOM SYSTEMS

Mining hoists with thyristor drives are very specific, distributive and current harmonics generating electric loads. The relatively high power of these loads significantly affects the quality of electricity in the mine's supply and distribution systems. One of the most important problems is reactive power compensation in a harmonic environment. The article presents general technical solutions in this area.

Keywords: reactive power compensation, higher harmonics, winding machines, STATCOM systems.