

Stanisław AZAREWICZ¹⁾, Krzysztof PIENKOWSKI²⁾, Adam ZALAS³⁾

BADANIE STANÓW PRACY SILNIKOWEJ I HAMOWANIA ODZYSKOWEGO W PRZEKSZTAŁNIKOWYM UKŁADZIE NAPĘDOWYM Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM KLATKOWYM

Streszczenie. Przedstawiono opis przekształtnikowego układu napędowego złożonego z silnika indukcyjnego klatkowego, falownika napięcia MSI oraz urządzenia energoelektronicznego do zwrotu energii elektrycznej z obwodu pośredniczącego falownika do trójfazowej sieci zasilającej. Omówiono ekonomiczne aspekty wyboru układu hamowania i celowości stosowania urządzenia do zwrotu energii podczas stanów hamowania elektrycznego silnika indukcyjnego. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przekształtnikowego układu napędowego, sterowanego przez falownik napięcia MSI dla stanów pracy silnikowej i hamowania odzyskowego silnika indukcyjnego.

INVESTIGATIONS OF MOTOR AND REGENERATION OPERATION IN DRIVE SYSTEM WITH INVERTER-FED INDUCTION MOTOR AND POWER FEEDBACK UNIT

Summary. The drive system consisting of a squirrel-cage induction motor, a PWM voltage source inverter and a power feedback unit used for recuperation of braking energy from a dc circuit to the three-phase mains is described. The economical criterion for selecting the braking scheme and application of a power feedback unit are discussed. The results of experimental investigations of the motor and regenerative braking operations of the drive system with inverter-fed induction motor and power feedback unit are presented.

Key words: Induction motor, converter system, regenerative braking, experimental investigations.

1. WSTĘP

W układach napędowych z zastosowaniem przekształtników częstotliwości do sterowania prędkości kątovej silników indukcyjnych mogą występować stany pracy generatorowej silnika indukcyjnego (stany hamowania nadsynchronicznego) [6]. Stany te mogą być wywołane czynnym działaniem momentu mechanicznego maszyny roboczej, który powoduje zwiększenie prędkości kątovej wirnika ponad prędkość synchroniczną i przejście silnika do pracy przy ujemnych wartościach poślizgu. Podobne warunki pracy mogą występować w stanach przejściowych przy zmniejszaniu częstotliwości napięcia wyjściowego z falownika w celu zmniejszenia prędkości kątovej lub zatrzymania silnika. Podczas tego rodzaju stanów pracy energia mechaniczna jest przez silnik indukcyjny zamieniana na energię elektryczną, a następnie przekazywana w postaci energii elektrycznej prądu stałego do obwodu pośredniczącego falownika napięcia. Energia ta jest gromadzona w kondensatorze w obwodzie pośredniczącym falownika. Przy dużej ilości tej energii może wystąpić nadmierny wzrost napięcia na tym kondensatorze, który jest niebezpieczny dla elementów układu energoelektrycznego oraz silnika indukcyjnego. W przetwornicach częstotliwości z modulacją MSI obwód pośredniczący falownika jest zasilany przez prostownik nie sterowany (diodowy), który nie pozwala na zwrot energii hamowania do trójfazowej sieci zasilającej. W typowych układach sterowania częstotliwościowego z falownikami napięcia energia ta jest wytracana w postaci strat mocy na sterowanym impulsowo rezystorze hamowania, który jest

¹⁾ Dr inż., Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw, tel.: 071 320 38 06, fax: 071 320 34 67

²⁾ Dr inż., Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw, tel.: 071 320 33 52, fax: 071 320 34 67, e-mail: kpien@imne.pwr.wroc.pl

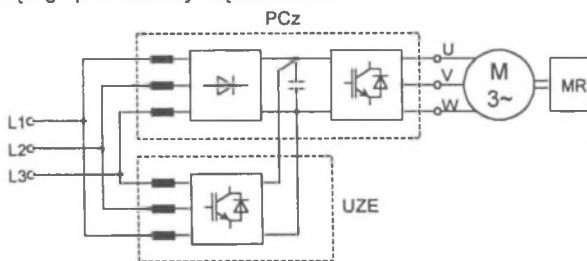
³⁾ Dr inż., Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw, tel.: 071 320 38 06, fax: 071 320 34 67

dołączany do obwodu pośredniczącego falownika podczas hamowania. Jest to rozwiązanie nieekonomiczne, szczególnie w napędach dużej mocy.

