ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z.139 Nr kol.1247

Tadeusz GLINKA

Romuald GRZENIK

Zygmunt MOŁOŃ

UKŁAD NAPĘDOWY SKŁADAJĄCY SIĘ Z SILNIKA SZEREGOWEGO PRĄDU STAŁEGO I ŁĄCZNIKA TRANZYSTOROWEGO

Streszczenie. Tranzystory IGBT stwarzają nowe możliwości sterowania silnikami szeregowymi prądu stałego. Wysoka częstotliwość impulsowania napięcia pozwala uzyskiwać dobre charakterystyki regulacyjne tak w zakresie pracy silnikowej, jak i hamulcowej, przy czym praca hamulcowa jest realizowana z oddawaniem energii do sieci zasilającej. W artykule przedstawiono dwa rozwiązania łączników tranzystorowych. Łącznik przedstawiony na rys. 1 umożliwia pracę rewersyjną napędu, a łącznik z rys.2 pracę jednokierunkową. Na rys.3 i 5 przedstawiono poglądowe przebiegi czasowe prądów i_f i i_a, a na rys.4 i 6 charakterystyki elektromechaniczne maszyny dla pracy silnikowej i hamulcowej.

DRIVE SYSTEM CONSISTING OF D.C. SERIES MOTOR AND D.C. STATIC TRANSISTOR CONVERTER

Summary. IGBT transistors provide new opportunities for controlling d.c. series motors. High-pulse frequency of voltage results in good control characteristics in booth running and braking operation ranges of the motor. The braking energy is recovered and returned to the network. Two possible solutions of transistor converters have been presented in the paper. The converter shown in Fig.1 allows the reversing of the motor, the converter shown in Fig.2 makes possible the unidirectional work only. Equations (1) to (6) desrible the time curses of excition current (i_f), armature current (i_a), electromagnetic torque (M) and rotational angular speed ω. Figs. 3 and 5 show typical time courses of current i_f and i_a while figs 4 and 6 show current-torque characteristics of the motor in running and braking ranges respectively.

ЭЛЕКТРОПРИВОД СОСТОЯЩИЙ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И ТРАНЗИСТОРНОГО КОММУТАТОРА

Резюме. Транзисторы ГСВТ создают новые возможности управления двигательями постоянного тока последовательного возбуждения. Высокая частота импульсирования напряжения дает возможность получить хорошие

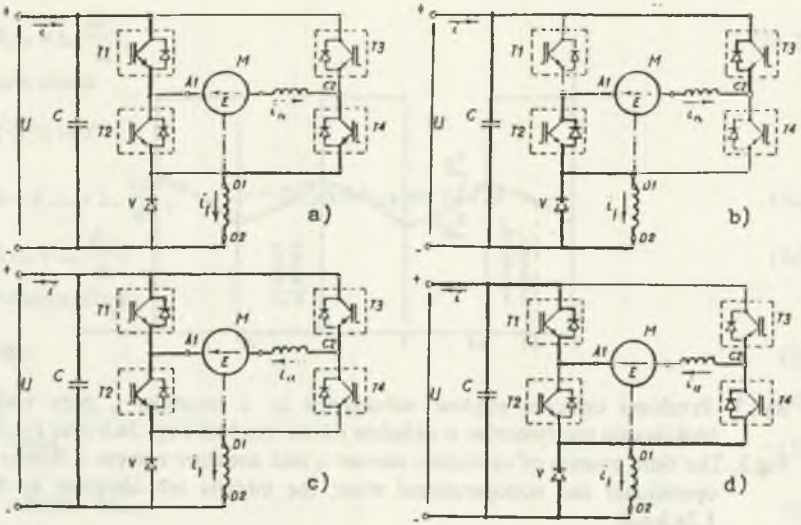
характеристики регулирования как в двигательном режиме, так и в режиме торможения, причем работа в режиме торможения осуществляется с возвратом энергии в сеть питания. В статье представлены два решения транзисторных коммутаторов. Коммутатор показанный на рис. 1, дает возможность реверсивной работы электропривода, а коммутатор показанный на рис. 2, - односторонной работы. На рис. 4 и 6 иллюстрируются характеристики I = f(M) для работы в двигательном режиме и в режиме торможения.

