

Stanowisko do badania filtrów dla napędów prądu przemiennego

Tomasz Biskup, Henryk Kołodziej, Jarosław Michalak, Aleksander Bodora

1. Wstęp

W niskonapięciowych układach napędowych prądu przemiennego jako stopień wejściowy wykorzystuje się 6-pulsowe prostowniki diodowe lub prostowniki tranzystorowe (*Active Front End – AFE converters*), gdy wymagany jest zwrot energii do sieci zasilającej. W obu przypadkach przekształtniki podłącza się do sieci poprzez filtry sieciowe wymagane do normalnej pracy przekształtnika (rozwiązanie AFE) lub ograniczające negatywny wpływ napędów na sieć (harmoniczne prądu). Potrzeba ograniczania wpływu napędów na sieć wynika m.in. z norm określających poziomy dopuszczalne harmonicznych w prądzie odbiorników, np. PN-EN 61000-3-12 [1]. Projektując filtry sieciowe, uwzględnia się np. moc obciążenia czy widmo harmonicznych prądu wynikające z rzeczywistego stanu pracy napędu. Ma to znaczenie zarówno dla prostowników diodowych, gdzie występują relatywnie wysokie poziomy harmonicznych niższych rzędów [2], jak i tranzystorowych, gdzie występują głównie harmoniczne wynikające z przełączeń tranzystorów [3, 4]. W celu sprawdzenia poprawności działania filtru należy przetestować jego pracę w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, szczególnie przy analizie redukcji strat mocy nowych materiałów magnetycznych rdzenia [5]. Stąd wynika potrzeba opracowania stanowiska badawczego, będącego tematem artykułu. Aby umożliwić testy filtrów sieciowych dla obu typów przekształtników, w rozważanym stanowisku połączono obwodem pośredniczącym prostownik diodowy i przekształtnik tranzystorowy. Układ taki zapewnia pobór mocy (prostownik diodowy), a następnie jej zwrot do sieci poprzez przekształtnik tranzystorowy. Pozwala to na testowanie filtrów sieciowych w znamionowych warunkach pracy, przy pokryciu jedynie strat mocy. Aby w układzie nie występowały prądy wyrównawcze (wynikające z różnic napięć chwilowych w przekształtnikach), zastosowano transformator separacyjny. W dalszej części artykułu przedstawiono ideę działania oraz rolę poszczególnych elementów stanowiska.

2. Opis stanowiska do badania dławików

Przy opracowywaniu stanowiska do testowania filtrów sieciowych uwzględniono:

- potrzebę testów rozwiązań dla prostowników diodowych i przekształtników tranzystorowych o mocach do 350 kVA;
- możliwość badania filtrów sieciowych na napięciu 400 i 690 V (zasilanie z sieci 400 V);
- możliwość ustawiania częstotliwości łączy oraz regulacji mocy czynnej i biernej w przekształtniku tranzystorowym.

Schemat blokowy stanowiska do testów filtrów pokazano na rys. 1. Elementami podstawowymi są: *przekształtnik 1*

