

Krzysztof Pieńkowski, Michał Knapczyk
Politechnika Wroclawska, Wrocław

PRZEKSZTAŁTNIKI ENERGOELEKTRONICZNE AC/DC/AC I AC/AC - UKŁADY TOPOLOGICZNE I STEROWANIE

AC/DC/AC AND AC/AC CONVERTERS - TOPOLOGICAL CIRCUITS AND CONTROL

Abstract: Most variable-speed drive systems use an AC/DC/AC or AC/AC power conversion procedure. Currently, standard adjustable speed drives consist of a diode rectifier and a PWM voltage source inverter. Another alternative is controlled rectifier and a current source inverter. Today, due to the increased use of power electronics appliances and converters, the quality of power in the majority of the ac supply systems is reducing. Nonlinear currents drawn from the utility grid by those equipments imply mains voltage distortion and other problems resulting in harmonic pollution and electromagnetic interference implications. The paper presents a survey the most popular traditional and modern topologies of power electronics systems of converters used for adjustable speed AC motors. The topologies of front end rectifiers and motor inverters are presented. The special attention is paid for double-sided converters, multilevel converters, cascaded converters and dual inverter fed open-end stator winding of induction motor. The topologies of recently developed AC/AC and AC/DC/AC matrix converters are also discussed. The control systems and performance of presented converters is described.

1. Wstęp

Obecnie w układach napędowych powszechnie stosowane są silniki prądu zmiennego o prędkości kątowej sterowanej za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych. Malejące koszty wytwarzania i wzrost produkcji przekształtników oraz rozwój nowoczesnych metod sterowania powoduje, że zakres mocy tego rodzaju układów napędowych jest coraz większy. Przy sterowaniu częstotliwościowym układów napędowych wymaga się aby układ przekształtnikowy zapewniał pożądane przekształcanie energii, możliwość dwukierunkowego przepływu energii oraz wyeliminowanie lub ograniczenie niekorzystnego oddziaływania na sieć zasilającą. W pracy tej omówiono wybrane układy topologiczne stosowanych i rozwijanych konstrukcji przekształtników energoelektronicznych, metody ich sterowania oraz właściwości.

2. Klasyfikacja przekształtnikowych układów sterowania częstotliwościowego

Przy uwzględnieniu rodzaju i liczby stopni przetwarzania energii można dokonać następującej ogólnej klasyfikacji przetwarzania energii w przekształtnikowych układach sterowania częstotliwościowego:

- a) wielostopniowe przetwarzanie energii elektrycznej. Stosowany jest wtedy układ przekształtników połączonych z sobą przez obwód pośredniczący prądu stałego i nazywany przekształtnikiem AC/DC/AC. Podobny rodzaj przetwarzania energii występuje w układzie nazywanym przekształtnikiem dwustronnym AC/AC;
- b) bezpośrednie przetwarzanie energii elektrycznej. Stosowane są tu układy przekształtnikowe bez obwodu pośredniczącego nazywane przekształtnikami AC/AC (przekształtniki matrycowe).

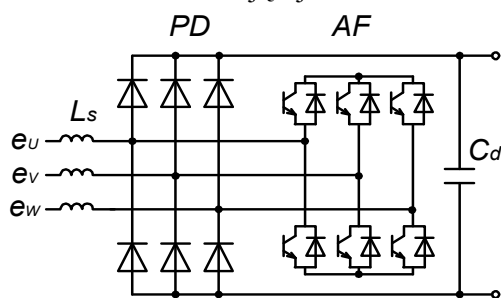
3. Układy i sterowanie przekształtnikami AC/DC/AC

W układzie przekształtnikowym AC/DC/AC z obwodem pośredniczącym prądu stałego występują następujące przekształtniki:

- przekształtnik sieciowy AC/DC - nazywany też prostownikiem sieciowym;
- przekształtnik silnikowy DC/AC - wykonany jako układ falownika napięcia (VSI) lub falownika prądu (CSI).