1. WPROWADZENIE

Tranzystory IGBT stwarzają nowe możliwości sterowania i regulacji trakcyjnymi układami napędowymi z silnikami szeregowymi prądu stałego. Wysoka częstotliwość impulsowania napięcia (około 16 kHz) nadaje układowi napędowemu nowe cechy i właściwości, których nie można było uzyskać przy zasilaniu tradycyjnym. W referacie przedstawiono dwa wariantowe rozwiązania układów impulsowania napięcia, układ dwukierunkowy (mostkowy) z dwoma gałęziami tranzystorów IGBT i układ jednokierunkowy z jedną gałęzią tranzystorów IGBT. Obydwa rozwiązania zapewniają pracę napędu zarówno silnikową, jak i hamulcową z rekuperacją energii do sieci trakcyjnej.

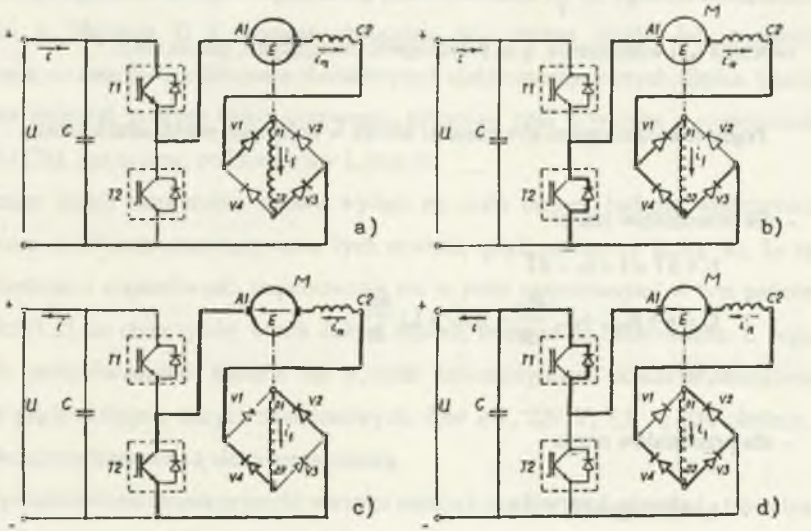
2. PRACA SILNIKOWA

Na rysunku 1 przedstawiono schematy ideowe obwodu głównego łącznika tranzystorowego IGBT,w układzie mostkowym dla jednego założonego kierunku wirowania silnika. Na kolejnych schematach (linie pogrubione) przedstawiono obwody przepływu prądu silnika przy pracy silnikowej i wysterowaniu tranzystorów T1, T4 (rys.1a) i blokowaniu tranzystorów (rys.1b) oraz dla pracy hamulcowej (hamowanie prądnicowe) przy wysterowaniu tranzystorów T2, T3 (rys.1c) i blokowaniu tranzystorów (rys.1d). Przy drugim kierunku wirowania role tranzystorów T2,T3 i T1,T4 zmieniają się. Na rys.2 przedstawiono schematy ideowe obwodu głównego łącznika tranzystorowego jednokierunkowego. Podobnie jak na rys.1, linią pogrubioną zaznaczono obwody przepływu prądu przy pracy silnikowej (rys.2a,b) i hamulcowej (rys.2 c,d).



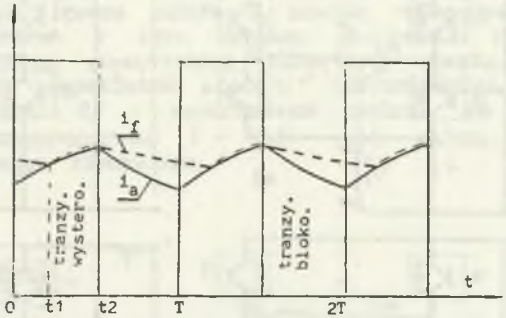
Rys.1. Schematy ideowe łącznika tranzystorowego rewersyjnego a, b - praca silnikowa; c, d - praca hamulcowa

Fig.1. The circuit diagram of transistor reversible converter: a, b - running range; c, d - braking range



Rys.2. Schematy ideowe łącznika tranzystorowego jednokierunkowego, b - praca silnikowa; c, d - praca hamulcowa

Fig.2. The circuit diagram of unidirectional transistor: a, b - running range; c, d - braking range



Rys.3. Przebiegi czasowe prądów wzbudzenia i_f i twornika i_a przy wysterowaniu i blokowaniu tranzystorów w układzie jak na rys.1a,b i rys.2a,b oraz rys.2c,d

Fig.3. The time courses of excitation current i_f and armature current i_a during the transistor operational and nonoperational state; the circuits are identical to those in Figs. 1,2a,b,c,d.