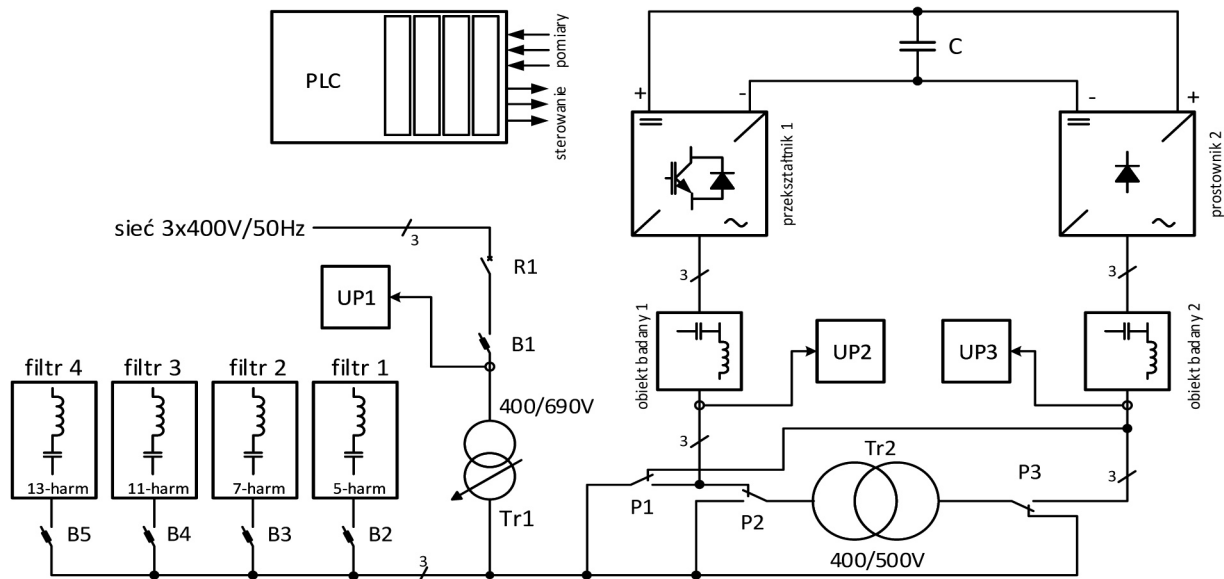
Streszczenie: W artykule przedstawiono ideę oraz wyniki wybranych badań symulacyjnych i eksperymentalnych prototypowego stanowiska przeznaczonego do badania filtrów pasywnych, znajdujących zastosowanie w napędach prądu przemiennego. W napędach jako stopień wejściowy, stosuje się prostowniki diodowe lub przekształtniki tranzystorowe (tzw. AFE – *Active Front End*). W celu zapewnienia poprawnej pracy takich układów wymagane są odpowiednie filtry pasywne (np. dławiki). Artykuł przedstawia koncepcję i wykonanie stanowiska pozwalającego na testowanie filtrów pasywnych dla obu rozwiązań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych (moce, harmoniczne prądu). W pierwszej części artykułu omówiono ideę rozwiązania oraz zagadnienia związane z realizacją stanowiska. Następnie przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych z uwzględnieniem możliwości ograniczania wymaganej mocy zwarciorowej w punkcie przyłączenia oraz mocy znamionowych wybranych komponentów stanowiska. Całość uzupełniono o wybrane wyniki badań eksperymentalnych z etapu uruchamiania stanowiska.

Słowa kluczowe: filtry sieciowe, wpływ napędów prądu przemiennego na sieć zasilającą, badania dławików sieciowych, przekształtniki tranzystorowe

🇬🇧 SETUP FOR TESTING FILTERS USED IN AC DRIVE SYSTEMS

Abstract: *The paper presents an idea of a setup for testing passive filters (for example: chokes) that are used in drive systems. The article presents selected simulation and experimental results of operation in such system. Typically for low voltage drive systems, as the line side converter, the diode rectifier or active front end converters (for energy recuperation) are used. To ensure proper operation of such type of converters and for reduction of negative influence of drives on the line it is necessary to use input filters that have to be properly designed. The paper presents the idea of setup for testing inductors and input filters for diode rectifiers and AFE converters, that ensures possibility of testing the filters in operation conditions similar to real (power, current, harmonics). The first part of the paper presents scheme, description, features and requirements for realization of presented setup for testing chokes with taking into account the power limitation in connection point. After that the selected results of simulation and laboratory results of testing the system that proof its proper operation are presented.*

Keywords: AC line input filters, influence of AC drives on the line, testing of line side inductors, active front end converters



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska badawczego

(tranzystorowy – pracujący tu jako DC/AC) i *przekształtnik 2* (diodowy AC/DC) połączone wspólną szyną DC z baterią kondensatorów. Do przetworników podłącza się filtry sieciowe, przy czym podczas badania podłączone muszą być zawsze oba. Do każdego z wejść przetworników podłączone są układy pomiarowe *UP2* i *UP3*, pozwalające na monitorowanie każdego z wejść.

