

Włodzimierz Garski, Tomasz Kardys, Energotest sp. z o.o., Gliwice
Piotr Michalczyk, Andrzej Buczek, OPA-LABOR Sp. z o.o., Siemianowice Śląskie

NOWOCZESNE ROZWIĄZANIE WZBUDZENIA SILNIKA PRĄDU STAŁEGO MASZYNY WYCIĄGOWEJ GÓRNICZEGO WYCIĄGU SZYBOWEGO

THE MODERN SOLUTION FOR THE EXCITATION DC MINING HOIST MOTOR

Abstract: The paper presents simulations of control systems for reversible DC motor field current drive hoist. Using two anti-parallel connected thyristor bridges or transistor bridge was analyzed for this purpose. Furthermore, the above presented application of the transistor bridge circuit excited DC motor installed in mining hoist "Kazimierz I" KWK "Kazimierz-Juliusz" Sp. z o.o. The described system is manufactured and built by Energotest in 2010. Acceptance test was conducted by OPA-LABOR – which is expert in the mining plants and authorized to pursue researches and opinions on hoist area.

1. Wprowadzenie

Silnik prądu stałego, szczególnie obcowzbudny, znajduje szerokie zastosowanie w technice napędu elektrycznego. Wynika to z następujących właściwości tego silnika: łatwość konfigurowania układu zamkniętej regulacji ze sprzężeniem prądowym i prędkościowym, pozwalającym na dokładne odtworzenie zadanego wykresu prędkości oraz nastawę i kontrolę maksymalnej wartości prądu obwodu twornika i wzbudzenia, możliwość realizacji rewersu momentu napędowego [1, 3]. Maszyny wyciągowe pracują zawsze jako napędy nawrotne.

Rewersję prędkości obrotowej można uzyskać:

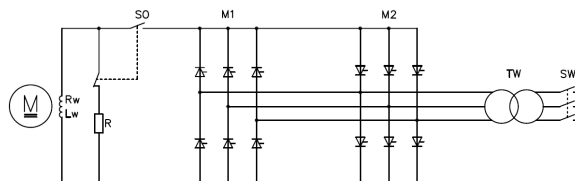
- w układzie przeciwsobnym (odwrotnie równoległym, przeciwrównoległym) zasilającym twornik przy stałym kierunku wzbudzenia,
- w układzie przeciwsobnym zasilającym wzbudzenie przy stałym kierunku zasilania twornika.

Użycie dwóch przekształtników w obwodzie twornika jest rozwiązaniem drogim i w związku z tym rzadko stosowanym. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest układ, w którym zmiana kierunku wirowania uzyskuje się przez rewersję prądu wzbudzenia.

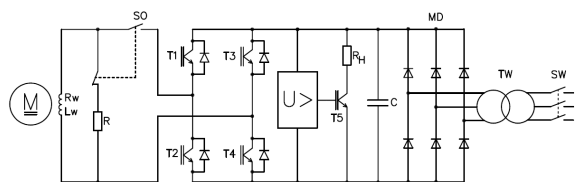
W referacie przedstawiono dwa warianty wykonania układu do rewersji prądu wzbudzenia: przeciwsobny tyrystorowy układ mostkowy oraz mostek tranzystorowy.

2. Konfiguracja układów do rewersji prądu wzbudzenia

Na rys. 1 przedstawiono mostki tyrystorowe połączone odwrotnie równoległe pracujące bez prądów wyrównawczych, a na rys. 2 mostek tranzystorowy.



Rys. 1. Dwa mostki tyrystorowe połączone odwrotnie równoległe



Rys. 2. Mostek tranzystorowy

Oznaczenia rys.1 i 2: *M* – silnik maszyny wyciągowej; *Rw*, *Lw* – rezystancja i indukcyjność obwodu wzbudzenia; *SO* – stycznik odwzbudzenia; *R* – rezystor odwzbudzenia; *M1*, *M2* - mostek tyrystorowy; *TW* – transformator wzbudzenia; *SW* – stycznik wzbudzenia; *T1-T4* – mostek tranzystorowy; *MD* – mostek diodowy; *U>*, *T5*, *R_H* – układ „hamowania”; *C* – kondensator impulsowy