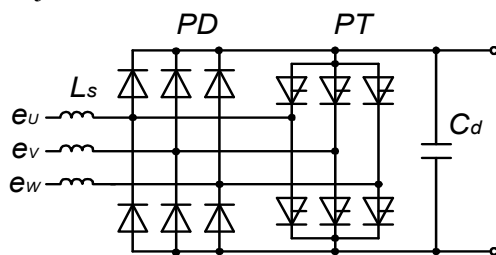
W układach z falownikiem napięcia jako przekształtnik sieciowy jest najczęściej stosowany 3-fazowy prostownik diodowy. Do niekorzystnych właściwości tego układu należy pobór z

sieci odkształconych prądów oraz brak możliwości dwukierunkowego przepływu energii. Zmniejszenie udziału zawartości harmonicznych prądów w sieci zasilającej można częściowo poprawić stosując dławiki sieciowe lub układy filtrów w fazach zasilających. Znacznie lepsze właściwości eliminacji odkształceń prądów sieci zapewniają odpowiednie układy przekształtnikowe przyłączane do prostownika. Na rys.1 przedstawiono diodowy prostownik sieciowy *PD* z przyłączonym filtrem aktywnym *AF*. Układ sterowania zaworów energoelektronicznych tego filtra pozwala na odpowiednie kształtowanie przebiegu prądów fazowych w przewodach sieci zasilającej.



Rys.1. Przekształtnik AC/DC z prostownikiem diodowym *PD* i filtrem aktywnym *AF*

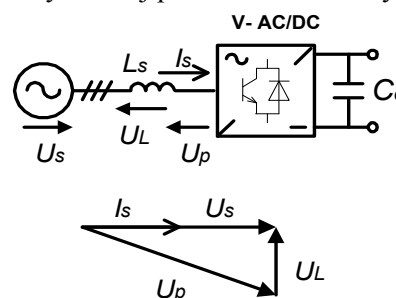
Na rys.2 przedstawiono układ przekształtnika sieciowego w którym zastosowano prostownik diodowy *PD*, współpracujący z tyrystorowym prostownikiem sterowanym *PT* o komutacji sieciowej.



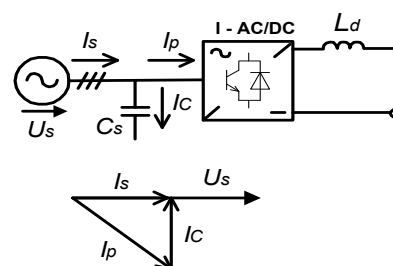
Rys.2. Przekształtnik AC/DC z prostownikiem diodowym *PD* i prostownikiem tyrystorowym *PT* do zwrotu energii

Układ ten pozwala na uzyskanie dwukierunkowego przepływu energii i zwrotu energii hamowania do sieci zasilającej. W wykonaniach firmowych prostownik *PT* jest wykonywany jako oddzielny moduł przyłączany do zacisków obwodu pośredniczącego i 3-fazowej sieci. Budowa modułowa układu pozwala na odpowiedni dobór mocy przekształtnika *PT* oraz wykorzystanie takiego układu również do zwrotu energii w napędzie grupowym ze

wspólnym obwodem pośredniczącym prądu stałego. Rozwój nowoczesnych elementów energoelektronicznych o zdolności do dużej częstości łączeń oraz rosnące wymagania związane z zapewnieniem odpowiedniej jakości energii w sieci zasilającej przyczyniły się do rozwoju sterowanych przekształtników sieciowych AC/DC. Do podstawowych wymagań stawianym tym przekształtnikom należą: możliwość pracy bez poboru mocy biernej przy sinusoidalnym kształcie prądów pobieranych z sieci, zapewnienie dwukierunkowego przepływu energii oraz możliwość sterowania napięcia w obwodzie pośredniczącym. Sterowany przekształtnik sieciowy AC/DC może być wykonany jako układ z wymuszeniem napięciowym lub prądowym [8]. Układy i zasady ogólne sterowania tego rodzaju przekształtników dla warunku zapewnienia pracy bez poboru mocy biernej przedstawiono na rys.3 i 4.