Do poprawnej pracy stanowiska wymagana jest separacja realizowana transformatorem *Tr2*, uniemożliwiająca powstanie wyrównawczych prądów w chwilach, gdy potencjał dodatni lub ujemny kondensatora będzie po stronie przetwornika tranzystorowego podłączony do innej fazy niż to wynika z pracy prostownika diodowego. Aby uzyskać odpowiednie napięcie dla pracy przetwornika tranzystorowego (układ podwyższający napięcie), transformator ma przekładnię 1,2. Transformator dobrano odpowiednio do mocy znamionowej z zapasem wynikającym z odkształceń prądu. W celu zapewnienia jak najmniejszej impedancji sieci w punkcie przyłączenia badanego filtra (wpływającej na jego pracę) zastosowane zostały przełącznice *P1–P3*, pozwalające na zmiany punktu podłączenia strony pierwotnej i wtórnej transformatora *Tr2*. Podczas badań filtra dla prostownika diodowego transformator *Tr2* przyłączany jest między sieć a przetwornik tranzystorowy tak, aby obniżać napięcie przetwornika. W przypadku badania filtra przetwornika tranzystorowego transformator *Tr2* podłączony jest między sieć a prostownik diodowy tak, aby podwyższać napięcie prostownika.

Stanowisko ma umożliwiać pracę układu przy napięciach 400 i 690 V, dlatego transformator *Tr2* (gdy nie będzie się zmieniać konfiguracji jego połączeń), jest przygotowany na napięcie 690 V oraz 120% prądu wynikającego z mocy stanowiska, przy zasilaniu napięciem 400 V, z uwzględnieniem zapasu na harmoniczne prądu oraz generację mocy biernej. W celu redukcji mocy możliwe jest stosowanie transformatora umożliwiającego

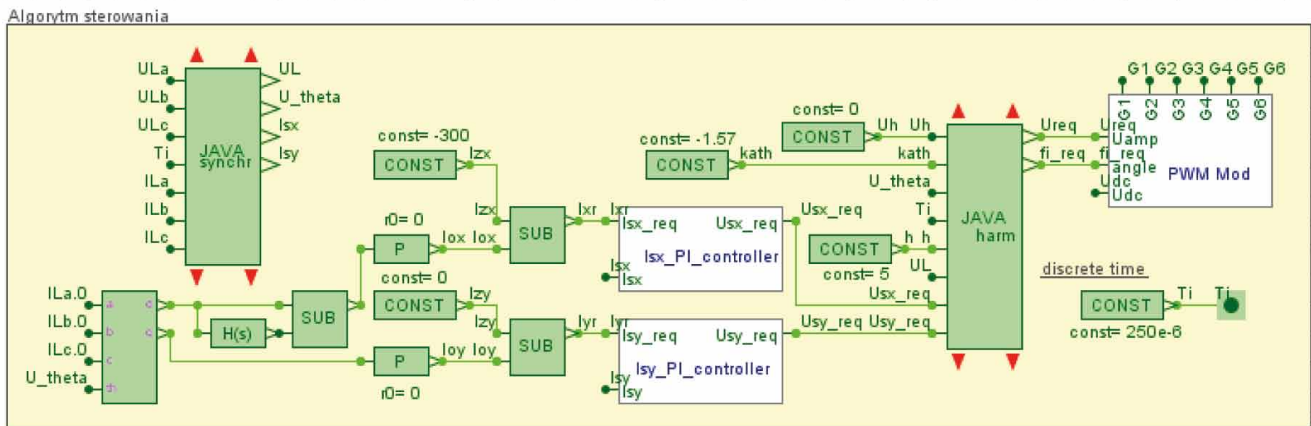
zmianę konfiguracji uzwojeń. Uzwojenia są wtedy przygotowane na pracę przy napięciu 400 V i prądzie wynikającym z pracy przy napięciu 690 V. W przypadku pracy z napięciem 400 V uzwojenia byłyby łączone w trójkąt (Dd0), natomiast dla napięcia 690 V w gwiazdę (Yy0). Zerowe przesunięcie wynika z punktu pomiaru napięcia przetwornika tranzystorowego.

Aby umożliwić testy filtrów przy napięciu 400 V, jak i 690 V, stanowisko wyposażono w transformator *Tr1*, przy czym, ze względu na miejsce przyłączenia, moc tego transformatora może być niższa od znamionowej stanowiska (prąd transformatora będzie wynikał głównie ze strat mocy w przetwornikach i elementach badanych oraz różnic wartości chwilowych prądów wejściowych obu przetworników).