Stosowane bezinercyjne układy sterowania prostowników tyrystorowych umożliwiają bardzo szybkie przejście z pracy prostownikowej do

falownikowej i odwrotnie, dzięki czemu dla uniknięcia prądu wyrównawczego można utrzymywać jeden mostek w pracy, a drugi zablokowany. Rewersję prądu uzyskuje się przez wysterowanie aktualnego mostka z pracy prostowniczej do falownikowej. Energia zgromadzona w indukcyjności wzbudzenia przepływa do sieci zasilającej i po osiągnięciu przez prąd zerowej wartości po niewielkim czasie zwłoki rzędu kilkunastu milisekund drugi mostek zostaje załączony do pracy prostowniczej i przejeżdża narastanie prądu w przeciwną stronę.

Mostek tranzystorowy sterowany jest metodą modulacji szerokości impulsów (PWM). Dla uzyskania jednego kierunku przepływu prądu załączane są tranzystory np. T1 i T4 na określony czas, prąd zaczyna narastać, po wyłączeniu tych tranzystorów prąd zaczyna płynąć przez diody włączone przeciwnoległe do tranzystorów T2 i T4 i ładuje kondensator C. Prąd wzbudzenia jest proporcjonalny do współczynnika wypełnienia wyrażonego wzorem (1):

$$\gamma = \frac{\text{czas_przewodzenia}}{\text{okres}} \quad (1)$$

W celu rewर्सji prądu, tranzystory T1 i T4 zostają na stałe wyłączone, kluczkowaniu zostają poddane tranzystory T2 i T3, energia wzbudzenia przez diody włączone przeciwnoległe do tranzystorów T2 i T3 ładuje kondensator C. Napięcie na nim wzrasta do poziomu kontrolowanego przez zabezpieczenie $U>$, po którego przekroczeniu tranzystor T5 włącza rezystor „hamowania” R_H . Rezystor ten jest tak dobrany, że absorbuje energię wzbudzenia, co powoduje obniżenie napięcia na kondensatorze C i wyłączenie tranzystora T5. Proces powtarza się do czasu osiągnięcia przez prąd wzbudzenia wartości zerowej. Dalej tranzystory T2 i T3 ustwiają pożądany prąd w przeciwną stronę. Przejście do pracy rewर्सyjnej odbywa się w sposób płynny bez czasu martwego, który jest potrzebny w wykonaniach tyrystorowych

3. Symulacje

Pokazane na rys. 1 i 2 układy poddano badaniom symulacyjnym. Założono następujące parametry wzbudzenia odpowiadające w przybliżeniu silnikowi o mocy 1MW:

$$I_{wn}=100A; U_{wn}=100V; R_w=1\Omega; L_w=1,5H$$

Parametry zastępcze transformatora TW: $r=2\%$; $x=3\%$

Napięcie strony wtórnej transformatora wzbudzenia dobrano:

- dla prostowników tyrystorowych (2):

$$U_{AC_tyr} = \frac{k_f \times U_{wn}}{\frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi} \times \cos(30^\circ)} \quad (2)$$

- dla mostka tranzystorowego (3):

$$U_{AC_tr} = \frac{k_f \times U_{wn}}{\frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi}} \times k_x \quad (3)$$

gdzie: k_f – współczynnik forsowania,
 k_x – wsp. korekcyjny z zakresu 1,04 – 1,1.

Zakres zmian kąta opóźnienia zapłonu dla prostowników tyrystorowych ograniczono do przedziału $\alpha=30^\circ \div 150^\circ$

Współczynnik korekcyjny k_x wybrano w celu uzyskania podobnego czasu narastania prądu wzbudzenia przy sterowaniu od 0 do 100A dla obu badanych układów. Symulacje przeprowadzono dla współczynnika forsowania z zakresu 2 ÷ 5 z krokiem 0,5.

Zabezpieczenie od wzrostu napięcia ($U>$) ustawiono na 750 V z histerezą 40 V.

Przyjęto regulator typu PI (proporcjonalno całkujący) i dobrano jego transmitancję zapewniającą maksymalnie szybkie nastawianie prądu wzbudzenia bez przeregulowań.