Cykliczne wysterowywanie i blokowanie tranzystorów T1 i T4 (rys.1a,b) lub T2 (rys.2a,b) z częstotliwością $f = \frac{1}{T}$ około 16 kHz powoduje, że w stanie ustalonym przebiegi prądów twornika i_a, i wzbudzenia i_f są przebiegami pulsującymi, jak na rys.3.

Prądy te można opisać równaniami silnika w kolejnych przedziałach czasu

- dla przedziałów czasu:

$$t_1 + nT < t < t_2 + nT$$

$$U = e + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \tag{1a}$$

$$i_a = i_f$$

- dla przedziałów czasu:

$$t_2 + nT < t < (n+1)T$$

$$(-U) = e + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad \text{dla układu z rys.1b} \tag{1b-1}$$

$$0 = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \tag{2b-1}$$

$$0 = e + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad \text{dla układu z rys.2b} \tag{1b-2}$$

$$0 = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \tag{2b-2}$$

- dla przedziału czasu:

$$0+nT<t<t_1+nT$$

$$U = e + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad \text{dla układu z rys.1a i 2a} \tag{1c}$$

$$0 = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}. \tag{2c}$$

Pozostałe równania silnika

$$e = c\Phi\omega \tag{3}$$

$$\Phi = f(i_f) \tag{4}$$

$$M(t) = c\Phi i_a \tag{5}$$

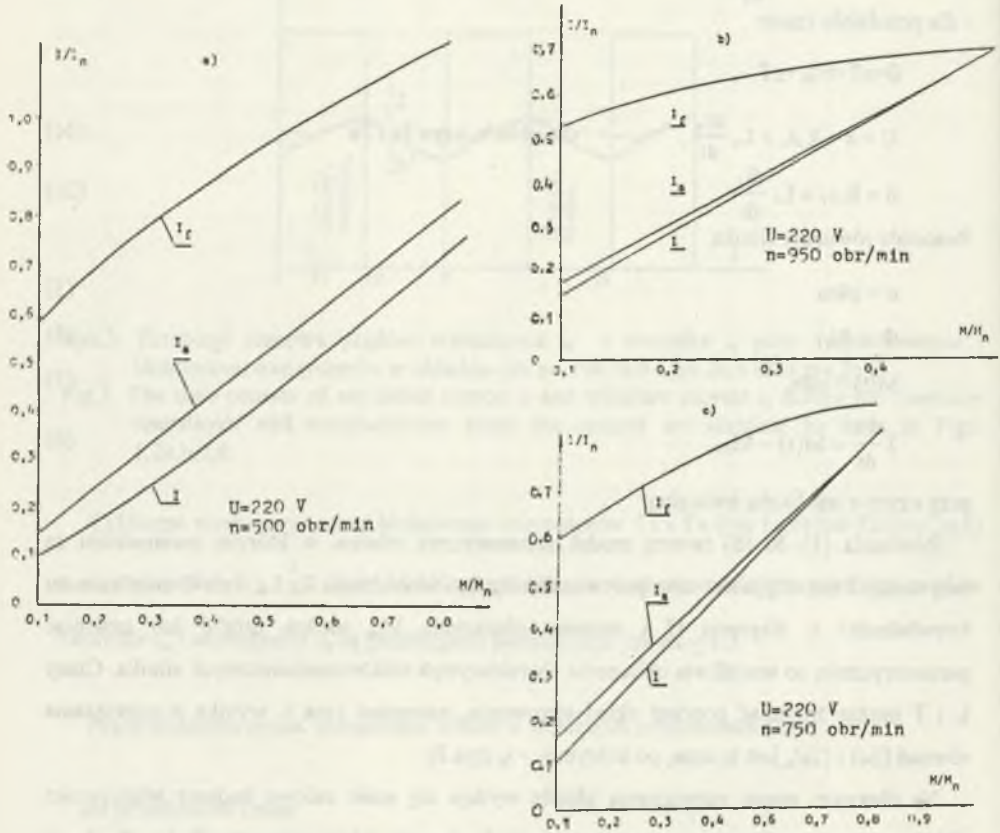
$$J\frac{d\omega}{dt} = M(t) - M_{ob}, \tag{6}$$

przy czym n jest liczbą naturalną.

