

PRZEKSZTAŁTNIKI ENERGOELEKTRONICZNE W EP

Jarosław Michalak¹, Marcin Zygmantowski¹

Raport recenzowany²

Wstęp

Podjęcie prosumenckie zarówno do konsumpcji jak i wytwarzania energii elektrycznej wymaga poznania, w stopniu przynajmniej podstawowym, zagadnień związanych z energoelektroniką a w szczególności z przekształtnikami energoelektronicznymi. Jest to spowodowane faktem, że współcześnie przekształtniki energoelektroniczne (zwane w rozwiązaniach małej mocy np. elektronicznymi układami impulsowymi lub zasilaczami elektronicznymi) uczestniczą w większości procesów przetwarzania energii elektrycznej zarówno w przemyśle jak i gospodarstwach domowych [1], [2]. Wynika to głównie z ich wysokiej sprawności, możliwości regulacyjnych oraz możliwości dopasowywania parametrów energii elektrycznej z poziomu charakterystycznego dla jej dystrybucji do poziomu wynikającego z konkretnych potrzeb urządzeń odbiorczych czy mikroukładów wytwórczych.

SEGMENTACJA PRZEKSZTAŁTNIKÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH

Klasyczny podział przekształtników energoelektronicznych przeprowadzany jest najczęściej ze względu na rodzaj przetwarzanej energii. Rozróżnia się w takim przypadku przekształtniki AC/DC, przekształtniki DC/DC, przekształtniki DC/AC i przekształtniki AC/AC. W niniejszym opracowaniu przyjęto, jako podstawowy, podział na przekształtniki związane z użytkowaniem i wytwarzaniem energii elektrycznej. Dodatkowo uwzględniono zastosowania przekształtników, specyfikę odbiorników / źródeł energii, powszechność występowania oraz podzielono przekształtniki pod względem ich mocy. W Raporcie starano się również podkreślić podobieństwa w topologii, działaniu i sterowaniu różnych typów przekształtników. Przy tym nie wprowadzono podziału na sposoby przetwarzania energii elektrycznej, a raczej integrowano różne rodzaje przekształtników w rozwiązania stosowane praktycznie.

PRZEKSZTAŁTNIKI STOSOWANE W ODBIORNIKACH ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Wśród odbiorników energii elektrycznej można wyróżnić: oświetlenie, sprzęt AGD, sprzęt RTV, komputery, urządzenia grzewcze i sterujące, urządzenia telekomunikacyjne.

¹ Dr inż. Jarosław Michalak, dr inż. Marcin Zygmantowski – Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska.

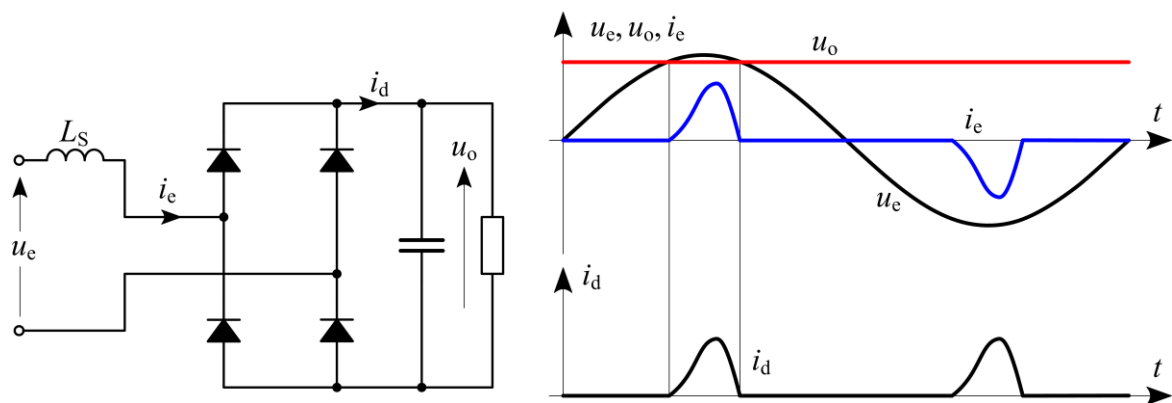
² Recenzent wewnętrzny (z jednostki naukowej autorów): dr hab. inż. Marcin Kasprzak, recenzja z dnia 19 stycznia 2015.

W zdecydowanej większości stopniem wejściowym tych odbiorników są przekształtniki AC/DC.

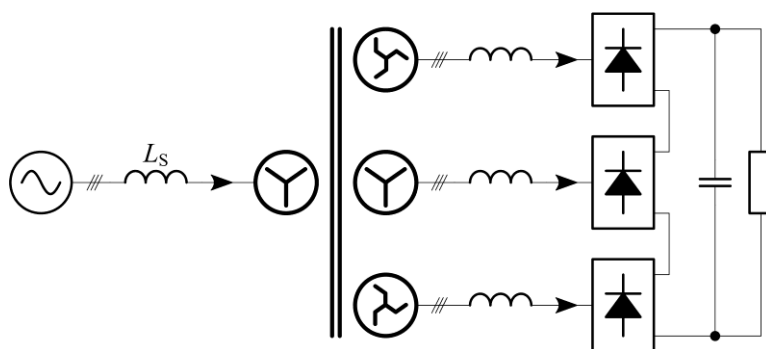
Przekształtniki te przetwarzają napięcie przemiennie sieci zasilającej na napięcia stałe o różnych wartościach. Wartości te zależą od konkretnych wymagań zasilanego urządzenia, np. mocy odbiornika. Wejściowe przekształtniki AC/DC są stosowane zarówno u odbiorców indywidualnych jak i przemysłowych. U odbiorców indywidualnych wartości napięć wyprostowanych wynoszą od kilkunastu (najczęściej z wykorzystaniem transformatora) do około 340 V. Powszechność występowania takich przekształtników wynika z jednej strony z potrzeby stosowania rozwiązań stałonapięciowych w sprzęcie elektronicznym i współczesnym oświetleniu, a z drugiej strony, przy dystrybucji energii za pomocą sieci prądu przemiennego, stosuje się obwody napięcia pośredniczącego jako stopnie wejściowe dla urządzeń zapewniających regulację mocy.

Przekształtniki AC/DC znajdują zastosowanie zarówno w urządzeniach małej mocy – od pojedynczych watów do setek watów (np. jako stopnie zasilające w komputerach, sprzęcie RTV, oświetleniu - świetlówki kompaktowe i LED, układach zasilania elektroniki w sprzęcie AGD), jak i większej mocy – od kilkuset watów do kilkuset kilowatów (np. stopnie wejściowe napędów z regulowaną prędkością obrotową, urządzeń stosowanych w grzejnictwie czy również w źródłach OZE współpracujących z generatorami prądu przemiennego).

Wśród układów z przekształtnikami AC/DC największą grupę stanowią te wyposażone w pośredniczący obwód z kondensatorem, co powoduje, że są one analizowane jako odbiorniki o charakterze napięciowym. Najprostsze rozwiązanie przekształtnika jednofazowego AC/DC przedstawia rys. 1. Składa się on z czterech diod prostowniczych zapewniających wyprostowane napięcie wyjściowe. Kondensator w obwodzie pośredniczącym zmniejsza składową zmienną napięcia wyjściowego. Prąd doładowujący kondensator płynie w chwilach gdy napięcie zasilające jest większe od napięcia kondensatora, co prowadzi do silnych odkształceń prądu wejściowego przekształtnika i jest jego podstawową wadą. Współczynnik mocy tego rozwiązania jest zdecydowanie niższy od jedności $\lambda < 1$, jednak ze względu na niską częstotliwość przełączeń diod, charakteryzują się one wysoką sprawnością. Straty w tych przekształtnikach są głównie stratami przewodzenia. Kolejną cechą charakterystyczną tego przekształtnika jest brak możliwości regulacji napięcia wyjściowego oraz możliwość jednokierunkowego przekazywania energii. Przedstawiony układ stosuje się w urządzeniach mniejszych mocy (do kilkuset watów). W rozwiązaniach większych mocy, np. napędach elektrycznych, stosuje się prostowniki diodowe trójfazowe jak w stopniu wejściowym przekształtnika przedstawionego na rys. 7. W urządzeniach największych mocy, np. napędach o mocy kilkuset kilowatów do pojedynczych megawatów, stosuje się tak zwane prostownicze układy wielopulsowe (rys. 2). Mogą to być 12-, 18- lub 24-pulsowe grupy prostowników zasilanych z wielouzwojeniowych transformatorów. Takie układy zmniejszają negatywne oddziaływanie prostowników na sieć zasilającą.