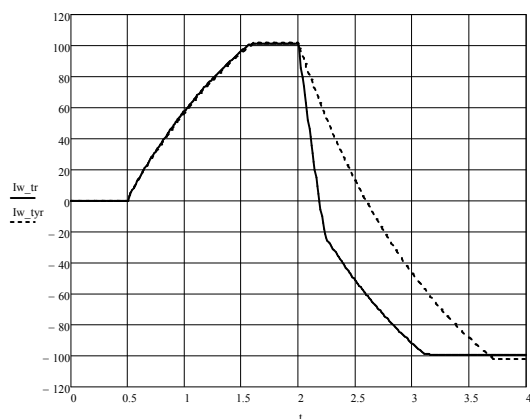
Na rys. 3 i 4 przedstawiono przebiegi prądu wzbudzenia po skokowych zmianach wartości zadanej w 0,5 sek +100 A i w 2 sek -100 A, dla dwóch współczynników forsowania.

Czas narastania prądu na rys. 3 dla obu układów jest taki sam i wynosi 1,08 sek. Natomiast czas rewर्सji dla układu tranzystorowego wynosi 1,1 sek a dla tyrystorowego 1,7 sek. Różnica czasów wynika z większego napięcia w czasie rewर्सji w układzie tranzystorowym, które wynosi -750 V i jest ustalane przez zabezpieczenie $U>$. Nie zależy ono od napięcia zasilającego dostarczanego przez transformator TW. Natomiast dla układu tyrystorowego, napięcie to w czasie rewर्सji przy pominięciu spadku napięcia związanego z komutacją tyrystorów, wynosi

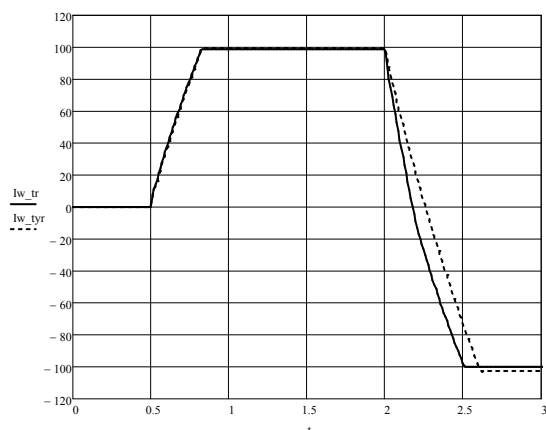
$$U_{max} = k_f \cdot U_{wn} \cdot \cos(\alpha) = -173,2 \text{ V} \quad (4)$$

Jest ono 4,33 razy niższe niż w układzie tranzystorowym (przy współczynniku forsowania 2). Różnica napięć rewर्सji utrzymuje się przez

czas zanikania prądu do zera a następnie stopniowo zanika w trakcie wzrostu wzbudzenia. Przy większych współczynnikach forsowania różnice są mniejsze co widać na rys.4. Czas narastania prądu na rys. 4 wynosi 0,32 sek, a rewersja 0,5 sek i 0,61 sek.



Rys. 3. Narastanie i rewersja prądu wzbudzenia przy $k_f=2$



Rys. 4. Narastanie i rewersja prądu wzbudzenia przy $k_f=5$

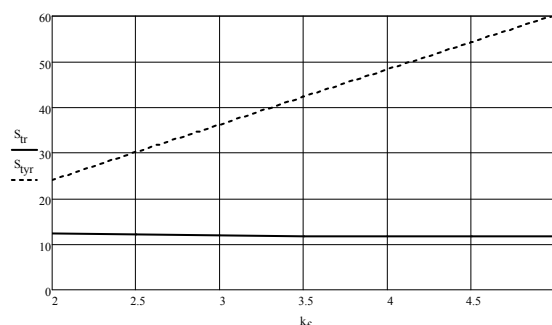
W tabeli 1 przedstawiono przyjęte do symulacji napięcia trójfazowe (U_{AC}) zasilające mostki M1, M2 i MD dla różnych współczynników forsowania. Przy ustawionym na 100A prądzie wzbudzenia, obliczono w czasie symulacji pobierany prąd skuteczny (I_{AC}), następnie obliczono potrzebną moc pozorną do zasilania obu układów (5)

$$S_{TW} = \sqrt{3} \times U_{AC} \times I_{AC} \quad (5)$$

Wyniki umieszczono w tabeli 1 i przedstawiono na rys.5.