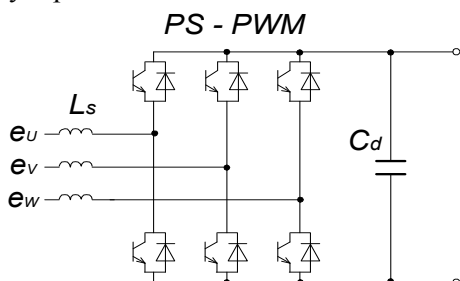
Rys.3. Sterowanie przekształtnikiem sieciowym AC/DC o wymuszeniu napięciowym



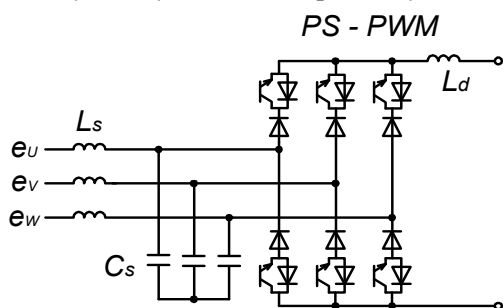
Rys.4. Sterowanie przekształtnikiem sieciowym AC/DC o wymuszeniu prądowym

W układzie z wymuszeniem napięciowym pracę układu bez poboru mocy biernej uzyskuje się przez nastawienie przez układ sterowania odpowiedniej wartości modułu i kąta fazowego wektora napięcia U_p generowanego przez przekształtnik sieciowy. W układzie z wymuszeniem prądowym pracę układu bez poboru mocy biernej uzyskuje się przez nastawienie przez układ sterowania odpowiedniej wartości modułu i kąta fazowego wektora prądu I_p generowanego przez przekształtnik sieciowy.

Schematy ideowe układów topologicznych przekształtnika sieciowego AC/DC z wymuszeniem napięciowym przedstawiono na rys.5, a z wymuszeniem prądowym na rys.6. Układy te różnią się między sobą obwodami sieciowymi, obwodem pośredniczącym i układem topologicznym przekształtnika.



Rys.5. Przekształtnik AC/DC z prostownikiem sterowanym o wymuszeniu napięciowym



Rys.6. Przekształtnik AC/DC z prostownikiem sterowanym o wymuszeniu prądowym

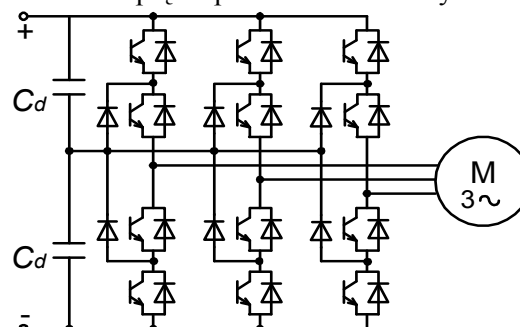
Przekształtniki DC/AC dokonują zamiany energii elektrycznej prądu stałego na energię prądu zmiennego o regulowanej częstotliwości. W klasycznych wykonaniach przekształtniki te są budowane jako falowniki napięcia lub falowniki prądu z zastosowaniem modulacji PWM do kształtowania przebiegów napięć i prądów na wyjściu z przekształtnika.

Napędy dużej mocy wymagają zastosowania specjalnych konstrukcji i układów topologicznych przekształtników energoelektronicznych. Szczególnie dogodnymi typami przekształtników DC/AC do zastosowań w układach napędowych dużej mocy są:

- przekształtniki wielopoziomowe [5];
- układy przekształtnikowe z silnikiem z otwartym uzwojeniem stojana [1];
- przekształtniki kaskadowe [5,6,7].

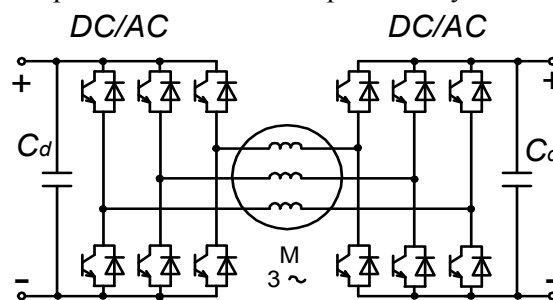
Przekształtnik wielopoziomowy pozwala na uzyskanie syntezy pożądanego przebiegu napięcia wyjściowego z wykorzystaniem kilku poziomów napięcia DC. Ze wzrostem liczby poziomów przekształtnika zmniejsza się zawartość

harmonicznych w przebiegu napięcia wyjściowego oraz stromość zmian napięcia, rośnie natomiast złożoność układu sterowania oraz koszt przekształtnika. Schemat najpowszechniej obecnie stosowanego układu trójpoziomowego falownika napięcia przedstawiono na rys.7.