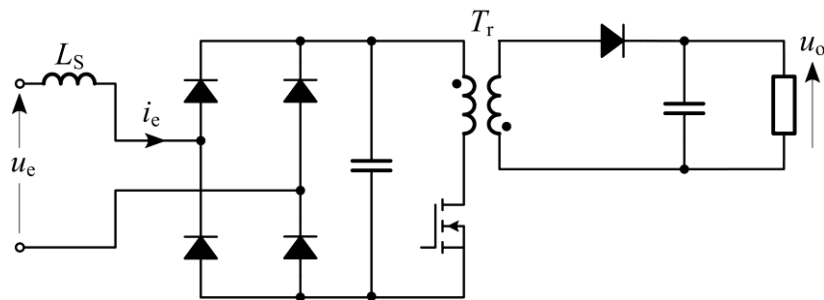


Rys. 1. Prostownik diodowy mostkowy jednofazowy oraz przebiegi napięć i prądów przekształtnika



Rys. 2. Schemat prostownika diodowego 18-pulsowego

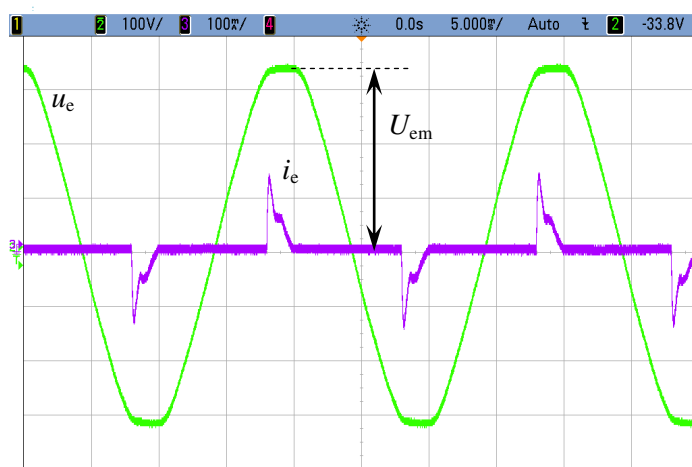
Na rys. 1 przedstawiono prostownik diodowy mostkowy z wyjściowym kondensatorem. Przekształtnik ten umożliwia uzyskanie napięcia u_o o wartości średniej mniejszej niż wynosi amplituda napięcia zasilającego U_e . Prostowniki diodowe są powszechnie stosowane m. in. w układach oświetleniowych z lampami wyładowczymi, napędach elektrycznych mniejszej mocy, zasilaniu urządzeń grzania indukcyjnego itp. W celu uzyskania niższego napięcia wyjściowego, np. wymaganego do zasilania układów elektroniki, w tańszych układach o większych gabarytach, na wejściu przekształtnika stosuje się transformator niskoczęstotliwościowy obniżający napięcie. W celu zmniejszenia gabarytów urządzeń zasilających wykorzystujących przekształtniki AC/DC i zapewnienia stabilizacji napięć wyjściowych, wykorzystać można wysokoczęstotliwościowe przekształtniki DC/DC, które przyłącza się do na wyjścia prostowników diodowych. Jednym z takich przekształtników DC/DC może być przekształtnik typu Flyback (rys. 3). Typowo rozwiązania takie stosuje się m. in. w zasilaczach impulsowych telefonów komórkowych, komputerów przenośnych, oświetlenia LED. Niniejsze rozwiązanie, dzięki transformatorowi wysokoczęstotliwościowemu (Tr na rys. 3), zapewnia separację galwaniczną obwodu wyjściowego od wejściowego, może charakteryzować się mniejszymi gabarytami oraz zapewniać stabilizację napięcia wyjściowego dla obciążeń o zmieniających się wartościach. Typowo częstotliwość przełączania tranzystora wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset kiloherców. Dzięki tak wysokiej częstotliwości dynamika regulacji przekształtnika może być na poziomie kilkuset mikrosekund. Typowe sprawności takich układów wynoszą od 85% do 95%, przy czym większą sprawność osiąga się dla urządzeń o większej mocy.



Rys. 3. Prostownik diodowy z przekształtnikiem typu Flyback

Mimo małych gabarytów, wadą przedstawionego przykładowego przekształtnika jest odkształcony prąd wejściowy, identyczny jak w prostowniku pokazanym na rys. 1. Na rys. 4 pokazano typowy prąd wejściowy ładowarki baterii litowo-jonowej telefonu komórkowego o mocy 3,5 W.

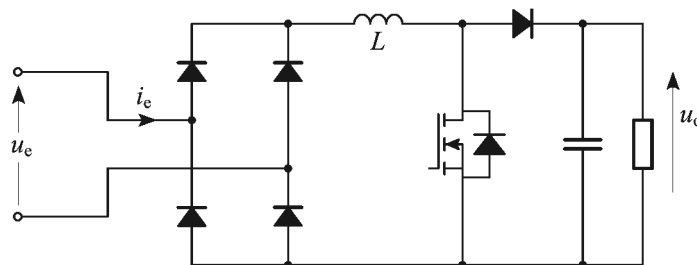
Mimo, że stosowanie pojedynczych układów zasilających z prostownikami diodowymi nie prowadzi do znaczącego pogorszenia jakości zasilania, to ze względu na ich powszechność i synchroniczną pracę w stosunku do napięcia sieci pojawia się problem związany ze znaczącą emisją niekorzystnych harmonicznych prądu. Z tego powodu, zgodnie z normą PN-EN 61000-3-2, urządzenia elektroniczne o prądzie do 16 A powinny spełniać ograniczenia dotyczącą emisji harmonicznych. Jednym ze sposobów spełnienia w/w wymogów jest zastosowanie przekształtnika z korekcją współczynnika mocy PFC (*Power Factor Correction*). Przekształtniki z korekcją współczynnika mocy spotyka się w zasilaczach komputerowych lub układach zasilania oświetlenia. Możliwe jest w tym przypadku zastosowanie korekcji pasywnej - poprzez umieszczenie na wejściu prostownika filtra biernego o odpowiedniej charakterystyce częstotliwościowej [3], lub zastosowanie korekcji aktywnej, bazującej na zastosowaniu dodatkowego przekształtnika [1]. Schemat stopnia wejściowego zasilacza wykorzystującego przekształtnik z aktywną korekcją współczynnika mocy APFC pokazano na rys. 5. Umożliwia on podwyższenie napięcia wyjściowego względem amplitudy fazowego napięcia zasilającego ($u_o > U_{em}$). Z punktu użytkowego interesujące jest to, że możliwe jest zastosowanie tego rozwiązania na wyjściu prostownika diodowego jednofazowego (pokazanego na rys. 1).



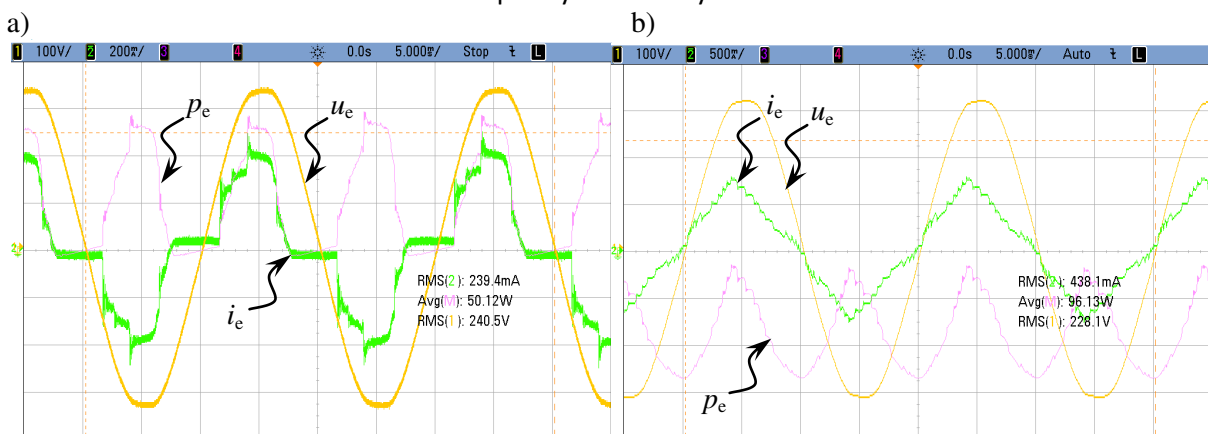
Rys. 4. Prąd wejściowy ładowarki baterii telefonu komórkowego o mocy 3,5 W ($\lambda = 0,37$)

W tym przypadku pomiędzy prostownik a kondensator dołącza się dodatkowy przekształtnik podwyższający napięcie. Jednak w celu obniżenia napięcia wyjściowego konieczne będzie zastosowanie na jego wyjściu przekształtnika DC/DC (np. przekształtnik typu Flyback z rys. 3). W zasilaczach wykorzystujących aktywną korekcję współczynnika mocy, prąd sieci i_e jest kształtowany w ten sposób aby jego kształt był zbliżony do sinusoidalnego i był on współfazowy z napięciem sieci. Amplituda prądu wejściowego zależy od mocy wyjściowej pobieranej z przekształtnika. Wysoka częstotliwość przełączeń tranzystorów do kilkuset kiloherców, daje korzystną minimalizację parametrów elementów biernych stosowanych w przekształtniku, ale prowadzi równocześnie do zwiększenia strat mocy związanych z przełączaniem tranzystora zwiększając łączne straty w porównaniu z prostownikiem diodowym. Cechą charakterystyczną układu jest jednokierunkowy przepływ energii. W przekształtniku z rys. 5 możliwe jest zwiększenie współczynnika mocy do wartości bliskiej jedności, jednak o jakości kształtu prądu wejściowego decyduje algorytm kształtowania prądu.

Na rys. 6 przedstawione zostały prądy wejściowe zasilacza komputerowego (a) oraz układu zasilania lampy wyładowczej (b). Zauważyć można, że w przypadku zasilacza komputerowego prąd sieci ma kształt bliższy sinusoidalnemu niż w przypadku prostownika diodowego z rys. 1, a współczynnik mocy wynosi $\lambda = 0,87$. Jest to wynik działania pasywnej korekcji współczynnika mocy. Lepszy współczynnik mocy uzyskano w przypadku zasilacza lampy wyładowczej, gdzie zastosowana została aktywna korekcja współczynnika mocy $\lambda = 0,96$.