Do opcjonalnych elementów stanowiska należy zaliczyć pasywne filtry harmonicznych *filtr 1 – filtr 4*. Filtry te pozwalają na ograniczenie mocy w punkcie przyłączenia stanowiska do sieci (oraz prądów zabezpieczeń) i na redukcję mocy transformatora *Tr1*. Analizę wpływu filtrów pasywnych przedstawiono w części dotyczącej badań symulacyjnych. Moc w punkcie przyłączenia mierzy układ *UP1*.

Przetwornik tranzystorowy (*przekształtnik 1*) może realizować funkcje dodatkowe, takie jak generacja mocy biernej czy też generacja harmonicznych w prądzie, co zmniejsza wpływ stanowiska na sieć (omówiono w analizie badań symulacyjnych). Dzięki dodatkowym funkcjom przetwornika możliwe jest testowanie filtra dla przetwornika tranzystorowego również dla pracy jako energetyczne filtry aktywne [6]. Założona możliwość generacji wybranych harmonicznych prądu umożliwia testowanie dławików w warunkach nietypowych.

Elementem odpowiedzialnym za sterowanie elementami automatyki i przetwornikiem tranzystorowym jest sterownik PLC. Zapewnia on odpowiedni interfejs użytkownika oraz zbieranie danych z układów pomiarowych *UP1–UP3* i czujników temperatury.



Rys. 2. Blok sterowania prostownika tranzystorowego w modelu symulacyjnym

3. Model symulacyjny układu i algorytm sterowania prostownika tranzystorowego

W celu weryfikacji idei stanowiska opracowano jego model symulacyjny w programie GeckoCIRCUITS. W modelu testowano pracę układu przy napięciach 400 V i 690 V z przełączeniem transformatora między przekształtnikami. Transformator miał napięcie zwarcia 3%, przekładnię 1,2 oraz moc zainstalowaną 600 kVA. Jako moc zwarcia sieci przyjęto 630 kVA, odpowiadającą mocy zwarcia w punkcie przyłączenia stanowiska. Prostownik diodowy w symulacjach pracował bez filtrów, a w prostowniku tranzystorowym zastosowano dławiki 600 uH. Podczas badań symulacyjnych stosowano opcjonalnie filtry pasywne (5, 7, 11 i 13 harmonicznej), w celu redukcji prądów w punkcie zasilania. Należy zaznaczyć, że prostownik tranzystorowy pracuje zawsze w trybie zwrotu energii do sieci, natomiast prostownik diodowy dostarcza energii do obwodu DC i zapewnia (dzięki transformatorowi) odpowiedni poziom napięcia dla przekształtnika tranzystorowego.

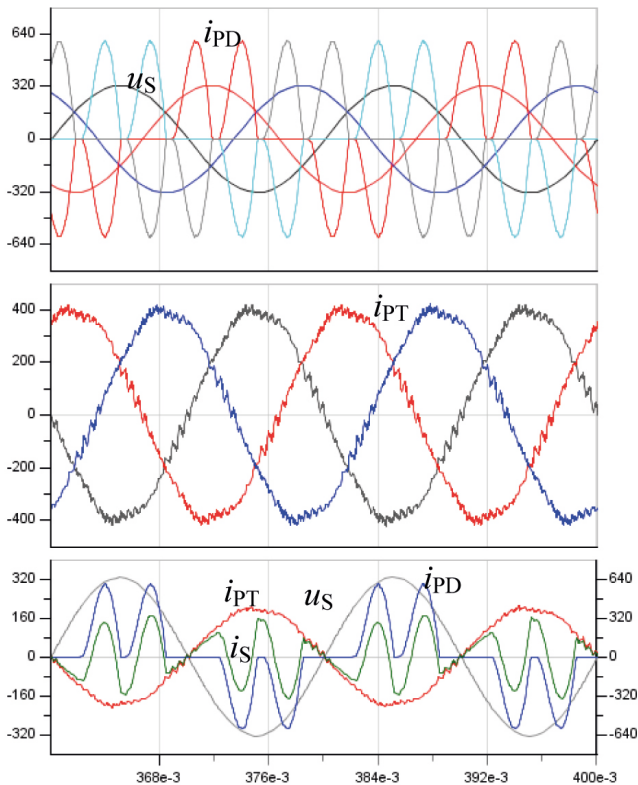
Algorytm sterowania modelu przekształtnika tranzystorowego, pokazany na rys. 2, bazuje na wymuszeniu składowych x i y prądu, decydujących odpowiednio o mocy czynnej i biernej w układzie. Zmiany prądu x powodują odpowiednie zmiany prądu prostownika diodowego, a napięcie kondensatora obwodu pośredniczącego (dzięki transformatorowi) jest na poziomie odpowiednim dla przekształtnika tranzystorowego (napięcie to zależy od obciążenia i parametrów filtrów). Algorytm sterowania zrealizowano w wersji dyskretnej, przy założeniu częstotliwości pracy 2 kHz i podwójnym odświeżaniu rejestrów z zadanymi wypełnieniami PWM. Regulacja odbywa się w układzie wirującym zgodnie z wektorem przestrzennym napięcia sieci. Wielkościami zadanymi są prądy I_{zx} i I_{zy} (zadana moc czynna i bierna). Na podstawie tych prądów w regulatorach PI wyznaczane są napięcia, transformowane do układu stacjonarnego i realizowane w modulatorze PWM Mod. W układzie sterowania istnieje możliwość realizacji funkcji dodatkowych. Element *JAVA_harm* umożliwia zadawanie amplitudy i kąta przesunięcia dla określonej harmonicznej napięcia i generację tej harmonicznej prądu w przekształtniku tranzystorowym.