Rys.7. Przekształtnik DC/AC z trójpoziomowym falownikiem napięcia

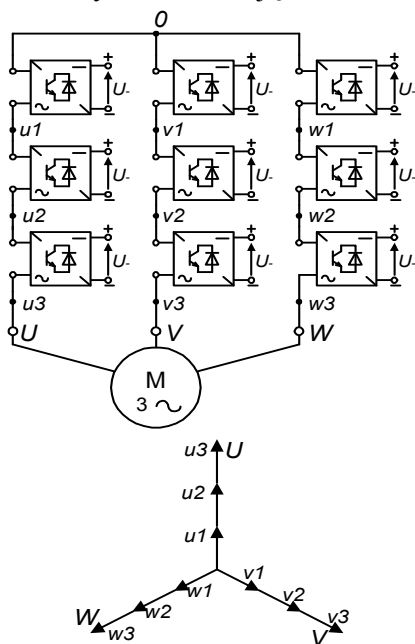
Podobne właściwości uzyskuje się w układzie sterowania silnikiem indukcyjnym z otwartym uzwojeniem stojana. Układ energoelektroniczny jest złożony z dwóch przekształtników DC/AC o konfiguracji falownika napięcia (rys.8). Wyjście trójfazowe pierwszego przekształtnika jest przyłączone do początków faz uzwojenia stojana, a drugiego do końców faz tego uzwojenia. W układzie stosowane są najczęściej konwencjonalne przekształtniki dwupoziomowe, możliwe jest zastosowanie również przekształtników wielopoziomowych.



Rys.8. Układ z dwoma przekształtnikami DC/AC do sterowania silnikiem indukcyjnym z otwartym uzwojeniem stojana

W układzie z otwartym uzwojeniem stojana każdy z przekształtników może być zasilany z albo oddzielnego lub wspólnego źródła napięcia stałego. Możliwe jest również zastosowanie układu z zasilaniem tylko jednego przekształtnika DC/AC ze źródła napięcia stałego, a pracy drugiego przekształtnika bez zasilania obwodu pośredniczącego z włączonym do tego obwodu kondensatorem.

Tego rodzaju układ topologiczny pozwala na uzyskanie właściwości sterowania silnikiem indukcyjnym jak z falownikiem trójpoziomowym przy zastosowaniu dwóch prostych przekształtników dwupoziomowych. Dodatkowo przez odpowiednie sterowanie można dokonać rozdziału funkcji między przekształtnikami: jeden z przekształtników steruje przepływem mocy, a drugi steruje uzyskaniem odpowiedniej jakości energii dostarczanej do odbiornika. Inną grupę wieloprzekształtnikowych układów sterowania częstotliwościowego stanowią przekształtniki kaskadowe. Przekształtniki kaskadowe są rozwijane do zastosowań w napędach dużej mocy lub wymagających wysokich wartości napięć wyjściowych. Konwencjonalny przekształtnik kaskadowy do sterowania częstotliwościowego, przedstawiony na rys.9 jest złożony z kilku połączonych z sobą szeregowo jednofazowych dwupoziomowych falowników napięcia w układzie mostkowym z modulacją PWM.