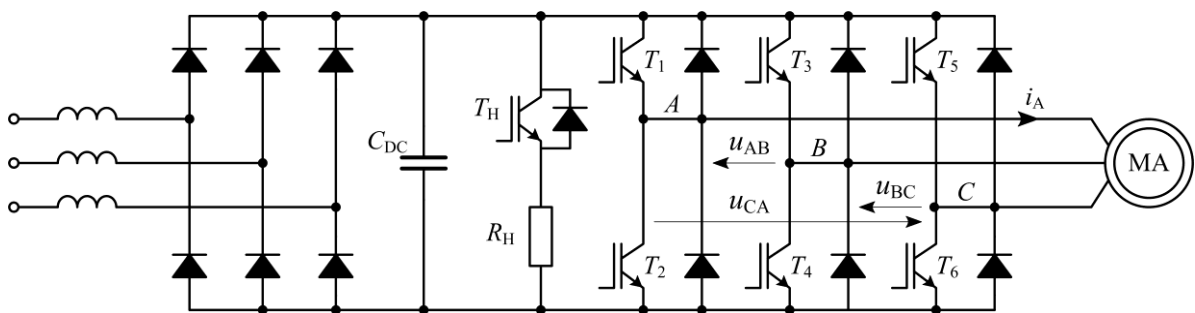


Rys. 5. Jednofazowy prostownik diodowy z przekształtnikiem zapewniającym aktywną korekcję współczynnika mocy PFC



Rys. 6. Przebiegi napięcia u_e , prądu i_e i mocy chwilowej p_e dla prostownika diodowego z korekcją współczynnika mocy PFC: a) zasilacz komputera, gdzie współczynnik mocy $\lambda = 0,87$ i b) zasilacz lampy wyładowczej, gdzie $\lambda = 0,96$

Omówione dotychczas przekształtniki stanowiły stopień wejściowy dla różnych odbiorników. W niektórych odbiorach (np. napędzie elektrycznym) dalsze przekształcanie energii odbywa się w kolejnym przekształtniku. W napędach prądu przemiennego są to falowniki (przekształtniki DC/AC). Topologię typowego przekształtnika DC/AC, z wejściowym prostownikiem trójfazowym stosowanym dla układów o mocach powyżej 5 kW pokazano na rys. 7. W przypadku układów o mniejszej mocy stopień wejściowy stanowi prostownik diodowy jednofazowy (rys. 1). W obwodzie pośredniczącym typowego przekształtnika stosowanego w napędzie elektrycznym z regulowaną prędkością obrotową występuje filtr pojemnościowy, ze względu na to, że większość rozwiązań napędowych wykorzystuje falowniki zasilane ze źródła napięcia. Falownik napięcia pozwala na zamianę napięcia stałego na przemiennie oraz umożliwia dwukierunkowy przepływ energii między silnikiem a obwodem napięcia stałego. Z tego względu w obwodzie pośredniczącym występuje układ zawierający tranzystor T_H i rezystor R_H przeznaczony do rozpraszania energii w przypadku hamowania silnika.



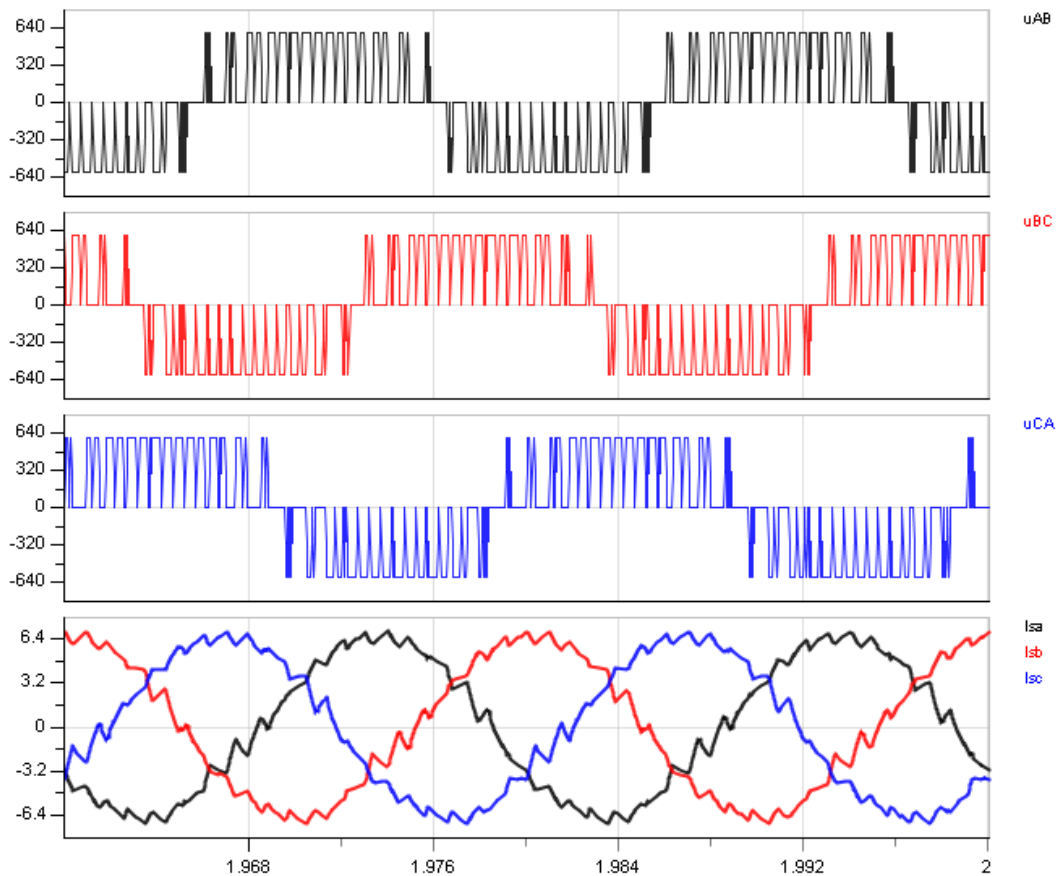
Rys. 7. Schemat typowego przekształtnika AC/DC/AC do zastosowań napędowych

W trójfazowym falowniku napięcia tranzystory przekształtnika DC/AC przełączają się w każdej fazie komplementarnie, a napięcie wyjściowe zależy od czasu załączenia tranzystora górnego w stosunku do czasu załączenia tranzystora dolnego. Częstotliwość przełączania tranzystorów jest najczęściej stała i typowo wynosi od kilku do kilkunastu kiloherców. Wyjście danej fazy falownika może być przyłączone do potencjału dodatniego albo ujemnego obwodu dc. Typowy kształt napięć wyjściowych falownika i prądów pokazano na rys. 8. Napięcie na zaciskach silnika kształtowane jest za pomocą modulacji szerokości impulsów. Dzięki rezystancyjno-indukcyjnemu charakterowi silnika, jego prądy mają kształt zbliżony do sinusoidalnego z tętnieniami pochodzącymi od przełączeń tranzystorów.

Pokazany na rys. 7 przekształtnik może być stosowany do napędów prądu przemiennego wykorzystujących silniki różnych typów, tj. silników indukcyjnych klatkowych, indukcyjnych pierścieniowych (wtedy przekształtnik podłączony jest najczęściej od strony wirnika silnika), synchronicznych z magnesami trwałymi oraz silników prądu stałego z magnesami trwałymi.

Właściwości dynamiczne przekształtnika zależą od częstotliwości przełączeń tranzystorów f_s . Z drugiej strony zależą od niej straty mocy związane z przełączaniem tranzystorów. Z uwagi

na to, że tranzystory na wyższe napięcia przełączają się wolniej, falowniki wyższych mocy pracują z niższymi częstotliwościami, a przez to ich dynamika jest mniejsza. Właściwości dynamiczne przekształtnika zależą również od regulowanej wielkości wyjściowej.

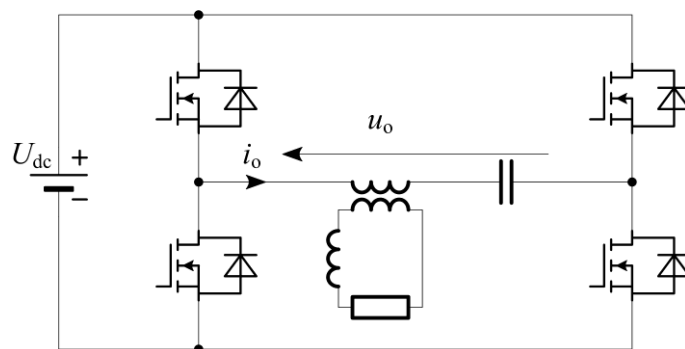


Rys. 8. Przebiegi napięć międzyfazowych i prądów silnika przy zastosowaniu modulacji szerokości impulsów (częstotliwość przetężania $f_s = 1$ kHz, $U_{dc} = 600$ V, głębokość modulacji $m_a = 1$)

Typowy algorytm sterowania układem napędowym, zapewniający wysoką dynamikę kształtowania wielkości elektrycznych i mechanicznych bazuje najczęściej na metodach polowo-zorientowanych. W takich układach rozważa się transformację wielkości opisujących silnik do układu związanego z wybraną wielkością elektromagnetyczną (najczęściej strumieniem w maszynie). Dzięki transformacji wybranych wielkości sinusoidalnych uzyskuje się układ regulacji pracujący na wielkościach, które w stanie ustalonym są stałe. Dodatkowo bardzo pożądaną właściwością jest uzyskanie możliwości niezależnej regulacji strumienia i momentu w maszynie. Szczegółowo działanie algorytmu sterowania oraz jego budowę opisano w części dotyczącej przekształtników związanych ze układami generacji energii (rys. 17).