Dodatkowymi sygnałami zadanymi dla układu sterowania mogą być prądy I_{ox} i I_{oy} , generowane na podstawie prądów prostownika diodowego. Transformacja prądów prostownika diodowego do wirującego układu odniesienia wraz z filtracją w filtrze górnoprzepustowym (transmitancja $H(s)$ i element odejmujący *SUB*) pozwala na realizację aktywnej filtracji w prostowniku tranzystorowym, przy czym filtracja ta może być wyłączana za pomocą wzmacniaczy *P*. Pozwala to ograniczać prądy sieci przy testach dławika prostownika diodowego bez stosowania filtrów pasywnych.

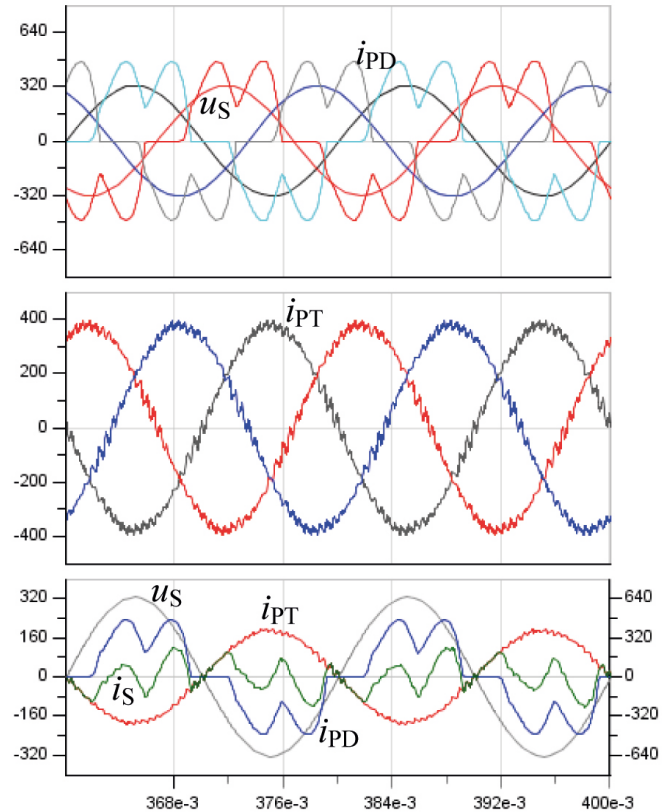
4. Wyniki badań symulacyjnych układu

Na rys. 3 pokazano wyniki symulacji dla opisanego modelu przy badaniu filtra dla prostownika diodowego i wartości skutecznej prądu prostownika wynoszącej 300 A. Współczynniki odkształceń prądu THD wynoszą odpowiednio 77% dla prostownika diodowego i 4,8% dla przekształtnika tranzystorowego. Pokazano tu przebiegi: napięć sieci u_S , prądów prostownika diodowego i_{pD} , prądów przekształtnika tranzystorowego i_{pT} oraz napięcia i prąd sieci u_S, i_S , prąd prostownika diodowego i_{pD} i tranzystorowego i_{pT} dla jednej fazy.