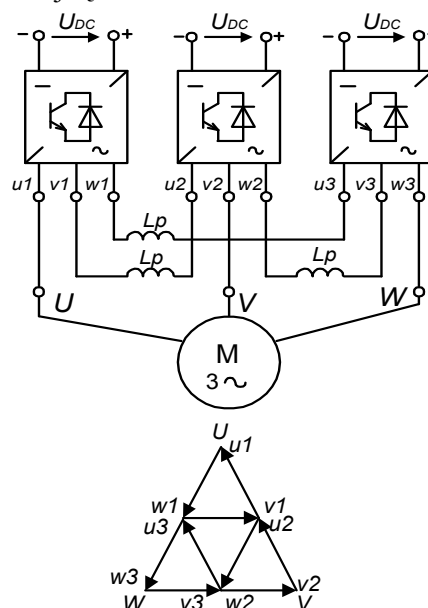
Rys.9. Przekształtnik kaskadowy DC/AC z szeregowym połączeniem falowników 1-fazowych i układ napięć wyjściowych z przekształtnika

Do zalet tego rodzaju przekształtnikowego układu kaskadowego należą: możliwość budowy modułowej przekształtnika, niższe koszty produkcji i wykonania przekształtnika oraz zwiększenie niezawodności i pewności pracy układu przekształtnikowego.

Natomiast do podstawowych wad tego rodzaju układu przekształtnikowego należą:

- duża liczba połączonych z sobą szeregowo modułów falowników, a stąd złożoność układu sterowania;
- przy zasilaniu układu z sieci prądu zmiennego konieczność zastosowania złożonej konstrukcji transformatora sieciowego z wieloma oddzielnymi galwanicznie izolowanymi uzwojeniami strony wtórnej.

Przykładem innego rozwiązania przekształtnika kaskadowego jest układ przedstawiony na rys.10. Przekształtnik kaskadowy jest tu złożony z trzech trójfazowych falowników napięcia, których obwody wyjściowe są połączone z obwodami wyjściowymi pozostałych falowników w trójkąt.



Rys.10. Przekształtnik DC/AC z kaskadowym połączeniem 3-fazowych falowników i układ napięć wyjściowych z przekształtnika

Rozwijane są również układy kaskadowe złożone z przekształtników DC/AC współpracujących z transformatorami 1-fazowymi, w których napięcie wyjściowe każdej fazy jest sumą wartości napięcia wyjściowego z przekształtnika i napięcia strony wtórnej transformatora. Pozwala to na dalsze zwiększenie możliwości kształtowania przebiegu napięcia wyjściowego zasilającego uzwojenie silnika.

4. Układy i sterowanie przekształtnikami dwustronnymi AC /AC

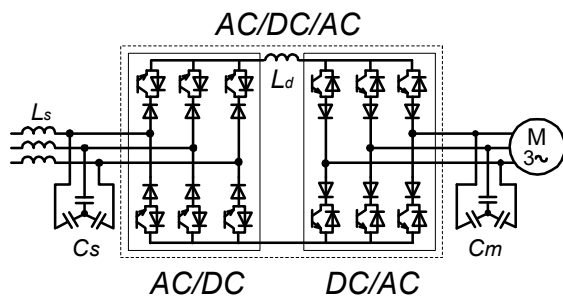
W przekształtnikach AC/DC/AC z dwustopniowym przekształcaniem energii dąży się do tego aby przekształtnik sieciowy AC/DC i przekształtnik silnikowy DC/AC stanowiły iden-

tyczne układy pod względem topologicznym. Pozwala to wykonać cały przekształtnik jako jeden zintegrowany układ i zastosować do obu składowych przekształtników podobne układy i algorytmy sterowania. Tego rodzaju układ przekształtnikowy jest często nazywany przekształtnikiem dwustronnym AC/AC [3].

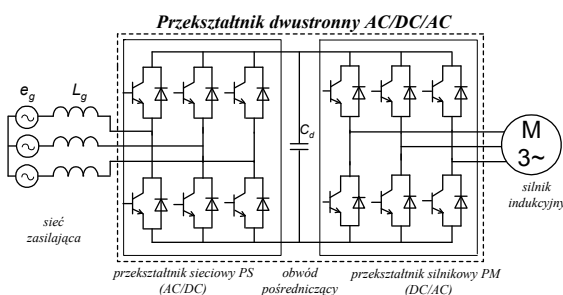
Stosowane są dwa podstawowe układy topologiczne przekształtników dwustronnych AC/AC:

- układ z przekształtnikiem sieciowym PWM z wymuszeniem prądowym i falownikiem prądu PWM;
- układ z przekształtnikiem sieciowym PWM z wymuszeniem napięciowym i falownikiem napięcia PWM.