Kolejnym rodzajem odbiorników, które wymagają zastosowania toru przetwarzania z przekształtnikami DC/AC, są układy nagrzewania indukcyjnego. W przekształtnikach takich stosuje się również falowniki napięcia, najczęściej jednofazowe, takie jak na rys. 9. Mimo zbliżonej budowy do przekształtników napędowych, sterowanie jest inne. Przekształtniki do napędu elektrycznego charakteryzowały się tym, że tranzystory przełączane są z twardymi

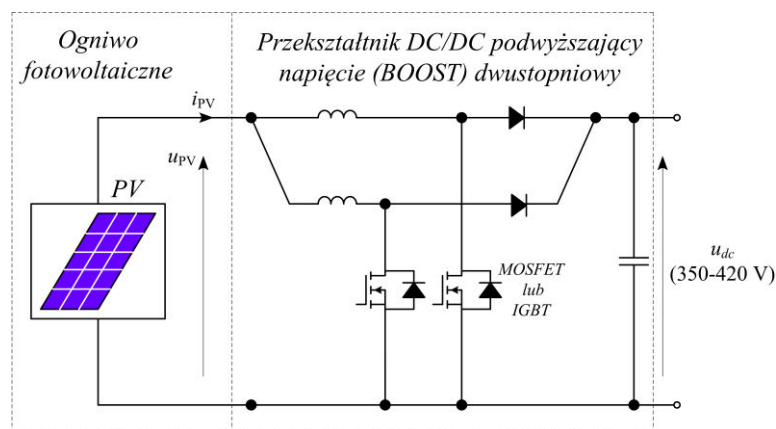
komutacjami. W tego rodzaju komutacjach straty mocy na przełączanie są większe, ale przekształtniki cechują się prostszą budową, niezawodnością i ceną. W przypadku zastosowania przekształtników zasilających układy nagrzewania indukcyjnego lub pojemnościowego, stosowane są przekształtniki rezonansowe. Zasilanie przekształtnika odbywa się z obwodu napięcia stałego (najczęściej przekształtnika jak na rys. 1). Przekształtnik może bazować na topologii klasycznego falownika napięcia, jak na rys. 9, przy czym specyficzne jest to, że obwód wyjściowy jest układem rezonansowym. Tranzystory w takim przekształtniku przełączają się z wysoką częstotliwością (od kilkudziesięciu do kilkuset kiloherców), która jest odpowiednio dostrojona do częstotliwości rezonansowej obwodu odbiornika. Tak wysoka częstotliwość napięcia wyjściowego wynika najczęściej z potrzeb procesu technologicznego, np. ograniczonej głębokości wnikania ciepła do wsadu w procesie nagrzewania czy hartowania powierzchni. Mimo zasilania przekształtnika napięciem prostokątnym prąd odbiornika ma kształt sinusoidalny, co równocześnie zapewnia minimalizację strat mocy przełączania i np. wiąże się z przełączaniem tranzystorów przy zerowym prądzie. To sprawia, że możliwe jest zwiększenie sprawności całego przekształtnika do 96-98%. Warunki takie zachowane są dla pracy układu w stanie rezonansu. Wśród metod sterowania wyróżnić można sterowanie amplitudowe, gdzie regulowane jest napięcie w obwodzie dc przekształtnika. Taka metoda zapewnia pracę przy maksymalnej sprawności. Innymi metodami sterowania jest metoda częstotliwościowa, w której regulację mocy uzyskuje się przez zmianę częstotliwości przełączeń tranzystorów. Sprawność w tej metodzie zależy od punktu pracy i najwyższa jest w pobliżu częstotliwości rezonansowej. Kolejną metodą sterowania jest metoda modulacja pojedynczego impulsu, w której regulowane jest przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami sterującymi poszczególnych faz przekształtnika. Innymi metodami są metody bazujące na regulacji liczbą cykli aktywnych do nieaktywnych, podczas których następuje wygaszenie sterowania przekształtnikiem.



Rys. 9. Rezonansowy przekształtnik klasy D do zastosowań w nagrzewaniu

PRZEKSZTAŁTNIKI STOSOWANE W ŹRÓDŁACH ENERGII ELEKTRYCZNEJ

W energetyce prosumenckiej oprócz świadomego wykorzystania energii elektrycznej, istotne jest także efektywne jej generowanie, przetwarzanie i magazynowanie. W instalacjach prosumenckich najczęściej wykorzystuje się panele fotowoltaiczne, mikroturbiny wiatrowe oraz układy kogeneracji. W niniejszych rozważaniach ograniczono się do dwóch pierwszych rozwiązań, ponieważ w większości przypadków kogeneratory podłącza się bezpośrednio do sieci zasilającej, bez zastosowania przekształtnika.



Rys. 10. Przekształtnik dla modułów fotowoltaicznych z dwustopniowym przekształtnikiem podwyższającym napięcie

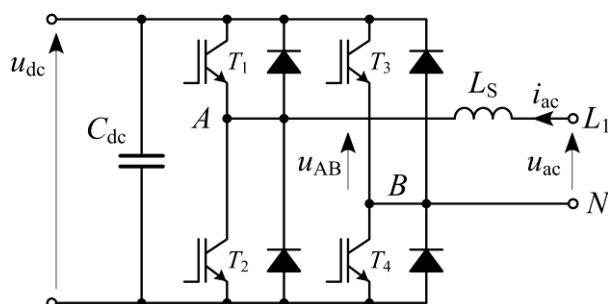
Pierwszym omawianym układem jest przekształtnik, który można zastosować do szeregowego łańcucha modułów fotowoltaicznych. Układ ten pokazano na rys. 10. Przedstawiony przekształtnik wykorzystuje przekształtnik DC/DC podwyższające napięcie (jak na rys. 5) w celu zwiększenia napięcia wyjściowego z modułów fotowoltaicznych do wartości niezbędnej do współpracy z przekształtnikiem współpracującym z siecią zasilającą. Prezentowane rozwiązanie może wykorzystywać zarówno tranzystory MOSFET jak i IGBT. Poprzez zastosowanie dwóch obwodów (stopni) przekształtnika i ich przesunięte w czasie sterowanie uzyskuje się zmniejszenie tętnień w prądzie obwodu pośredniczącego. O wartości zadanej prądu ogniw fotowoltaicznych decyduje algorytm poszukiwania mocy maksymalnej (MPPT). Wśród algorytmów poszukiwania mocy maksymalnej można wyróżnić algorytmy pośrednie (bazujące na parametryzowanych charakterystykach statycznych ogniw) lub bezpośrednie, w których w każdym kroku przeprowadzane jest poszukiwanie punktu mocy maksymalnej na podstawie pomiarów prądów i napięć oraz obserwacji reakcji na zmiany wielkości zadanej. Przykładowy prosty algorytm bezpośredni bazujący na technice P&O (Perturb & Observe) został przedstawiony poniżej.

$$\begin{aligned}
p_n &= u_{PV} i_{PV}, \\
I_{PVreq,n} &= I_{PVreq,n-1} + \Delta I \quad \text{dla } (p_n \geq p_{n-1}), \\
I_{PVreq,n} &= I_{PVreq,n-1} - \Delta I \quad \text{dla } (p_n < p_{n-1}), \\
p_{n-1} &= p_n, \\
I_{PVreq,n-1} &= I_{PVreq,n}.
\end{aligned}$$

Na podstawie różnicy między aktualną mocą ogniwa fotowoltaicznego p_n i wartością poprzednią p_{n-1} określana jest nowa wartość prądu zadanego ogniwa $I_{PVreq,n}$.

Przy wyższych wartościach napięcia wyjściowego zestawu modułów fotowoltaicznych, możliwe jest wyłączenie przekształtnika DC/DC i takie sterowanie prądem ogniwa za pomocą zmian napięcia w obwodzie pośredniczącym dc. Sterowanie wtedy odbywa się za pomocą przekształtnika DC/AC przedstawionego na rys. 11. Dzięki wyłączeniu przekształtnika DC/DC możliwe jest zwiększenie sprawności układu przekształcania energii.

Aby możliwy był zwrot energii elektrycznej, wytworzonej w ogniwach fotowoltaicznych, do sieci zasilającej, konieczne staje się wykorzystanie dodatkowego przekształtnika współpracującego z siecią zasilającą o topologii falownika napięcia. Przekształtnik ten przedstawiono na rys. 11 i może być on przyłączony do obwodu dc przekształtnika z rys. 10.