Równania (1) do (6) tworzą model matematyczny silnika, w którym parametrami są rezystancje i indukcyjności uzwojeń twornika R_a, L_a i wzbudzenia R_f, L_f, stała C oraz moment bezwładności J. Napięcie U i moment obciążenia M_{ob} można ustalić lub zmieniać parametrycznie, co umożliwia obliczenie charakterystyk elektromechanicznych silnika. Czasy t_2 i T można zmieniać poprzez układ sterowania, natomiast czas t_1 wynika z rozwiązania równań (1c) i (2a), jest to czas, po którym $i_f = i_a$ (rys.3).

Na obecnym etapie rozpoznania układu wydaje się mało celowe badanie właściwości układu poprzez analityczne rozwiązywanie tych równań, gdyż parametry R_a,L_a, R_f, L_f są złożonymi funkcjami częstotliwości impulsowania nie w pełni rozpoznanymi w tym paśmie częstotliwości [1,2], co obarczyłoby wynik dużym błędem, trudnym do oszacowania. Z tego też względu przeprowadzono badania na modelu laboratoryjnym układu z silnikiem szeregowym prądu stałego o danych znamionowych: 0,64 kW, 220 V; 3,8 A; 720 obr/min. Silnik był obciążony hamownicą elektromaszynową.

Na rys.4 przedstawiono charakterystyki wartości średnich prądów: wzbudzenia I_f, twornika I_a i prądu pobieranego ze źródła zasilania funkcji momentu obciążenia. Pomiary wykonano przy stałym napięciu zasilania U = 220 V i trzech prędkościach obrotowych 500; 750 i 950 obr/min.

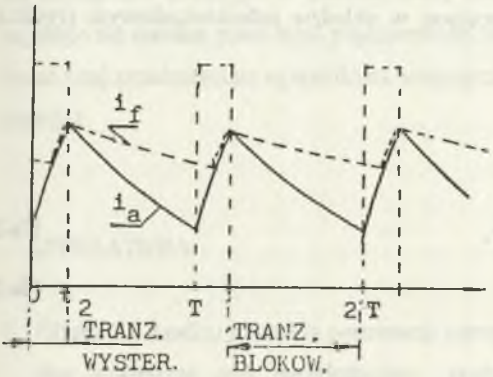


Rys.4.Charakterystyki I=f(M) silnika pracującego w układzie jak na rys.1a,b

Fig.4. Current - torque characteristics of the motor wired as in fig.1a,b

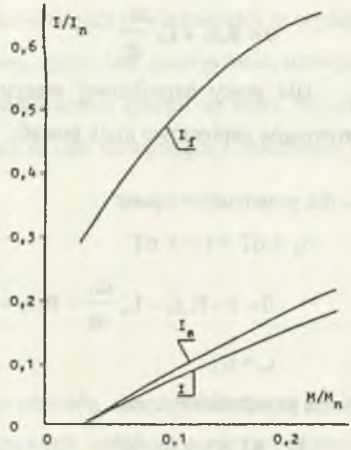
3. PRACA HAMULCOWA

W układzie mostkowym przedstawionym na rys.1c,d przy pracy hamulcowej uzyskuje się przebiegi czasowe prądów twornika i_a i wzbudzenia i_f jak na rys.5. Przebiegi te są praktycznie niezależne. Natomiast w f układzie jednokierunkowym (rys.2c,d) przebiegi prądów i_a i i_f są zbliżone do pokazanych na rys.3.



Rys.5. Przebiegi czasowe prądów wzbudzenia i_f i twornika i_a przy wysterowaniu i blokowaniu tranzystorów w układzie jak na rys.1c,d (praca hamulcowa)

Fig.5. The time courses of excitation current I_f during the transistor operational and nonoperational state; the circuits are identical to those in Figs. 1c,d (braking-range)



Rys.6. Charakterystyki I=f(M) silnika pracującego w układzie jak na rys. 1c,d (praca hamulcowa)

Fig.6. Current-torque characteristics of the motor wired as in Fig. 1c,d (braking-range)

Dla pracy hamulcowej maszyny pracującej w układzie mostkowym (rys.1a,b) równania napięciowe mają postać

- dla przedziałów czasu (rys.1c)

$$0 + nT < t < t_2 + nT, \tag{7a-1}$$

$$0 = e - R_a i_a - L_a \frac{di_a}{dt},$$

$$U = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \tag{8a-1}$$

- dla przedziałów czasu (rys.1d):