Dzięki podłączeniu transformatora *Tr2* do przekształtnika tranzystorowego nie wzrasta impedancja w punkcie przyłączenia do sieci prostownika diodowego, co lepiej odzwierciedla pracę w rzeczywistych warunkach. To podłączenie powoduje wzrost prądów przekształtnika tranzystorowego o 20% ze względu na obniżone napięcie pracy. Ograniczona moc zwarcia powoduje, że napięcie za transformatorem jest odkształcone, co z kolei wpływa na występowanie odkształceń prądów przekształtnika tranzystorowego. Prąd sieci jest różnicą między wartościami chwilowymi prądów obu prostowników, co musi być uwzględnione przy doborze zabezpieczeń w punkcie przyłączenia. Na rys. 4 przedstawiono sytuację, gdy badany jest filtr sieciowy dla przekształtnika tranzystorowego. W tym układzie transformator podłączony jest do wejścia prostownika diodowego, co spowodowało obniżenie współczynnika odkształceń THD do 36%. Prądy przekształtnika tranzystorowego są bliższe sinusoidzie (THD 4,5%) oraz mają niższe amplitudy. Poza tymi różnicami praca układu jest identyczna z poprzednio opisaną.



Rys. 3. Badania filtrów sieciowych dla prostownika diodowego (300 A)

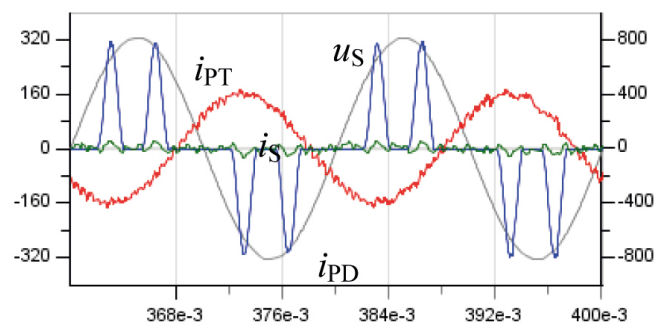


Rys. 4. Badania filtrów dla przekształtnika tranzystorowego (300 A)

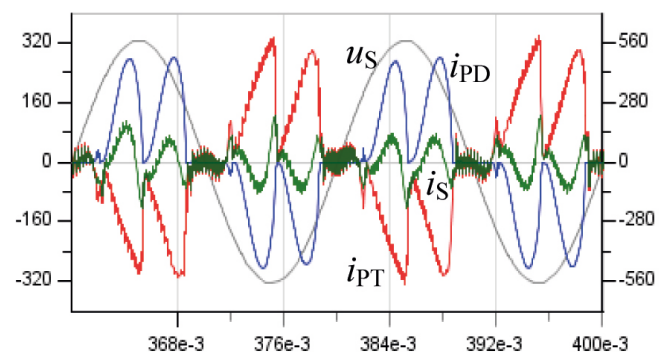
Na rys. 5 pokazano pracę stanowiska (dla układu z rys. 3) z opcjonalnymi filtrami pasywnymi 5 i 7, 11 i 13 harmonicznej, co pozwoliło na redukcję wartości chwilowych prądu sieci (kolor zielony). Moc bierną, kompensującą pojemności filtrów, generuje prostownik tranzystorowy.

Jak można zauważyć, zastosowanie filtrów pasywnych spowodowało zmniejszenie zastępczej impedancji wejściowej dla prostownika diodowego i zwiększenie wartości współczynnika THD do 123%. Wartość skuteczna prądu sieci została w ten sposób ograniczona do 23 A.

Alternatywnym rozwiązaniem, pozwalającym na ograniczenie prądu sieci, jest funkcja aktywnej filtracji harmoniczných w sterowaniu prostownika tranzystorowego, co pokazano na rys. 6. Rysunek przedstawia wyniki symulacji dla badawia dławika sieciowego o indukcyjności 20 μH , dla prostownika diodowego przy prądzie 260 A. W tym przypadku prąd sieci został zredukowany do 70 A, a widoczne w prądzie sieci tętnienia wynikają z ograniczonej dynamiki układu regulacji przekształtnika tranzystorowego. W celu uzyskania lepszego efektu filtracji zwiększona została częstotliwość przełączeń tranzystorów do 4 kHz oraz zmniejszona indukcyjność dławika filtra dla przekształtnika tranzystorowego do 100 μH . Układ regulacji przekształtnika tranzystorowego realizuje wtedy zadany prąd odpowiedzialny za moc czynną w układzie oraz dodatkowo generuje, wynikające z działania prostownika diodowego, harmoniczne i moc bierną.



Rys. 5. Badania układu z rys. 3 z opcjonalnymi filtrami pasywnymi



Rys. 6. Aktywna filtracja harmoniczných w prostowniku tranzystorowym, badania filtra dla prostownika diodowego

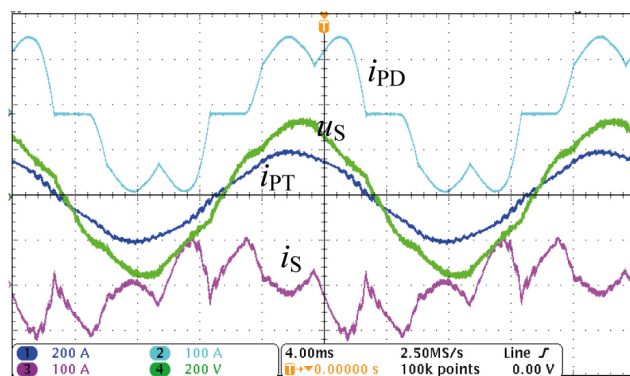


Rys. 7. Stanowisko badawcze do testowania filtrów stosowanych w napędach

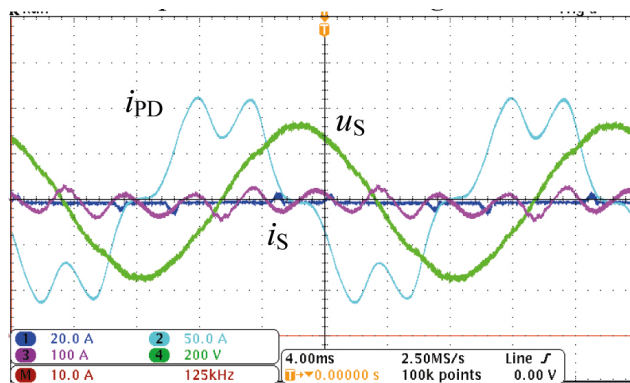
5. Wyniki badań laboratoryjnych

Na rys. 7 pokazano zdjęcia stanowiska zrealizowanego w ramach projektu. W szafie po lewej stronie umieszczone zostały układy automatyki zabezpieczeniowej i sterowniczej, sterownik PLC oraz transformator $Tr1$. W środkowej szafie umieszczone są przekształtniki diodowy i tranzystorowy, wraz z układem sterowania, oraz kondensatory filtrów biernych poszczególnych harmonicznych. W szafie po prawej stronie umieszczono dławiki filtrów harmonicznych oraz obwody przełączniczy wraz z zaciskami do podłączania badanych filtrów sieciowych. Poza szafą (ze względu na gabaryty) umieszczony został transformator $Tr2$. Na rys. 8 i 9 pokazano wyniki badań laboratoryjnych z etapu uruchamiania stanowiska w instalacji docelowej. Podczas testów sprawdzono działanie przekształtnika przy zasilaniu napięciem 400 V i 690 V oraz przeprowadzono testy wybranych filtrów sieciowych dla prostowników diodowych. Przekształtnik tranzystorowy współpracował z dławikami powietrznymi 1 mH, 170 A.

Na rys. 8 pokazano pracę stanowiska przy teście dławika sieciowego dla prostownika diodowego (transformator $Tr2$ włączony między przekształtnik tranzystorowy a sieć). Prąd sieci (ze względu na brak filtrów pasywnych) jest różnicą wartości chwilowych prądów obu przekształtników. Wyższa wartość prądu przekształtnika tranzystorowego wynika z pomiaru prądu za transformatorem obniżającym napięcie. Na rys. 9 przedstawiono badanie filtra dla prostownika diodowego, ograniczającego THD prądu. Na rysunku widoczny jest prąd bierny związany z pojemnością w filtrze oraz występowanie piątej harmonicznej prądu związane z wpływem odkształceń napięcia sieci w punkcie zasilania (filtr pracował tu jako nieobciążony – kolorem granatowym pokazano prąd po stronie prostownika diodowego). Przekształtnik tranzystorowy służył tu do kompensacji mocy biernej generowanej przez filtr i stąd prąd po stronie sieci zawiera jedynie piątą harmoniczną generowaną w filtrze. Dzięki stanowisku możliwe było przetestowanie pracy niniejszego filtra przy różnych obciążeniach, przy ograniczeniu mocy pozornej w punkcie podłączenia stanowiska. Możliwa była również weryfikacja wpływu odkształconego



Rys. 8. Badania dławika sieciowego dla prostownika diodowego



Rys. 9. Badania filtra ograniczającego THD prądu prostownika diodowego

napięcia sieci na pracę filtra dla różnych poziomów obciążenia prostownika diodowego.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono ideę, konstrukcję, wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych stanowiska do badania filtrów sieciowych stosowanych w prostownikach diodowych i tranzystorowych. W artykule omówiono role poszczególnych elementów, ideę stosowania elementów dodatkowych oraz możliwości ograniczania wpływu stanowiska na sieć zasilającą. Wysoka sprawność stanowiska uzyskiwana jest poprzez przekazywanie mocy do sieci przez prostownik tranzystorowy. Funkcje dodatkowe układu sterowania prostownika tranzystorowego pozwalają na badania filtrów w specyficznych warunkach, a filtry pasywne i funkcja aktywnej filtracji pozwalają zredukować moc w punkcie przyłączenia stanowiska do sieci. Wyniki badań symulacyjnych oraz przedstawione wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają poprawne działanie stanowiska w analizowanych stanach.

Literatura

- [1] PN-EN 61000 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – część 3-2: Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A), część 3-12: Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym > 16 A i ≤ 75 A przyłączonych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia.
- [2] HANZELKA Z.: *Jakość energii elektrycznej, Część 4: Wyższe harmoniczne napięć i prądów*. Materiały ze strony internetowej. www.twelvee.com.pl.
- [3] CZORNIK J., ŁUKIEWSKI M.: *Filtry harmoniczných gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej oraz wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych*. „Zeszyty Problematyczne – Maszyny Elektryczne” 106/2015.
- [4] MICHALAK J., ZYGMANOWSKI M., BISKUP T., KOŁODZIEJ H.: *Model przekształtnika trójpoziomowego NPC umożliwiającego zwrot energii do sieci zasilającej*. „Logistyka” 6/2014.
- [5] SZYNOWSKI J., KOLANO R., KOLANO-BURIAN A., POLAK M.: *Reduction of power losses in the tape-wound FeNiCuNbSiB nanocrystal line cores using interlaminar insulation*. „IEEE Transactions on Magnetics”, Vol. 50, Iss. 4, April 2014.
- [6] CICHOWLAS M., MALINOWSKI M., SOB CZUK D.L., KAŻMIERKOWSKI M.P., RODRIQUEZ P., POU J.: *Active filtering function of*

tree-phase PWM boost rectifiers under different line voltage conditions. „IEEE Transaction on Industrial Electronics”, Vol. 52, No. 2, April 2005.

Artykuł prezentuje wyniki związane z realizowanym projektem współfinansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój nr POIR.04.01.02-00-0001/16, pt. *Innowacyjne i energooszczędne nanokrystaliczne dławiki filtrów dla poprawy jakości energii elektrycznej i ograniczenia negatywnego wpływu energetyki na środowisko*.



dr inż. Tomasz Biskup – ENEL-PC Sp. z o.o.

e-mail: t.biskup@enel-pc.pl

dr inż. Henryk Kołodziej – ENEL-PC Sp. z o.o.

e-mail: henryk.kolodziej@enel-pc.pl

dr inż. Jarosław Michalak – Politechnika Śląska,

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

e-mail: jaroslaw.michalak@polsl.pl

dr inż. Aleksander Bodora – Politechnika Śląska,

Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

e-mail: aleksander.bodora@polsl.pl

artykuł recenzowany