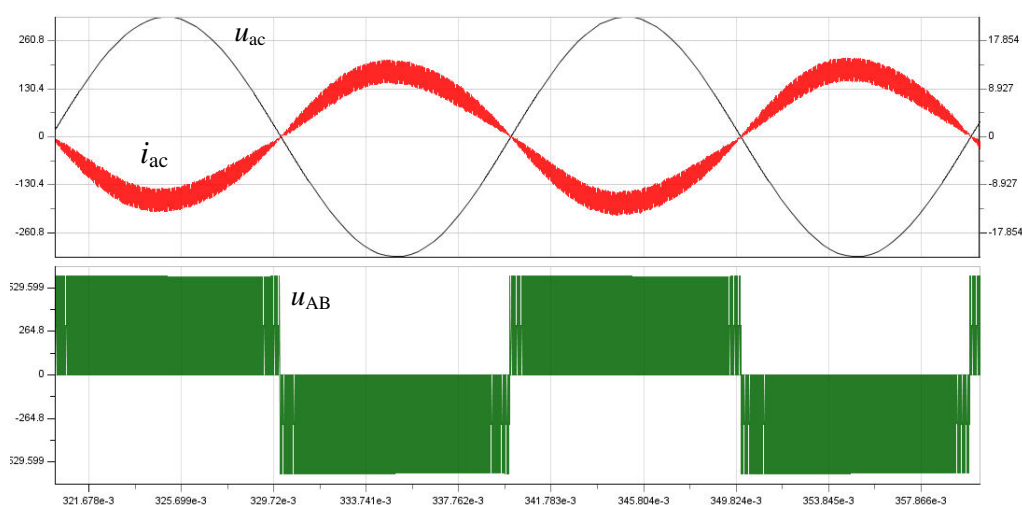
Rys. 11. Przekształtnik tranzystorowy umożliwiający zwrot energii do sieci zasilającej

Ze względu na kierunek przepływu energii przekształtnik z rys. 11 zalicza się do przekształtników DC/AC, niemniej działanie jego analizowane jest w literaturze jako działanie prostownika tranzystorowego AC/DC, którego funkcją dodatkową jest możliwość zwrotu energii do sieci zasilającej. Przekształtnik taki zapewnia równoczesną korektę współczynnika mocy prądu sieci oraz dwukierunkowy przepływ energii pomiędzy siecią prądu przemiennego. Takie właściwości przekształtnika uzyskuje się dzięki zastąpieniu diod prostownika diodowego przez tranzystory [4] i wykorzystaniu do ich sterowania odpowiedniego algorytmu. Pomiedzy siecią zasilającą a tranzystorami falownika konieczne jest zastosowanie dławika wejściowego L_S . Jest to związane z ograniczeniem krótkotrwałych przetężeń prądu, jakie mogłyby występować w związku z różnicą napięć u_{ac} i u_{dc} . Idea pracy takiego przekształtnika polega na wpływaniu, poprzez napięcie przemiennie w przekształtniku DC/AC, na prąd dławika (prąd sieciowy), przy czym niezbędna w tym przypadku jest synchronizacja algorytmu sterowania z napięciem sieci. Amplituda prądu fazowego zależy od wartości mocy czynnej dostarczanej lub odbieranej z obwodu napięcia stałego. Dzieje się tak

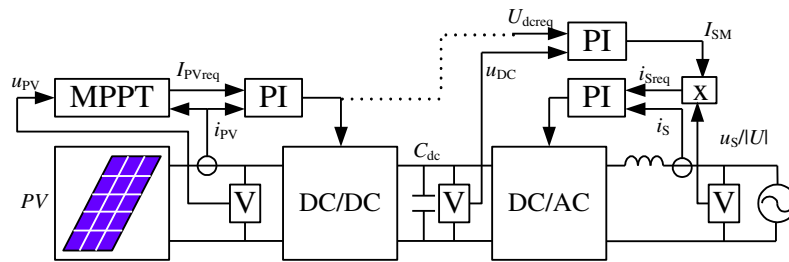
dlatego, że najczęściej tego typu przekształtnik pracuje ze skorygowanym współczynnikiem mocy bliskim jedności.

Z punktu widzenia sterowania układ z rys. 11 traktuje się jako źródło napięciowe objęte pętlą regulacji prądu, czyli sterowane źródło prądu. Aby umożliwić niezależne zasilanie odbiorników jednofazowych należy zamienić dławik sieciowy L_S na filtr dolnoprzepustowy oraz w algorytmie zrezygnować z kształtowania prądu na rzecz kształtowania napięcia. Należy zaznaczyć, że dynamika regulacji w takim przekształtniku jest wysoka (rzędu kilkuset mikrosekund do pojedynczych milisekund). Jest to przekształtnik typowy w rozwiązaniach stosowanych przy wykorzystywaniu energii elektrycznej ze źródeł energii odnawialnej OZE małej mocy do 5 kW [5]. Przebiegi napięć u_{AB} , u_{ac} i prądu i_{ac} w przypadku zwrotu energii przy współczynniku mocy równym 1 pokazano na rys. 12. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej metody modulacji, napięcie przekształtnika może być unipolarnie, co przyczynia się do poprawy kształtu prądu wyjściowego i_{ac} . Typowo sprawność przekształtników tranzystorowych wynosi ok. 90-95%. W związku z możliwością dowolnego kształtowania prądów sieci, falowniki napięcia mogą być wykorzystywane jako energetyczne filtry aktywne, w których odtwarzane przez przekształtnik prądy fazowe są niesinusoidalne. Algorytm sterowania układu zwrotu energii do sieci, przy współpracy z ogniwem fotowoltaicznym pokazano na rys. 13.

W układzie sterowania algorytm MPPT generuje zadaną wartość prądu I_{PVreq} dla regulatora PI sterującego pracą przekształtnika DC/DC. W przypadku gdy przekształtnik DC/DC zostanie wyłączony, nadal możliwe jest sterowanie napięciem zadanym kondensatora U_{dcreq} . Układ sterowania przekształtnika sieciowego DC/AC zawiera nadrzędną pętlę regulacji napięcia kondensatora C_{dc} . Regulator ten wypracowuje amplitudę prądu sieci I_{SM} , która następnie przemnażana jest przez sygnał jednostkowy $u_S/|U|$ proporcjonalny do napięcia sieci i wykorzystywana w wewnętrznej pętli regulacji prądu sieci jako sygnał i_{Sreq} .

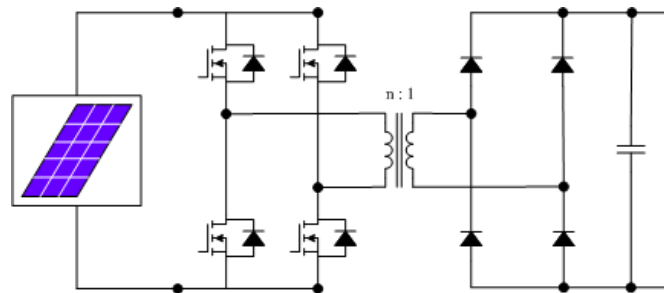


Rys. 12. Przebiegi napięć u_{ac} , u_{AB} i prądu i_{ac} dla przekształtnika pracującego ze zwrotem energii



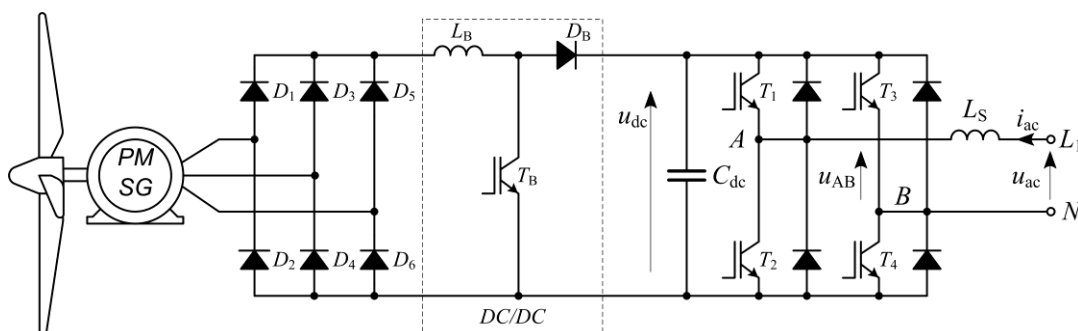
Rys. 13. Układ sterowania przekształtnika do współpracy z ogniwami fotowoltaicznymi PV

Topologia przekształtnika z rys. 10 wykorzystywana jest przy stosunkowo niedużych różnicach między napięciem u_{PV} z modułów fotowoltaicznych a napięciem obwodu pośredniczącego (od $u_{PV} = 100$ V dla napięcia obwodu pośredniczącego $u_{dc} = 350$ V). Przy niższych napięciach wejściowych u_{PV} oraz w przypadku potrzeby izolacji modułu fotowoltaicznego od potencjałów sieci możliwe jest zastosowanie topologii przekształtnika podwyższającego napięcie pokazanego na rys. 14. Przekształtnik ten wykorzystuje transformator średniej częstotliwości co pozwala na minimalizację jego gabarytów.