Tabela 1. Parametry zasilania przy różnych współczynnikach forsowania i $I_w=I_{wn}$

k_f	-	2	3	4	5	
Mostek tyristorowy	U_{AC}	V	171,1	256,6	342,1	427,7
	I_{AC}	A	81,4	81,5	81,5	81,4
	S_{TW}	kVA	24,1	36,2	48,3	60,3
Mostek tranzystorowy	k_x	-	1,04	1,06	1,073	1,1
	U_{AC}	V	154,1	235,6	318,0	407,4
	I_{AC}	A	45,9	29,3	21,3	16,7
	S_{TW}	kVA	12,3	12,0	11,7	11,8



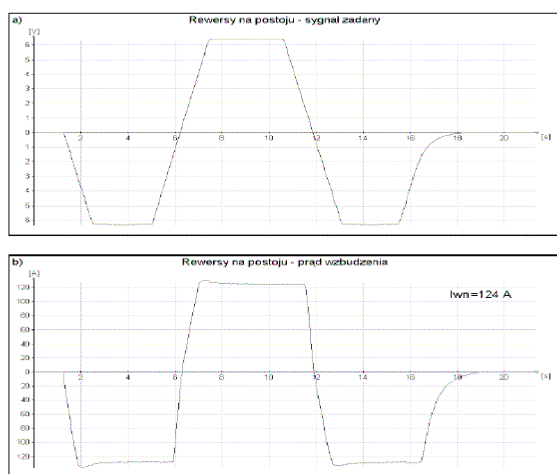
Rys. 5. Moc transformatora [kVA] w funkcji współczynnika forsowania

4. Instalacja na obiekcie

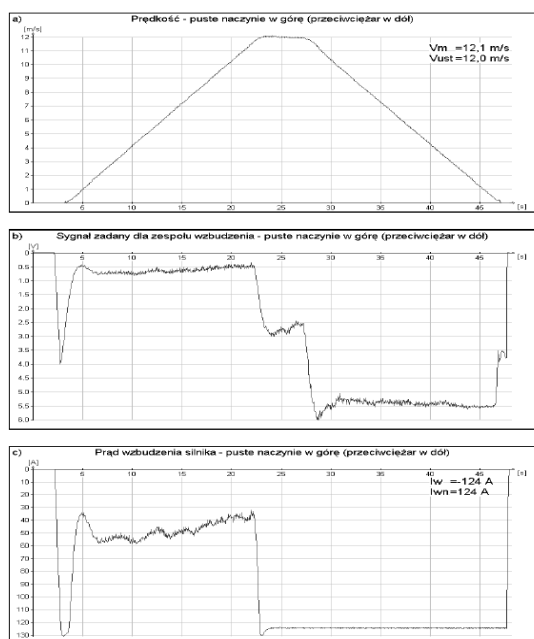
Pierwszy rewersyjny układ wzbudzenia silnika DC maszyny wyciągowej, w którym zastosowano mostek tranzystorowy sterowany sygnałem PWM zainstalowano w KWK Kazimierz-Juliusz szyb „Kazimierz-I” pod koniec 2010r. W ten sposób zastąpiono zawodny układ dwóch przekształtników tyrystorowych połączonych przeciwsobnie. Spełniono założenie minimalnej ingerencji w istniejące pozostałe układy sterowania, regulacji i zabezpieczeń obiektu. Układy te zrealizowano w oparciu o system „Jantar 80”. Na rys. 6 przedstawiono widok tego układu. Układ jest ze 100% redundancją w zakresie wzmacniacza tranzystorowego i układu sterowania. Transformator wzbudzenia dobrano tak aby uzyskać współczynnik forsowania 4,5. Na rys. 7, 8, 9 przedstawiono rejestracje uzyskane po zainstalowaniu układu na obiekcie. Sygnał wyjściowy z regulatora obrotów jest wartością zadaną dla regulatora prądu wzbudzenia i regulatora prądu twornika.