$t_2 + nT < t < (n+1)T$

$$U = e - R_a i_a - L_a \frac{di_a}{dt}, \tag{7b-1}$$

$$0 = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}. \tag{8b-1}$$

Dla pracy hamulcowej maszyny pracującej w układzie jednokierunkowym (rys.2c,d) równania napięciowe mają postać:

- dla przedziałów czasu:

$t_1 + nT < t < + nT$

$$0 = e - R_a i_a - L_a \frac{di_a}{dt} - R_f i_f - L_f \frac{di_f}{dt}, \tag{7a-2}$$

$$i_a = i_f, \tag{8a-2}$$

- dla przedziałów czasu

$t_2 + nT < t < (n+1)T$

$$U = e - R_a i_a - L_a \frac{di_a}{dt}, \tag{7b-2}$$

$$0 = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \tag{8b-2}$$

- dla przedziałów czasu

$0 + nt_1 < t < t_1 + nT$

$$0 = e - R_a i_a - L_a \frac{di_a}{dt}, \tag{7c-2}$$

$$0 = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}. \tag{8c-2}$$

Równania (3) do (6) pozostają bez zmiany. Podobnie jak dla pracy silnikowej, badanie właściwości napędu przy pracy hamulcowej ograniczono do badań modelowych. Na rys.6 przedstawiono charakterystyki prądów I_f, I_a, I w funkcji momentu hamującego przy U = 220 V i n = 530 obr/min.

4. WNIOSKI

Zasilając silniki szeregowe prądu stałego napięciem pulsującym o dużej częstotliwości pulsacji można uzyskać układ napędowy o nowych właściwościach . Właściowści te wydają się szczególnie atrakcyjne w zakresie pracy hamulcowej, gdyż bez przełączania uzwojeń uzyskuje się stabilną pracę typu prądnicowego, tzn. z oddawaniem energii do sieci. Wyniki badań tutaj przedstawione są wynikami wstępnymi, jednak są one zachęcające i należałoby je rozwijać.

LITERATURA

1. Glinka T.: Analiza równania permeancji szeregowego obwodu magnetycznego ze szczeliną powietrzną przy uwzględnieniu prądów wirowych indukowanych w rdzeniu. Archiwum Elektrotechniki 1975, nr 1.
2. Glinka T.: Zależność stałej czasowej obwodu prądów wirowych wzbudzanych w ferromagnetycznym elemencie litym od stopnia nasycenia tego elementu. Archiwum Elektrotechniki 1983, nr 1/2, s. 97-103.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Teresa Orłowska-Kowalska

Wpłynęło do Redakcji 11 kwietnia 1994

Abstract

D.c. traction motors are usually supplied from the catenary via starting resistors or power electronics converters (choppers). Thyristor converters, which have been used for over twenty years, are characterized by output frequency of tens to hundreds cycles per second. Control strategies, thermal properties, commutation problems as well as torque-speed characteristics in this frequency range are relatively well-known. IGBT transistors provide new opportunities for controlling d.c. series motors. Pulse frequency of voltage is about two orders higher than in traditional thyristor choppers (c.15 kHz) and this results in some new drive properties,

which did not take place in motors with thyristor choppers. Two possible solutions of transistor converters have been presented in this paper. The converter shown in Fig.1 allows the reversing of the motors, the converter shown in Fig.2 makes possible unidirectional work only. The mathematical model of the motor-converter unit is given by equations (1) to (8). This model gives only a sketchy idea of the problem, since the electromagnetic occurences in the motor are only imperfectly known as of today. The quantities R_a, L_a, R_f, L_f depend on switching frequency and in this particular frequency range have not been properly estimated as yet. It is probable that capacity couplings between the windings should also be considered. Laboratory model consisting of d.c. series motor rated at 0.64 kW, 220 V, 3.8 A, 729 rpm and transistor converter (Fig.1) with switching frequency of 16 kHz has been investigated. This system has shown very interesting properties both in the running and braking ranges. The control of excitation current i_f by means of switching frequency has been identified. This effect has not occured in thyristor converters. It influences the braking of the motor. The stable braking work of generator type is achieved without the necessity of windings' switching (Figs.5 and 6). The tests presented in the paper were carried out on the low-power motor and thus do not constitute the full solution of the problem.