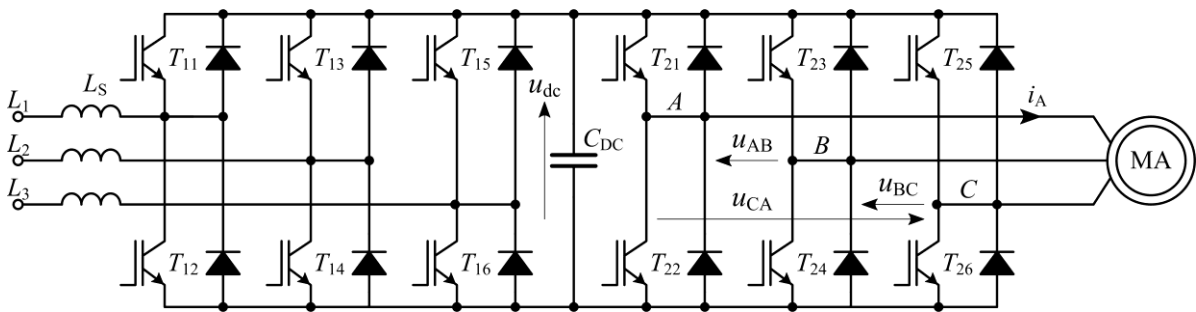
Rys. 14. Przekształtnik z separacją galwaniczną do współpracy z ogniwami fotowoltaicznymi

Kolejnym układem OZE w którym stosuje się przekształtniki są mikroturebiny wiatrowe. Pierwotnie w energetyce wiatrowej stosowano silniki indukcyjne klatkowe bezpośrednio przyłączone do sieci, a pracę napędu przy różnych prędkościach wiatru realizowano poprzez zmianę kąta natarcia łopatek silnika generatora wiatrowego. Umożliwiało to jedynie pracę generatorów wiatrowych w wąskim zakresie prędkości. W celu poszerzenia zakresu roboczego pracy generatora wiatrowego oraz uproszczenia mechanizmu regulacji położenia łopatek stosuje się w generatorach wiatrowych przekształtniki energoelektroniczne. Na rys. 15 pokazano najprostsze rozwiązanie stosowane w przekształtnikach mocy z generatorami z magnesami trwałymi (PMSG). Rozwiązanie to stosuje dla mocy od kilkuset watów do kilkudziesięciu kilowatów.



Rys. 15. Przekształtnik AC/DC/AC dla mikro turbin wiatrowych

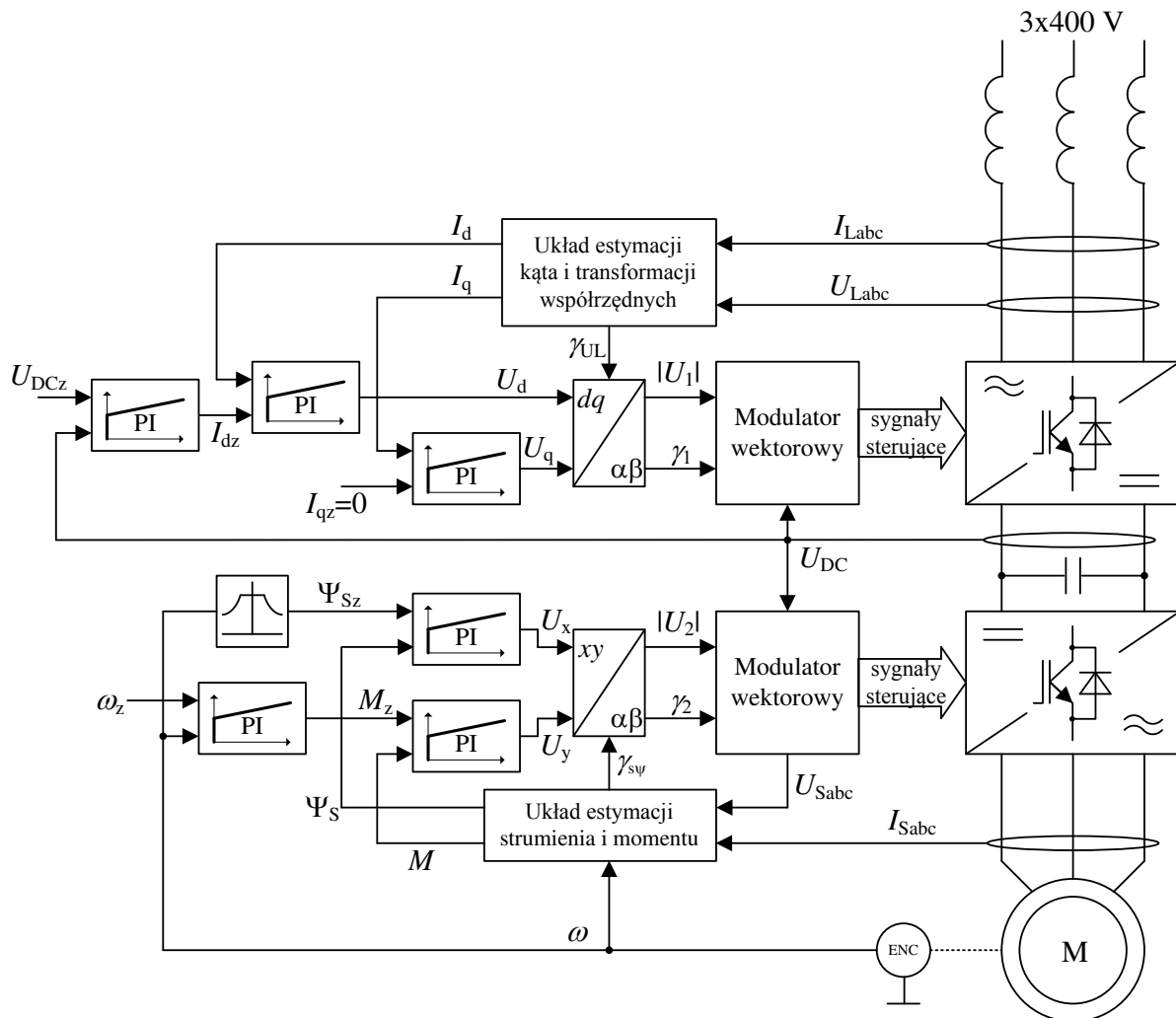
Na zaciskach generatora z magnesami trwałymi znajduje się prostownik diodowy D_1-D_6 , który zapewnia napięcie stałe o wartości zależnej od aktualnej prędkości wirowania. Do wyjścia prostownika przyłączony jest przekształtnik DC/DC typu BOOST (L_B , T_B i D_B) podwyższający napięcie u_{dc} do poziomu niezbędnego aby możliwy był zwrot energii do sieci zasilającej. Przekształtnik współpracujący z siecią zapewnia zwrot energii oraz quasi-sinusoidalny prąd sieci i_{ac} . Należy zauważyć, że topologia całego układu od strony zacisków przekształtnika diodowego jest taka sama jak dla przekształtnika współpracującego z ogniwami fotowoltaicznymi (rys. 10 i rys. 11). W rozwiązaniach większej mocy problemem jest optymalna praca przekształtnika DC/DC, który może być częścią przekształtnika charakteryzującą się dużymi gabarytami lub stratami mocy. Możliwe jest wtedy wykorzystanie jako indukcyjności L_B w przekształtniku podwyższającym napięcie indukcyjności rozproszenia generatora, przy czym prowadzi to do zwiększenia strat mocy w prostowniku diodowym. W niektórych rozwiązaniach stosuje się układy bez przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie, ale spełnione muszą być dwa wymogi, zastosowanie generatora o wystarczającej wartości napięcia wyjściowego (zawężony zakres regulacji) oraz przy projektowaniu prostownika tranzystorowego musi być uwzględniona zmienność napięcia obwodu pośredniczącego oraz jego wyższe wartości. Przekształtnik o schemacie jak na rys. 15 ma takie właściwości, że prądy pobierane z generatora są odkształcone.



Rys. 16. Schemat przekształtnika skompensowanego AC/DC/AC ze stopniem wejściowym typu AFE [6], [7]

W celu poprawy kształtu tych prądów oraz aby umożliwić zastosowanie w układzie maszyny asynchronicznej możliwe jest zastosowanie topologii AC/DC/AC pokazanej na rys. 16. Identyczną topologię stosuje się w układach napędowych wymagających długotrwałego zwrotu energii do sieci zasilającej. Stopień współpracujący z siecią zasilającą opisuje się w literaturze anglojęzycznej jako *active front-end converter* (AFE) [6], [7]. Jak można zauważyć przekształtnik sieciowy jest taki sam jak przekształtnik współpracujący z silnikiem. W przypadku przekształtnika sieciowego konieczne jest zastosowanie dławika wejściowego L_s . Możliwe jest również zastosowanie bardziej rozbudowanego filtra wejściowego, zapewniającego lepsze tłumienie harmonicznych prądu pochodzących od przełączeń tranzystorów w przekształtniku sieciowym, np. filtr typu LCL. Sprawność każdego z przekształtników wynosi od 90 do 95%, przy czym wyższe sprawności osiąga się dla układów większej mocy. Pomiedzy przekształtnikiem sieciowym i silnikowym, oprócz podobieństwa obwodów mocy, występuje podobieństwo w algorytmach sterowania, co pokazano na rys.17.

Przedstawiony na rys. 17 algorytm jest przeznaczony dla układów napędowych, ale po drobnych modyfikacjach może być on zastosowany w układach generacji.