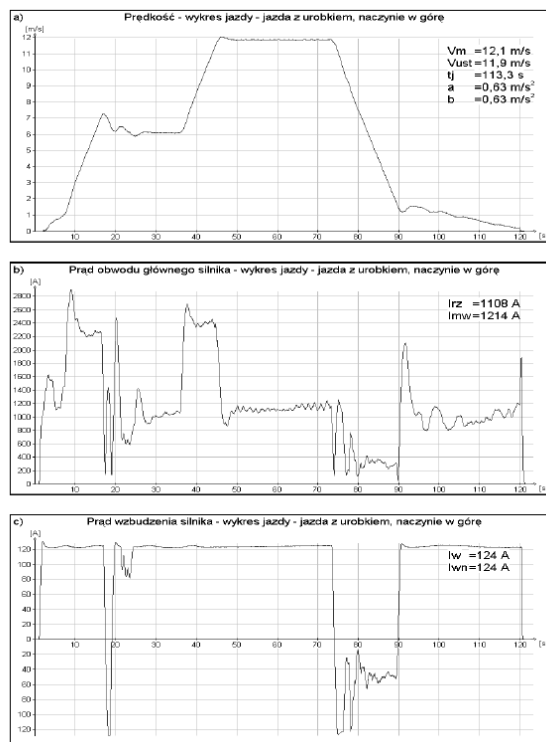
Rys. 6. Wykonanie tranzystorowego rewersyjnego układu wzbudzenia



Rys. 7. Rewersja prądu wzbudzenia na postoju: a) wartość zadana prądu twornika i wzbudzenia, b) prąd wzbudzenia [4]



Rys. 8. Jazda pustej klatki w górę: a) prędkość, b) wartość zadana prądu twornika i wzbudzenia, c) prąd wzbudzenia [4]



Rys. 9. Jazda z urobkiem: a) prędkość, b) prąd twornika, c) prąd wzbudzenia [4]

Na rys. 7 przedstawiono rewersję prądu wzbudzenia w czasie postoju napędu. Prąd wzbudzenia jest liniowo zależny od wartości zadanej w zakresie $-1,75 \text{ V} \div +1,75 \text{ V}$, odpowiada temu prąd $-124 \text{ A} \div +124 \text{ A}$, są to wartości graniczne. Czas rewersji prądu wynosi 1,1 sek. Przebiegi są podobne do uzyskanych podczas symulacji. Na rys. 8 przedstawiono jazdę pustej klatki w górę a na rys. 9 jazdę z urobkiem.

5. Podsumowanie

1. W celu przyspieszenia przebiegów przejściowych przy rewersji prądu wzbudzenia należy stosować duże współczynniki forsowania.
2. Układ mostkowy tranzystorowy jest szybszy od układu tyrystorowego.
3. Zapotrzebowanie na moc pozorną zasilającą jest znacznie mniejsze dla układu tranzystorowego.
4. Stosując tranzystory z izolowaną bramką (IGBT) z układami sterowania wyposażonymi w szybkie zabezpieczenie zwarcia można uzyskać odporność układu na zwarcia zewnętrzne jak również odporność na krótkotrwałe zakłócenia w sterowaniu. Cech tych nie posiada układ zrealizowany na konwencjonalnych tyrystorach, który może być chroniony tylko szybkimi bez-

piecznikami. W przypadku wystąpienia wspomnianych zakłóceń nastąpi przepalenie bezpiecznika i niesprawność układu tyrystorowego do pracy. Koszt układu z mostkiem tranzystorowy jest porównywalny do realizacji na tyrystorach.

5. Przedmiotowy układ tranzystorowy od kilku miesięcy pracuje poprawnie. W chwili pisania niniejszego artykułu odbywa się jego ruch próbny, zgodnie z procedurą określoną przez organy nadzoru górniczego. Stanowi on alternatywę dla stosowanych powszechnie układów tyrystorowych.

6. Literatura

- [1]. Tunia H., Winiarski B.: *Podstawy energoelektroniki*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987r.
- [2]. Tunia H., Barlik R.: *Teoria przekształtników*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003r.
- [3]. Szklarski L., Zarudzki J.: *Elektryczne maszyny wyciągowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN 1998r.
- [4]. Przedsiębiorstwo „OPA-LABOR” Sp. z o.o.: *Sprawozdanie z badania maszyny wyciągowej szybu Kazimierz-I KWK Kazimierz-Juliusz Sp. z o.o. po zabudowie zespołu wzbudzenia typu ETW 1,1C*.
- [5]. Przedsiębiorstwo „OPA-LABOR” Sp. z o.o.: *Karta regulacji maszyny wyciągowej szybu Kazimierz-I KWK Kazimierz-Juliusz Sp. z o.o. Aktualizacja w zakresie regulacji wzbudzenia silnika wyciągowego*.