Obecnie coraz częściej dąży się do stosowania układów, zapewniających możliwość odzyskiwania energii hamowania i jej zwracania do sieci zasilającej [6]. Najkorzystniejszym rozwiązaniem pod względem technicznym jest w tym przypadku zastosowanie przetwornicy częstotliwości, w której prostownik nie sterowany, zasilający obwód pośredniczący falownika napięcia, jest zastąpiony przez przekształtnik AC/DC o dwukierunkowym przepływie energii elektrycznej [1,6]. Przekształtniki tego rodzaju są jeszcze przedmiotem badań naukowych i nie są powszechnie stosowane w układach przemysłowych [2,4,5,7]. Z tych względów duże znaczenie mają takie układy hamowania, które mogą być zastosowane w konwencjonalnych układach napędowych bez konieczności wprowadzania jakichkolwiek zmian lub przełączeń w obwodach głównych przetwornicy częstotliwości lub w jej układzie sterowania. W pracy tej przedstawiono opis tego rodzaju układu przekształtnikowego oraz wybrane wyniki wykonanych badań laboratoryjnych tego układu.

2. PRZEKSZTAŁTNIKOWE UKŁADY NAPĘDOWE Z URZĄDZENIEM DO ZWROTU ENERGII ELEKTRYCZNEJ HAMOWANIA

W tradycyjnych układach hamowania odzyskowego silnika indukcyjnego z przetwornicą do zwrotu energii elektrycznej z obwodu pośredniczącego do sieci trójfazowej jest stosowany dodatkowy tyrystorowy prostownik sterowany o komutacji sieciowej. Prostownik ten jest przyłączany przeciwnie do prostownika nie sterowanego przetwornicy częstotliwości i pracuje w zakresie pracy falownikowej (inwerterowej). Niekorzystną cechą zastosowania tyrystorowego prostownika sterowanego jest generowanie zakłóceń w sieci zasilającej i praca z małym współczynnikiem mocy, czyli z poborem dużej mocy biernej. Wyeliminowanie tych niekorzystnych właściwości można uzyskać, jeżeli zamiast prostownika tyrystorowego zostanie zastosowany tranzystorowy przekształtnik energoelektroniczny DC/AC. Obwody główne tego przekształtnika są pod względem topologicznym identyczne z obwodami głównymi falownika napięcia MSI przetwornicy. Przekształtniki tego rodzaju są produkowane fabrycznie jako specjalne urządzenia do zwrotu energii elektrycznej podczas stanów hamowania odzyskowego silnika indukcyjnego z przetwornicą częstotliwości [8]. Podstawowy schemat przekształtnikowego układu sterowania częstotliwościowego silnika indukcyjnego z zastosowaniem urządzenia do zwrotu energii UZE przedstawiono na rys.1. Obwody prądu zmiennego urządzenia UZE są przyłączone do zacisków trójfazowej sieci zasilającej, a obwody prądu stałego do wyprowadzonych na zewnątrz zacisków obwodu pośredniczącego przetwornicy częstotliwości.

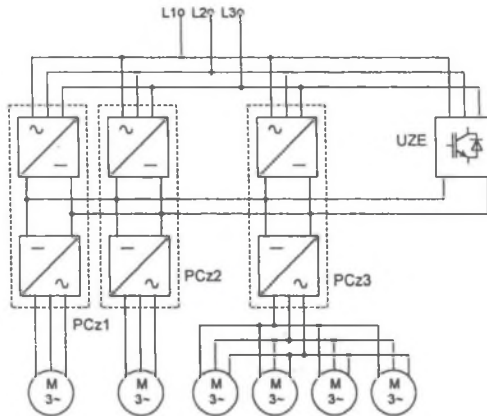


Rys.1. Przekształtnikowy układ sterowania częstotliwościowego silnika indukcyjnego z urządzeniem do zwrotu energii elektrycznej do sieci trójfazowej w stanach hamowania odzyskowego (PCz - przetwornica częstotliwości, UZE - urządzenie do zwrotu energii elektrycznej)

Fig.1. Power converter drive system with frequency controlled induction motor and power feedback unit for braking energy regeneration (PCz - Frequency Converter, UZE - Power Feedback Unit)

W wielosilnikowym układzie napędowym, z silnikami sterowanymi indywidualnie lub grupowo z oddzielnych przetwornic częstotliwości (np. wielosilnikowego układu napędowego dźwigni), możliwe jest zastosowanie oddzielnych urządzeń do zwrotu energii dla każdej przetwornicy

częstotliwości. W niektórych przypadkach bardziej uzasadnione jest zastosowanie odpowiednio dobranego urządzenia do zwrotu energii, wspólnego dla całego układu napędowego. Urządzenie UZE jest wtedy przyłączone do sieci trójfazowej i do zacisków połączonych wzajemnie ze sobą obwodów pośredniczących poszczególnych przetwornic częstotliwości, jak przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Wielosilnikowy układ sterowania częstotliwościowego silników indukcyjnych z urządzeniem do zwrotu energii elektrycznej do sieci trójfazowej w stanach hamowania odzyskowego

Fig.2. Power converter drive system with frequency controlled induction motor groups and power feedback unit for braking energy regeneration

3. UZASADNIENIE CELOWOŚCI STOSOWANIA URZĄDZENIA DO ZWROTU ENERGII

Celowość zastosowania w przekształtnikowym układzie napędowym urządzenia do zwrotu energii elektrycznej hamowania wymaga rozpatrzenia zarówno odpowiednich kryteriów technicznych, jak i ekonomicznych. Do podstawowych czynników technicznych, które powinny zostać uwzględnione, należą: zwiększenie złożoności układu i sterowania, oddziaływanie na sieć zasilającą i inne układy [3], niezawodność pracy i bezpieczeństwo obsługi. Do typowych układów napędowych, w których uzasadnione jest rozpatrzenie możliwości stosowania urządzeń do zwrotu energii hamowania, należą: napędy dźwignic i dźwigów, wyciągów i wind, schodów ruchomych, wirówek, hamowni silników oraz układy napędowe o dużej wartości momentu bezwładności i dużej częstości zmian wartości lub kierunku prędkości kątowych wirnika. Do podstawowych czynników ekonomicznych wymagających uwzględnienia należą koszty oszczędności energii elektrycznej, jakie są uzyskiwane w układzie napędowym po zainstalowaniu i podczas eksploatacji urządzenia UZE. Wskaźnikiem ekonomicznym pozwalającym na analityczne ujęcie uzyskiwanych oszczędności energii elektrycznej jest czas amortyzacji danego urządzenia. Czas amortyzacji urządzenia do zwrotu energii elektrycznej może być określony na podstawie następujących zależności [8]:

$$A = (R_K - C_K) / E, \quad (1)$$

$$E = W K, \quad (2)$$

$$W = P_h t_c n_{ch} L_r L_d, \quad (3)$$

gdzie: A - czas amortyzacji (w dniach), R_K - koszty związane z zakupem i zainstalowaniem urządzenia do zwrotu energii, C_K - koszty związane z zakupem i zainstalowaniem innego układu do wytracania energii hamowania (np. układu ze sterowaniem impulsowo rezystorem hamowania), E - oszczędność kosztów energii elektrycznej w roku, W - oszczędność energii elektrycznej w roku, K - koszt jednostkowy energii elektrycznej, P_h - średnia moc hamowania określona dla jednego cyklu

hamowania, t_c - czas trwania jednego cyklu hamowania, n_{ch} - liczba cykli na godzinę, L_r - liczba roboczogodzin pracy urządzenia w dniu, L_d - liczba dni pracy urządzenia w roku.

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE UKŁADU NAPĘDOWEGO Z URZĄDZENIEM UZE

4.1. Opis układu pomiarowego

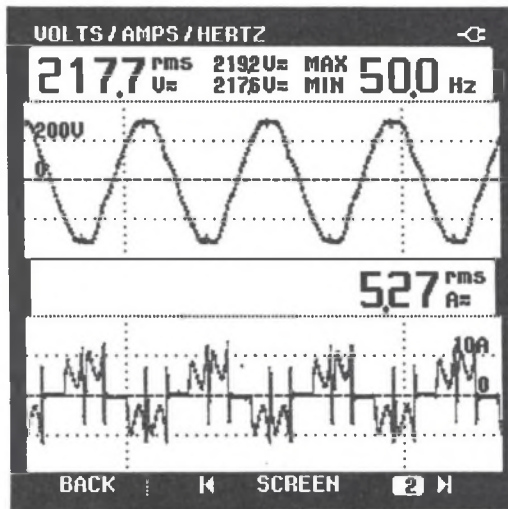
Celem badań eksperymentalnych przekształtnikowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym klatkowym i z urządzeniem do zwrotu energii było poznanie właściwości tego układu podczas stanów pracy silnikowej i hamowania odzyskowego. Badania wykonano w układzie napędowym, którego część mechaniczna była złożona z połączonych ze sobą mechanicznie trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego (typu SZJe 34a o mocy znamionowej 3 kW i prędkości znamionowej 1430 obr/min.) oraz obcowzbudnej maszyny prądu stałego (typu PZO 54a o mocy znamionowej 3.5 kW i prędkości znamionowej 1450 obr/min.). Silnik indukcyjny był zasilany z przemysłowej przetwornicy częstotliwości firmy Danfoss, typu VLT5006, 7.6 kVA, 3x380 V AC. Do obwodu pośredniczącego tej przetwornicy przyłączono urządzenie do zwrotu energii elektrycznej do sieci trójfazowej typu SVC22-400-1-230 V AC, 22 kW, 3x380-415 V AC, produkcji firmy REVCON (BRD)[8].

Podczas stanów pracy silnikowej układu napędowego maszyna prądu stałego pracowała jako obcowzbudna prądnica prądu stałego, zasilająca odbiornik rezystorowy w obwodzie twornika i stanowiła obciążenie mechaniczne silnika indukcyjnego. Podczas stanów hamowania obwód twornika maszyny prądu stałego był zasilany z regulowanego źródła napięcia stałego. Stan hamowania odzyskowego był wymuszony przez nastawianie za pomocą silnika prądu stałego prędkości kątowej wirnika silnika indukcyjnego wyższej od prędkości synchronicznej, odpowiadającej nastawionej częstotliwości napięcia wyjściowego z przetwornicy częstotliwości. Układ sterowania zastosowany w urządzeniu do zwrotu energii posiadał zdolność samoczynnego rozpoznawania stanu pracy generatorowej silnika i falownika. Podczas urządzenia nie było konieczne stosowanie jakichkolwiek przełączy w obwodach silnoprądowych lub w układzie sterowania badanego układu. Struktura topologiczna obwodów głównych zastosowanego urządzenia była identyczna ze strukturą obwodów głównych falownika napięcia w przetwornicy częstotliwości. W obwodach mocy jako elementy sterowane zastosowano tranzystory mocy IGBT. Tranzystory te były wyzwalane przez układ sterowania z zastosowaniem modulatora kołowo-pierścieniowego i z zachowaniem odpowiedniej synchronizacji z trójfazowym napięciem sieci zasilającej.

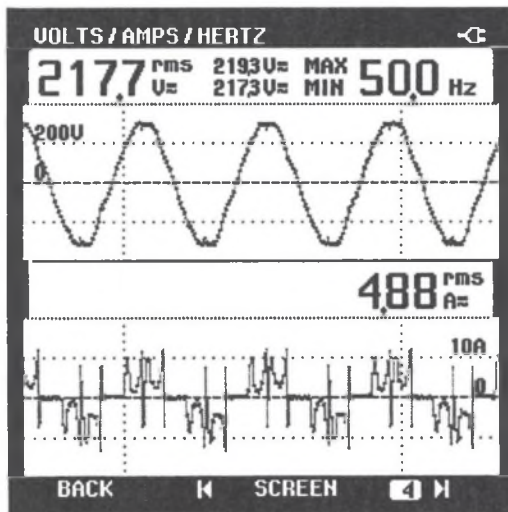
4.2. Wyniki badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne przekształtnikowego układu napędowego wykonano dla stanów pracy silnikowej i hamowania odzyskowego dla różnych nastawień częstotliwości napięcia wyjściowego z przetwornicy częstotliwości zasilającej silnik indukcyjny klatkowy. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki tych badań dotyczące stanu pracy układu napędowego w warunkach zwrotu energii elektrycznej do sieci trójfazowej przez silnik indukcyjny, falownik napięcia, obwód pośredniczący falownika i urządzenie do zwrotu energii UZE. Wielkości elektromagnetyczne zmienne w czasie oraz widma harmoniczne rejestrowanych przebiegów były mierzone lub wyznaczone za pomocą cyfrowego analizatora jakości mocy typu FLUKE 43.

Na rys.3 przedstawiono zarejestrowane pomiarowo przebiegi chwilowe napięcia fazowego i prądu fazowego w obwodach trójfazowych urządzenia do zwrotu energii UZE podczas stanu hamowania odzyskowego silnika indukcyjnego. Na rys.4 przedstawiono przebiegi chwilowe napięcia fazowego i prądu fazowego w obwodach głównych trójfazowej sieci zasilającej przetwornicę częstotliwości i urządzenie do zwrotu energii. Pomiaru te wykonano przy nastawieniu częstotliwości wyjściowej napięcia z przetwornicy częstotliwości równej 30 Hz. Przebiegi chwilowe napięcia i prądu w obwodzie pośredniczącym urządzenia UZE wykonane przy podanych warunkach przedstawiono na rys.5.

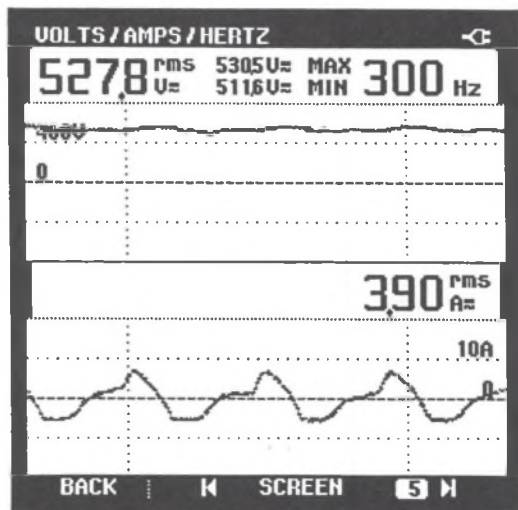


Rys.3. Przebiegi chwilowe napięcia fazowego i prądu fazowego w obwodach AC urządzenia UZE
 Fig. 3. The measured time waveforms of phase voltage and phase current in AC circuits of power feedback unit UZE



Rys. 4. Przebiegi chwilowe napięcia fazowego i prądu fazowego w obwodach głównej sieci AC
 Fig. 4. The measured time waveforms of phase voltage and phase current in AC circuits of the mains

Wyniki pomiarów wskazują na występowanie stosunkowo dużego odkształcenia prądów w obwodach rozpatrywanych przekształtników od przebiegu sinusoidalnego. Kształt tych prądów wynika z zastosowania nie sterowanego prostownika mostkowego w obwodach wejściowych przetwornicy częstotliwości oraz z zastosowanego algorytmu sterowania tranzystorów mocy w urządzeniu do zwrotu energii. Mimo stosunkowo dużego odkształcenia prądów fazowych od przebiegu sinusoidalnego praktycznie występuje praca przy dość dużej wartości bezwzględnej współczynnika mocy, czyli przy małym poborze mocy biernej. Z rys.5 wynika, że zwrot energii przez urządzenie UZE ma charakter impulsowy.



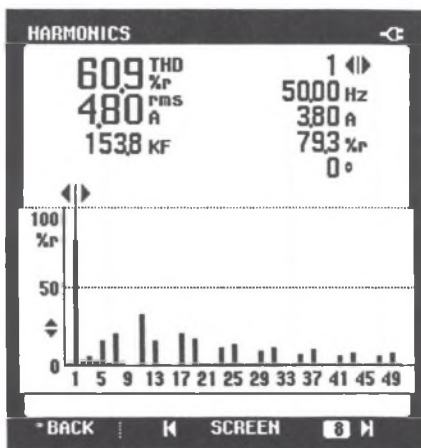
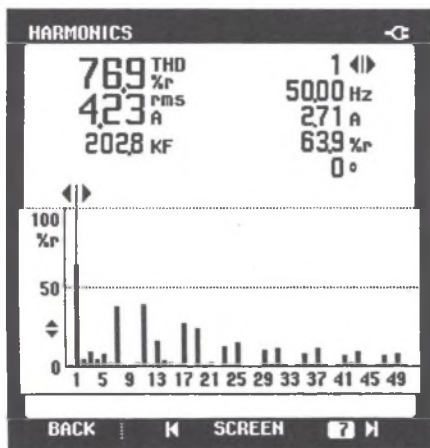
Rys.5. Przebiegi chwilowe napięcia i prądu w obwodzie pośredniczącym urządzenia UZE

Fig.5. The measured time waveforms of voltage and current in dc link circuit of power feedback unit UZE

Za pomocą analizatora jakości mocy dokonano pomiarów i wyznaczono widma harmonicznych prądów fazowych w obwodach głównych sieci zasilającej oraz w obwodach prądu przemiennego przekształtników zasilanych z tej sieci. Wybrane wyniki pomiarów widma harmonicznych odpowiednich prądów fazowych przedstawiono na rys.6.

a)

b)



Rys.6. Widma harmonicznych prądów fazowych: a) prądu w sieci zasilającej, b) prądu w obwodach AC urządzenia do zwrotu energii UZE

Fig.6. Harmonic spectra of phase currents: a) current of the supply mains, b) current in AC circuit of power feedback unit UZE

Rysunek 6 przedstawia wydruki wyników pomiarów przetworzonych za pośrednictwem oprogramowania przyrządu i zapamiętanych następnie w postaci ekranów w pamięci przyrządu. Właściwości zastosowanego przyrządu pozwalały na wyznaczenie dla badanego, odkształconego przebiegu rozkładu tego przebiegu na składową stałą oraz składowe harmoniczne o numeracji od 1 do 51 włącznie. Po lewej górnej stronie każdego ekranu podano dla badanego przebiegu prądu

wyznaczone przez oprogramowanie przyrządu kolejno następujące wartości: wartość współczynnika zniekształceń harmonicznych THD w procentach [3], wartość skuteczną prądu w amperach oraz współczynnik zawartości prądów harmonicznych KF. Udział każdej składowej harmonicznej prądu w sygnale całkowitym zilustrowano w postaci wykresu słupkowego. Wartości procentowe poszczególnych harmonicznych zostały odniesione do całkowitej wartości skutecznej odkształconego przebiegu. Po prawej górnej stronie ekranu podane są parametry dotyczące składowej podstawowej przebiegu prądu o częstotliwości równej 50 Hz.

5. PODSUMOWANIE

Badania eksperymentalne układu sterowania częstotliwościowego silnika indukcyjnego z przetwornicą częstotliwości i dołączanym urządzeniem do zwrotu energii elektrycznej do sieci trójfazowej wykazały dobre własności tego układu zarówno w stanach pracy silnikowej, jak i hamowania odzyskowego. Zastosowanie tranzystorowego przekształtnika DC/AC jako urządzenia do zwrotu energii hamowania zapewnia ograniczenie niekorzystnego oddziaływania tego przekształtnika na sieć zasilającą prądu przemiennego w porównaniu z konwencjonalnym układem z tyrystorowym prostownikiem sterowanym. Badany układ zapewnia możliwość uzyskania warunków pracy przy wysokiej wartości współczynnika mocy, czyli przy małym poborze mocy biernej z sieci zasilającej. Zaletą układu jest możliwość dołączania go do typowych przetwornic częstotliwości stosowanych powszechnie do sterowania częstotliwościowego silników indukcyjnych bez konieczności wprowadzania zmian w układach sterowania tych przekształtników. Dalszym kierunkiem rozwoju tego typu układów jest stosowanie przetwornic częstotliwości z przekształtnikiem AC/DC o dwukierunkowym przepływie energii.