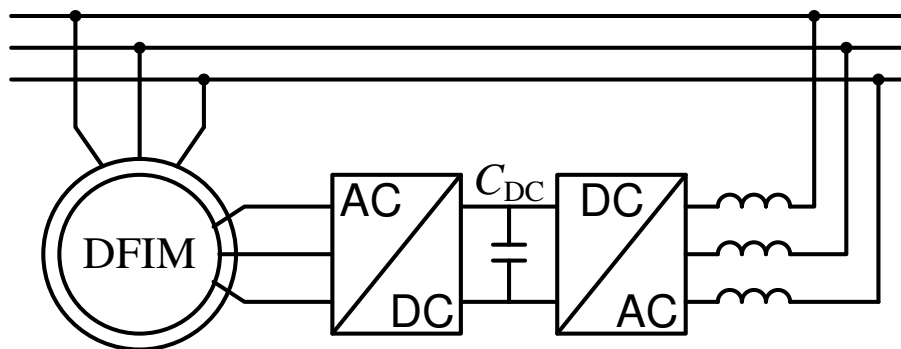


Rys. 17. Algorytm sterowania polowo-zorientowanego przekształtnika sieciowego (algorytm VOC) oraz przekształtnika współpracującego z maszyną (algorytm DTC-SVM)

Na rys. 17 pokazano jedno z rozwiązań sterowania polowo-zorientowanego, tzw. metodę bezpośredniego sterowania momentem z modulatorem wektorowym (DTC-SVM). Rozważania dotyczą zastosowania w układzie maszyny asynchronicznej, niemniej algorytm dla maszyny PMSG działa na zbliżonej zasadzie. W przypadku pracy napędowej nadrzędny regulator prędkości zadaje moment silnika a wewnętrzne regulatory (odpowiednio strumienia i momentu) kształtują zadane wartości napięć dla modulatora sterującego tranzystorami w przekształtniku silnikowym. W tym przypadku algorytm sterowania dla turbiny wiatrowej z nadrzędną pętlą regulacji prędkości powinien zapewniać śledzenie punktu mocy maksymalnej MPPT. Analizując algorytm sterowania przekształtnika sieciowego można zauważyć pewne podobieństwa w sterowaniu. W prezentowanym algorytmie regulacji polowo-zorientowanej w układzie z orientacją względem napięcia sieci (VOC – *voltage oriented control*) prądy sieci transformowane są do układu zorientowanego i przez to możliwa jest niezależna regulacja mocy czynnej i biernej w przekształtniku. Zadana wartość napięcia obwodu pośredniczącego generuje zadaną wartość prądu w osi d (odpowiedzialnej za moc

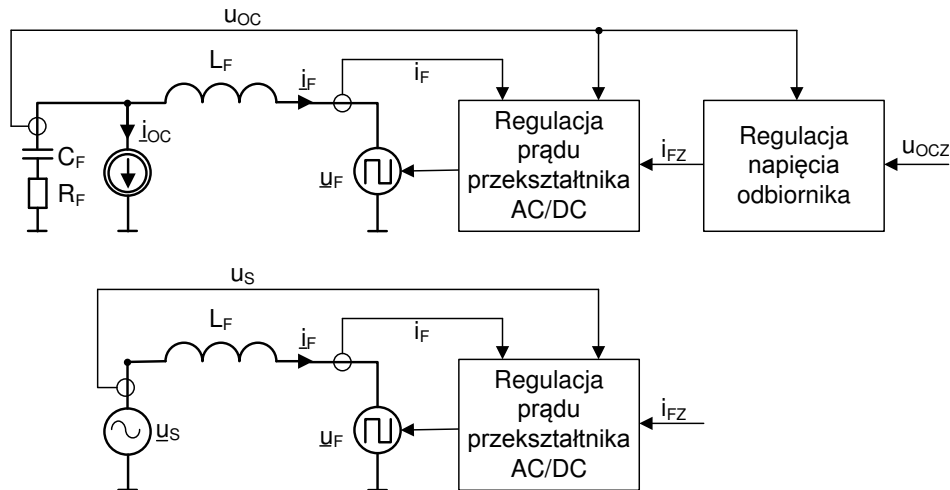
czynną), natomiast najczęściej składowa bierna prądu jest redukowana w celu zapewnienia jednostkowego współczynnika mocy. Istnieje natomiast możliwość aby poprzez składową bierną wpływać na wartość współczynnika mocy i generowanie mocy biernej. Wewnętrzne układy regulacji prądów zapewniają zadane wartości napięć dla modulatora sterującego przekształtnikiem sieciowym. Typowa dynamika kształtowania prądów w przekształtniku jest na poziomie pojedynczych milisekund.

Prezentowane wcześniej rozwiązania dla turbin wiatrowych nie obejmowały największych zakresów mocy. W takich przypadkach stosuje się przekształtniki wielopoziomowe lub możliwe jest zastosowanie maszyny dwustronnie zasilanej. Rozwiązanie z maszyną dwustronnie zasilaną pokazano na rys. 18. Maszyna dwustronnie zasilana posiada uzwojenia zarówno w wirniku jak i w stojanie, przy czym uzwojenia stojana podłączone są bezpośrednio do sieci zasilającej. Podłączając przekształtnik tranzystorowy (jak na rys. 16) do zacisków wirnika maszyny możliwe jest wpływanie zarówno na jej moc czynną i bierną, przy zachowaniu quasi sinusoidalnych prądów sieci. Istotną zaletą takiego rozwiązania jest fakt, że zakładając zawężony obszar regulacji prędkości (np. $0,7-1,3 n_N$) możliwe jest zaprojektowanie przekształtnika na ograniczoną moc (tu $0,3 P_N$ maszyny). Do wad takiego rozwiązania należy wysoka cena maszyny dwustronnie zasilanej oraz występowanie pierścieni ślizgowych i szczotek w maszynie, jednak jest to dobre rozwiązanie dla układów dużej mocy.



Rys. 18. Rozwiązanie elektrowni wiatrowej bazującej na maszynie dwustronnie zasilanej

Przekształtnik sieciowy AFE, pokazano na rys.16, może być wykorzystywany w: trójfazowych energetycznych filtrach aktywnych, prostownikach aktywnych większej mocy i układach zwrotu energii do sieci z OZE większej mocy. Różnice w pracy przekształtników wynikają jedynie z zastosowanych algorytmów sterowania. Istnieje również możliwość zastosowania takiego przekształtnika w układach zasilania bezprzerwowego większej mocy (w przypadku rozwiązań czteroprzewodowych stosuje się dodatkową gałąź podłączaną do przewodu neutralnego - przekształtniki czterogałęziowe). Ze względu na napięciowy charakter przekształtnika możliwa jest jego współpraca z siecią, praca na sieć wydzielaną, bądź praca z przełączaniem (współpraca z siecią i praca wyspowa w zależności od warunków). O pracy w danym trybie decydują zastosowane sprzężenia zwrotne, co pokazano na rys. 19.



Rys. 19. Sterowanie przekształtnikiem AC/DC w przypadku pracy wyspowej i współpracy z siecią

W przypadku pracy przekształtnika na sieć wydzieloną na wyjściu powinien się znajdować filtr dolnoprzepustowy (tu $L_F C_F$ z dodatkową rezystancją tłumiącą R_F). Odbiorniki (liniowe i nieliniowe) zostały zastąpione źródłem prądu i_{OC} modelującym odkształcony prąd odbiorników. Wewnętrzna pętla regulacji prądu zadaje napięcie na odbiorniku i kształtuje prąd i_F tak aby pokryć całe zapotrzebowanie na moc czynną i bierną. Nadrzędna regulacja napięcia odbiornika zapewnia odpowiednie kształtowanie sinusoidalnych napięć odbiornika, przy czym proces regulacji napięcia przebiega z dużą dynamiką (rzędu pojedynczych milisekund), tak aby zapewnić odpowiednie kształtowanie napięcia odbiornika również w przypadku odbiorników nieliniowych. Zadana wartość napięcia odbiornika powstaje w tym przypadku w wewnętrznym układzie kształtowania napięcia wzorcowego.

Dla współpracy przekształtnika z siecią sterowanie podlega drobnym modyfikacjom. W układzie może dalej występować pełna topologia filtra $L_F C_F$ lub pojemność może być odłączana. W przypadku współpracy z siecią nadrzędną wielkością sterowaną są składowe prądu sieci, które są kształtowane poprzez wewnętrzną pętlę regulacji prądu, przy czym niezbędna jest znajomość aktualnej wartości napięcia sieci. Taki algorytm pozwala na generację mocy biernej, mocy czynnej i harmonicznych w przekształtniku sieciowym (według potrzeb i założonych zadań).