Schematy układów topologicznych tego rodzaju przekształtników dwustronnych przedstawiono na rys.11 i 12.



Rys.11. Przekształtnik dwustronny AC/AC z przekształtnikami o wymuszeniu prądowym



Rys.12. Przekształtnik dwustronny AC/AC z przekształtnikami o wymuszeniu napięciowym

Sterowanie przekształtnikiem dwustronnym AC/AC polega na wyborze odpowiedniej metody sterowania przekształtnikiem sieciowym i przekształtnikiem silnikowym. Z podobieństwa topologicznego obu przekształtników wynika możliwość zastosowania do tych przekształtników podobnych metod i algorytmów sterowania stosowanych w układach sterowania częstotliwościowego silników indukcyjnych [3].

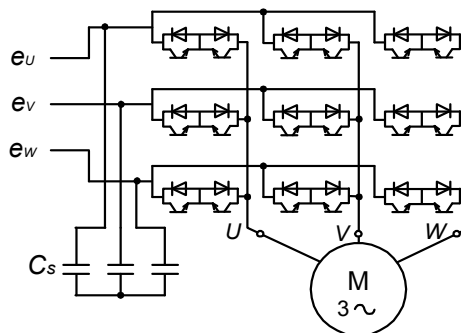
5. Układy i sterowanie przekształtnikami AC/AC

Przekształtniki bezpośrednie AC/AC są rozwijane jako przekształtniki matrycowe. Ich zaletą jest zdolność do bezpośredniego przetwarzania energii prądu zmiennego sieci zasilającej na energię prądu zmiennego o sterowanej częstotliwości, przy zapewnieniu dwukierunkowego przepływu energii i sinusoidalnego kształtu prądów. Przekształtniki matrycowe nie wymagają elementu gromadzącego energię, stąd ich konstrukcja może być zwarta, a nawet zintegrowana z obudową sterowanego silnika.

Rozwijane układy topologiczne przekształtników matrycowych można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- konwencjonalne przekształtniki matrycowe (CMC - Conventional Matrix Converters);
- pośrednie przekształtniki matrycowe (IMC - Indirect Matrix Converters).

Konwencjonalny przekształtnik matrycowy (rys.13) składa się z 9 dwukierunkowych kluczy sterowanych łączących bezpośrednio zaciski faz sieci z zaciskami wyjściowymi z przekształtnika.

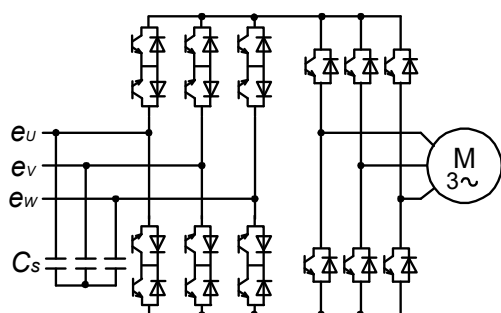


Rys.13. Przekształtnik matrycowy AC/AC w układzie konwencjonalnym (CMC)

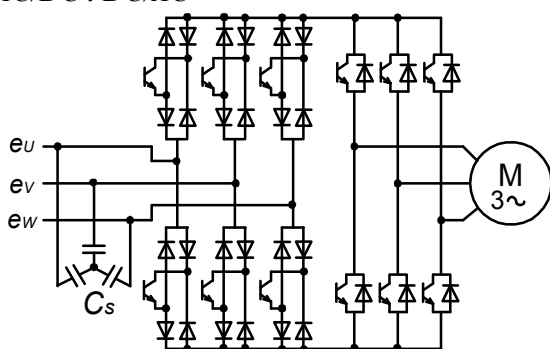
Obecnie prowadzone są prace nad zastosowaniem nowych układów topologicznych przekształtników matrycowych posiadających takie same właściwości funkcjonalne, ale zmniejszoną liczbę sterowanych elementów energoelektronicznych. Możliwość ta stwarza przekształcenie przekształtnika matrycowego AC/AC do równoważnego przekształtnika o dwustopniowym przekształcaniu energii AC/DC/AC, nazywanego pośrednim przekształtnikiem matrycowym (rys.14), który można rozpatrywać jako układ z rozdzielonymi przekształtnikami AC/DC i DC/AC.