LITERATURA

1. Belmans R., Busschots F., Timmer R.: Practical design considerations for braking problems in overhead crane drives, Proc. of the 28th Ann. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc., IAS'93, Toronto, Canada, Oct. 1993, pp.473-479.
2. Habetler T.G.: A Space Vector-Based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters, IEEE Trans. on Power Electronics, V.8, No.1, 1993, pp.30-36.
3. Januszewski S., Serafin S.: Kompatybilność elektromagnetyczna układów napędowych. Wiadomości Elektrotechniczne, R,LXV, Nr 9, 1997, s.419-424.
4. Kohlmeier H., Niermeyer O., Schröder D.F.: Highly Dynamic Four-Quadrant AC Motor Drive with Improved Power Factor and On-Line Optimized Pulse Pattern with PROMC, IEEE Trans. on Industry Appl., V.IA-23, No.6, 1987, pp.1001-1009.
5. Manninen V.: Application of direct torque control modulation technology to a line converter, Proc. of EPE'95, Sevilla, Spain, 1995, pp.1.292-1.296.
6. Pieńkowski K.: Układy hamowania napędów przekształtnikowych z silnikami indukcyjnymi, Prace Nauk. Inst. Maszyn i Napędów Elektr. Polít. Wrocław, nr 45, Studia i Materiały nr 19, Wrocław, 1996, s.135-152.
7. Pieńkowski K.: Sterowanie DTC przekształtnika AC/DC i silnika indukcyjnego z falownikiem napięcia. Materiały konferenc.: IV Krajowa konferencja naukowa: Sterowanie w energoelektronice i napędzie elektrycznym, SENE' 99. Łódź-Arturówek, 17-19 listopada 1999, T.2, 1999, s.549-554.
8. Product manual: Power feedback unit, REVCON[®], Bönen, BRD.

Recenzent: Dr hab. inż. Grzegorz Kamiński
Profesor Politechniki Warszawskiej

Abstract

Variable speed drives are the fundamental electromechanical energy converters to realize complex manufacturing processes. State of the art is the system with a standard squirrel-cage induction motor supplied by a PWM inverter with constant DC link voltage. The common supply for the DC link circuit consists of an uncontrolled rectifier bridge connected to the three-phase grid. In recent years the drive systems with possibility of energy regeneration have gained considerable attention. The paper presents the frequency controlled drive system consisting of a squirrel-cage induction motor, a PWM voltage source inverter and a power feedback unit used for energy regeneration during generator braking operation of induction motor. By using power feedback unit the braking energy which otherwise is most often wasted in resistors is supplied to the three phase AC grid. The basic circuit diagram of the power converter system with application of a power feedback unit is presented in Fig.1. In the case of multi-motor drive system with several frequency inverters the individual, common power feedback unit can be applied as shown in Fig.2.

The analytical-economical criterion for applying power feedback unit is discussed. The equations (1)-(3) used in economical analysis and for selection of the proper configuration of the drive system are presented.

The results of experimental studies of the drive system with power feedback unit are presented and discussed. The laboratory equipment consisted of a squirrel-cage induction motor coupled with a direct current motor. During the motor operation the induction motor was fed from a PWM voltage source inverter. As an inverter the industrial frequency converter produced by Danfoss was used. During the braking operation the dc motor was used as a drive motor and the induction motor worked in the state of regenerative operation. During that operation the power feedback unit was used in the drive system for energy regeneration. The industrial power feedback unit produced by REVCON was used in the experimental drive system. The power feedback unit was switched on by its control circuit. The other equipment used in laboratory measurements was described.

The selected results of laboratory investigations for only regenerative braking operation of the drive system are presented in Figs. 3-6. Fig.3 presents the measured time waveforms of line-to-neutral voltage and phase current in AC circuit of the power feedback unit. Fig.4 presents the measured time waveforms of line-to-neutral voltage and phase current in AC circuit of the supply grid. It is shown that the considered currents are non-sinusoidal, but the power factor of the global system is near unity. Fig.5 presents the measured time waveforms of DC link voltage and DC link current of the power feedback unit. Harmonic spectras of the phase currents in the supply mains and phase current in AC circuit of the power feedback unit UZE are presented in Fig.6.

The power structure investigated has proved to be a viable concept. The presented system can be used for regeneration in a PWM AC drives and is an economical alternative to other presently available regenerative structures.