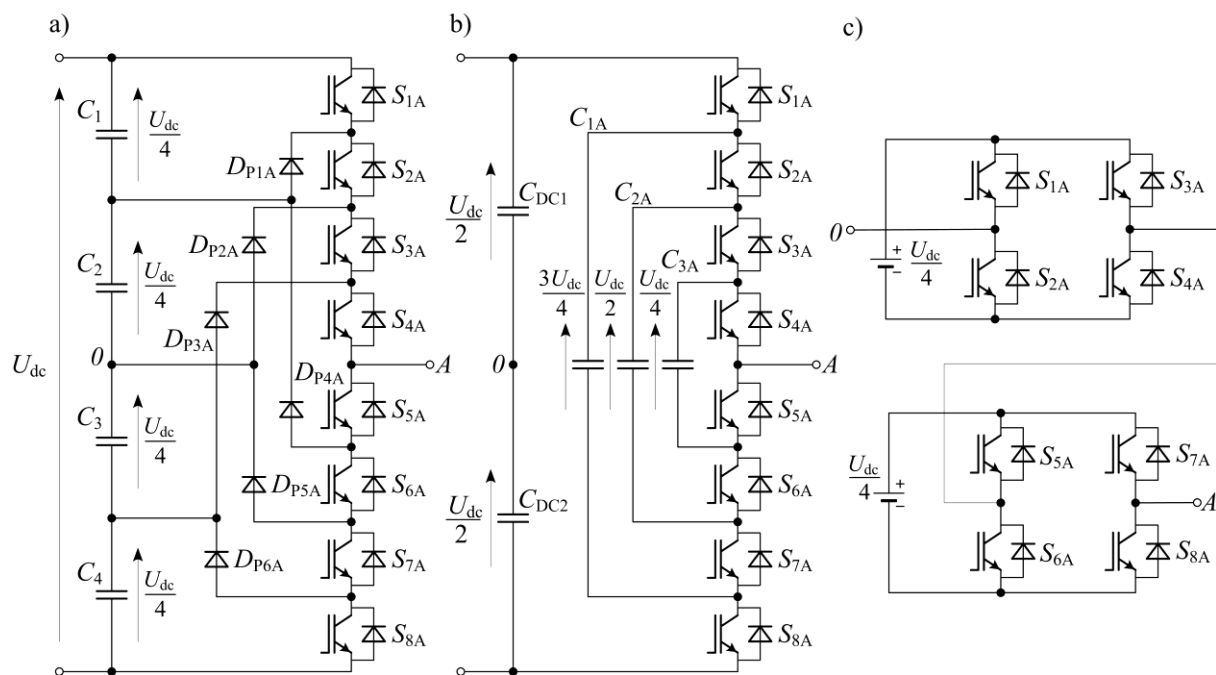
ZASTOSOWANIE PRZEKSZTAŁTNIKÓW WIELOPOZIOMOWYCH

Racjonalne uzasadnienie stosowania pojedynczych przekształtników o topologii pokazanej na rys. 7 i 16 kończy się na mocy około 630 kW i napięciu do 1000 V. W przypadku współczesnych rozwiązań przekształtników AC/DC i DC/AC większej mocy stosuje się przekształtniki wielopoziomowe. Idea ich polega na zastosowaniu tranzystorów o niższych napięciach blokowania niż napięcia generowane na wyjściu i napięcia w obwodzie napięcia stałego przekształtnika. Dodatkowo poprzez odpowiednie sterowanie możliwe jest redukcja harmonicznych w napięciu i prądzie wyjściowym przekształtnika.

Z punktu widzenia funkcjonalności, przekształtniki wielopoziomowe działają podobnie jak przekształtniki wcześniej omawiane, jednak wykorzystują one zwiększoną liczbę zaworów

półprzewodnikowych. Dodatkowo wymagają one bardziej złożonych układów sterowania oraz odpowiednich metod modulacji umożliwiających wyrównywanie napięć obwodów pośredniczących. Podnosi to zdecydowanie koszt przekształtników. Należy zaznaczyć, że układy te są mniej rozpowszechnione niż układy niskonapięciowe.

Aktualnie istnieje dużo różnych układów wykorzystujących przekształtniki wielopoziomowe i stanowią one jedno z ważniejszych zagadnień energoelektroniki [8], [9]. Wywodzą się one z trzech podstawowych topologii przekształtników z diodami poziomującymi z kondensatorami poziomującymi i kaskadowych. Schematy jednofazowych przekształtników wielopoziomowych pokazano na rys. 20.



Rys. 20. Podstawowe topologie przekształtników wielopoziomowych: a) z diodami poziomującymi, b) z kondensatorami poziomującymi, c) przekształtnik kaskadowy

W każdej z prezentowanych topologii liczba tranzystorów jest taka sama i wynosi 8, a napięcia występujące na nich są identyczne i wynoszą $\frac{1}{4}U_{dc}$ (U_{dc} jest sumarycznym napięciem obwodu pośredniczącego dla przekształtnika z rys. 20a, które odpowiada wartości szczytowej międzyfazowego napięcia przekształtnika trójfazowego). Przekształtnik z diodami poziomującymi (rys. 20a) ma obwód pośredniczący napięcia składający się z czterech kondensatorów oraz diod poziomujących, których napięcia wsteczne są różne i wynoszą $\frac{1}{4}U_{dc}$, $\frac{1}{2}U_{dc}$, $\frac{3}{4}U_{dc}$. W przekształtniku tym ważne jest zachowanie stałego rozkładu napięć na poszczególnych kondensatorach obwodu pośredniczącego, co najczęściej uzyskuje się, w przypadku liczby poziomów większej niż 3, poprzez zastosowanie dodatkowego układu zasilającego wykorzystującego wielouzwojeniowy transformator. W przekształtniku z kondensatorami poziomującymi (rys. 20b) zamiast diod poziomujących stosuje się kondensatory C_1, C_2, C_3 , na których utrzymywane są odpowiednio napięcia $\frac{3}{4}U_{dc}$, $\frac{1}{2}U_{dc}$, $\frac{1}{4}U_{dc}$. Odpowiednie łączenie szeregowe tych kondensatorów pozwala na uzyskanie pięciu poziomów napięć wyjściowych, przy czym większość z nich uzyskuje się w sposób nadmiarowy, co pozwala stabilizować napięcia poszczególnych kondensatorów.

Przekształtnik o topologii kaskadowej (rys. 20c) jest zbudowany z szeregowo połączonych przekształtników mostkowych typu H. Nie wymaga stosowania dodatkowych elementów (diod lub kondensatorów), ale jego zasadniczą wadą jest potrzeba stosowania separowanych galwanicznie źródeł napięć w obwodach pośredniczących przekształtników mostkowych.

Każda z prezentowanych podstawowych topologii przekształtników wielopoziomowych wymaga w cyklu pracy przełączania tranzystorów z podobną częstotliwością przełączania, przy czym, w jednofazowej topologii przekształtnika z diodami poziomującymi zawsze przełącza się jeden tranzystor, podczas gdy w pozostałych dwóch przekształtnikach tranzystory zostają załączone lub wyłączone w zależności od wartości odtwarzanego napięcia wyjściowego.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w opracowaniu zagadnienia mają na celu przybliżenie problematyki przekształtników energoelektronicznych osobom zajmującym się energetyką prosumencką. Wydaje się to niezbędne ze względu na fakt, że współcześnie zdecydowana większość urządzeń odbiorczych oraz praktycznie wszystkie związane z generacją energii elektrycznej w odnawialnych źródłach energii bazują na takich rozwiązaniach. Co więcej uzyskanie wiedzy dotyczącej tych przekształtników pozwala na lepsze zrozumienie procesów w nich zachodzących, a co za tym idzie umożliwia bardziej świadome decyzje przy wyborze różnych rozwiązań przez prosumenta. Szeroki wachlarz rozwiązań przekształtników prezentowanych w opracowaniu pokazuje, że w obszarze zainteresowań prosumentów powinny znaleźć się przekształtniki współpracujące z siecią zasilającą, ale również przekształtniki powiązane z przetwarzaniem energii (np. w układach napędowych).

LITERATURA

- [1] M. Nowak, R. Barlik: *Poradnik inżyniera energoelektronika*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Wydanie 1, Warszawa 1998.
- [2] N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins: *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd Edition, 2002.
- [3] A. R. Prasad, P. D. Ziogas and S. Manias: *A novel passive wave-shaping method for single phase diode rectifiers*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.37, No.6, pp. 521-530, Dec. 1990.
- [4] S.B. Kjaer, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg: *A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 5, pp. 1292-1306, Sept.-Oct. 2005.
- [5] F. Blaabjerg, Yongheng Yang, Ke Ma: *Power electronics - key technology for renewable energy systems - status and future*. 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2013.

- [6] M. D’Incecco, P. Marino, N. Visciano: *A New Controlled Active Front End Based on Voltage Processing and Supply Current Reaction*. Power Electronics and Drive Systems PEDS’2001, Vol. 1, pp. 373-378, 2001.
- [7] P. Marino, L. Rubino, G. Brando, A. Del Pizzo: *Different topologies of active front ends for high power induction motor drives*. International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 781 - 788, 2014.
- [8] J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer, I. E. Lizama: *A survey on neutral-point-clamped inverters*. IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 57, no. 7, pp. 2219–2230, Jul. 2010.
- [9] J. Rodríguez, J.S. Lai, F.Z. Peng: *Multilevel inverters: a survey of topologies. controls, and applications*. IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 49, No. 4, pp. 724–738, Aug. 2002,

Księga Szkoła

Teza. Przekształtniki energoelektroniczne są obecnie głównym wyznacznikiem zakresu potrzebnej zmiany podejścia metodologicznego w modelowaniu PME (prosumencka mikroinfrastruktura energetyczna, energetyka prosumencka) w stosunku do modelowania SEE (system elektroenergetyczny, elektroenergetyka WEK).

Zadanie do rozwiązania. Ogólnym zadaniem, które się tu formułuje, jest potrzeba zbudowania „dualnego” (tego określenia używa się na razie opisowo) – względem SEE – modelu PME jako obiektu sterowania i regulacji. Model dualny (zamiast o modelu dualnym, można też mówić o zagadnieniu dualnym) powinien obejmować takie aspekty modelu prymarnego jak: charakterystyki węzłów SEE: „częstotliwość – moc czynna”, „napięcie – moc bierna”; stabilność SEE (statyczna, dynamiczna); regulacja pierwotna, wtórna, trójna; jakość energii; automatyka zakłóceń (SCO, SZR); inne. Dla zilustrowania „dualnych” zagadnień w modelu PME można się tu odwołać do jednej z najważniejszych składowych modelu prymarnego, którą jest charakterystyka częstotliwościowo-mocowa węzła SEE. Otóż w modelu dualnym PME tej składowej odpowiada charakterystyka napięciowo-mocowa (moc czynna). Odrębną sprawą jest szyna AC w modelu prymarnym oraz pożądana konfiguracja szyn AC i DC w modelu dualnym.

Jan Popczyk

Datowanie (wersja oryginalna) – 10.12.2014 r. Wersja zmodyfikowana (1) – 6.02.2015 r.