Na bazie konfiguracji pośredniego przekształtnika matrycowego są opracowywane nowe układy topologiczne tych przekształtników [2]:

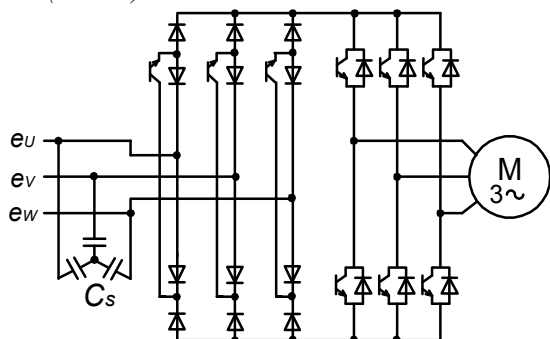
- przekształtnik o zmniejszonej liczbie elementów (SMC - Sparse Matrix Converter);
- przekształtnik o znacznie zmniejszonej liczbie elementów (VSMC - Very Sparse Matrix Converter) - rys.15;
- przekształtnik o bardzo znacznie zmniejszonej liczbie elementów (USMC - Ultra Sparse Matrix Converter)- rys.16.



Rys.14. Pośredni przekształtnik matrycowy (IMC) z rozdzielonymi przekształtnikami AC/DC i DC/AC



Rys.15. Przekształtnik matrycowy AC/AC ze znacznie zmniejszoną liczbą sterowanych zaworów (VSMC)



Rys.16. Przekształtnik matrycowy AC/AC z bardzo znacznie zmniejszoną liczbą sterowanych zaworów (USMC)

7. Podsumowanie

W pracy omówiono wybrane układy topologiczne stosowanych i rozwijanych konstrukcji przekształtników energoelektronicznych. Należy się spodziewać, że wiele z tych układów znajdzie bardziej powszechne zastosowanie w stosowanych układach sterowania częstotliwościowego silników. Stąd konieczna jest znajomość tendencji rozwojowych w tej dziedzinie techniki.

8. Literatura

- [1]. Corzine K.A., Wielebski M.W., Peng F.Z., Wang J.: *Control of Cascaded Multilevel Inverters*. IEEE Trans. on Pow. Electron., V.19, N.3, 2004, pp.732-738.
- [2]. Kolar J.W., Baumann M., Schafmeister F., Ertl H.: *Novel Three-Phase AC-DC-AC Sparse Matrix Converter*. Proc.of APEC'01, V.2, 2002, pp.777-791.
- [3]. Pieńkowski K.: *Sterowanie silnikiem indukcyjnym z przekształtnikiem dwustronnym AC/DC/AC*. Mat. Konf. SENE'03, T.II, 2003, s.417-422.
- [4]. Teodorescu R., Blaabjerg F., Pedersen J.K.: *Multilevel Converters – A Survey*. Proc. of EPEC'99, 1999, pp.P.2-P.11.
- [5]. Teodorescu R., Blaabjerg F., Pedersen J.K., Cengcelci E., Enjeti P.N.: *Multilevel Inverter by Cascading Industrial VSI*. IEEE Trans. on Ind. Electron., V.49, N.4, 2002, pp.832-838.
- [6]. Tolbert L.M., Peng F.Z.: *Multilevel Converters for Large Electric Drives*. Proc. of APEC'98, 1998, pp.530-536.
- [7]. Tolbert L.M., Peng F.Z., Cunningham T., Chiasson J.N.: *Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles*. IEEE Trans. on Ind. Electron., V.49, N.5, 2002, pp.1058-1064.
- [8]. Ye Y., Kazerani M., Quintana V.H.: *Modeling, Control and Implementation of Three-Phase PWM Converters*. IEEE Trans. on Pow. Electron., V.18, N.3, 2003, pp.857-864.

Autorzy

Dr hab. inż. Krzysztof Pieńkowski
krzysztof.pienkowski@pwr.wroc.pl
 Mgr inż. Michał Knapczyk
michal.knapczyk@pwr.wroc.pl

Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej
 ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław