

Tomasz Biskup, Henryk Kołodziej, ENEL-PC, sp. z o.o., Przyszowice
Jarosław Michalak, Politechnika Śląska, Gliwice

STANOWISKO DO BADANIA DŁAWIKÓW DLA NAPĘDÓW

STATION FOR TESTING CHOKES USED IN DRIVE SYSTEMS

Streszczenie: W artykule przedstawiono ideę oraz wyniki badań symulacyjnych stanowiska przeznaczonego do badania dławików oraz filtrów pasywnych, stosowanych docelowo w napędach prądu przemiennego. W napędach tych występują jako stopień wejściowy prostowniki diodowe lub przekształtniki tranzystorowe (tzw. AFE – Active Front End). W celu zapewnienia poprawnej pracy takich układów wymagane są odpowiednie dławiki lub filtry pasywne. Artykuł przedstawia ideę budowy stanowiska pozwalającego na testowanie dławików/ filtrów pasywnych dla obu rozwiązań, w warunkach zbliżonych do docelowych (moce, harmoniczne prądu). W pierwszej części artykułu omówiono niniejsze rozwiązanie oraz wytyczne związane z jego potencjalną realizacją. Następnie przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych rozwiązania, wraz z możliwościami ograniczania wymaganej mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia oraz mocy znamionowych wybranych komponentów stanowiska.

Abstract: The paper presents an idea of station for testing chokes that are used in drive systems and selected simulation results of operation of 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 for the line it is necessary to use chokes or input filters that have to be properly designed. The paper presents the idea of station 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 station for testing chokes. After that the selected results of simulation and possibilities of power limitation the selected components of station are presented and described.

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

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

1. Wstęp

We współczesnych układach napędowych prądu przemiennego, w szczególności niskiego napięcia, wykorzystuje się, jako stopień wejściowy, prostowniki diodowe (głównie 6-pulsowe) lub gdy wymagany jest zwrot energii do sieci zasilającej – prostowniki tranzystorowe (tzw. active front-end converters). W obu rozwiązaniach niezbędne jest stosowanie po stronie sieci dławików lub filtrów wejściowych, co wynika z potrzeby ograniczania wpływu tych napędów na sieć (generacja harmonicznych w prądzie). Dążenie do ograniczenia niekorzystnego wpływu na sieć zasilającą wynika m.in. z norm dotyczących emisji harmonicznych prądu odbiorników do sieci publicznej, np. PN-EN 61000-3-2 czy PN-EN 61000-3-12 [1]. Przy projektowaniu takich filtrów niezbędne jest uwzględnienie ich warunków pracy np. mocy, czy widma harmonicznych prądu wynikających z warunków pracy napędu. Ma to znaczenie

zarówno w przypadku przekształtników diodowych, gdzie występują głównie harmoniczne prądu niższych rzędów o relatywnie wysokich wartościach [2], jak i przekształtnikach tranzystorowych, gdzie występują głównie harmoniczne związane z przełączeniami tranzystorów [3, 4]. W celu sprawdzenia poprawności działania filtru należy przetestować jego działanie w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, szczególnie pod kątem wpływu na nagrzewanie poszczególnych harmonicznych prądu oraz możliwości zastosowania nowych materiałów magnetycznych redukujących straty [5]. W tym celu wskazane jest wykorzystanie odpowiedniego stanowiska badawczego, będącego tematem artykułu.

Aby umożliwić testowanie filtrów wejściowych (dla obu rozwiązań przekształtników) proponowane stanowisko wykorzystuje szeregowe połączenie prostownika diodowego i przekształ-

łtnika tranzystorowego (modułu zwrotu) poprzez wspólny kondensator obwodu pośredniczącego DC. Układ taki pozwala na pobór mocy (przez prostownik diodowy), a następnie jej zwrot do sieci poprzez przekształtnik tranzystorowy. Pozwala to na testowanie filtrów przeznaczonych dla przekształtników, w znamionowych warunkach pracy, przy pokryciu jedynie strat mocy. Aby w układzie nie występowały prądy wyrównawcze (wynikające z różnic napięć chwilowych w przekształtnikach) wymagane jest stosowanie transformatora separacyjnego. Ideę działania stanowiska oraz role poszczególnych elementów opisano w dalszej części artykułu.

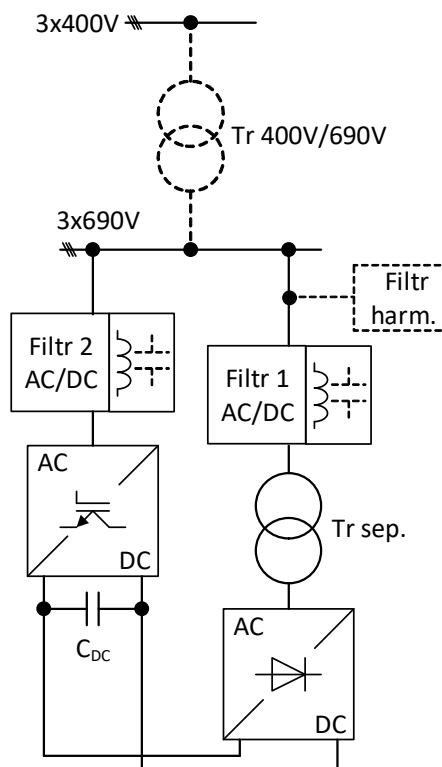
2. Opis stanowiska do badania dławików

Przy opracowywaniu projektu stanowiska do badania dławików uwzględnione zostały następujące wytyczne:

- moc znamionowa stanowiska 500 kVA,
- testowanie dławików dla prostowników diodowych i przekształtników tranzystorowych,
- możliwość testowania dławików 400 i 690 V przy zasilaniu z sieci 400 V,
- praca przekształtnika tranzystorowego ze zmienną (w ograniczonym zakresie) częstotliwością łączeń tranzystorów.

Schemat ideowy stanowiska z występującymi w nim elementami pokazano na rys. 1 (elementy opcjonalne przedstawiono linią przerywaną). Elementami podstawowymi są: przekształtniki AC/DC (diodowy) i DC/AC (tranzystorowy), połączone wspólną szyną DC. Aby umożliwić poprawną pracę stanowiska wymagana jest separacja za pomocą transformatora. Jego brak spowoduje powstanie prądów wyrównawczych, w chwilach, gdy potencjał dodatni lub ujemny kondensatora będzie po stronie przekształtnika tranzystorowego podłączony do innej fazy niż to wynika z pracy prostownika diodowego. Ze względu na potrzebę uzyskania odpowiedniego napięcia dla przekształtnika tranzystorowego (układ typu boost – podwyższający napięcie) wymagane jest zapewnienie w transformatorze separującym przekładni o wartości (1,2 - 1,3).

Transformator ten powinien być przygotowany na moc znamionową (z uwzględnieniem zapasu wynikającego z odkształceń prądu) oraz charakteryzować się relatywnie niskim napięciem zwarcia, tak aby w jak najmniejszym stopniu wpływać na warunki pracy badanych filtrów wejściowych.



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska badawczego

Ponieważ stanowisko ma umożliwiać pracę przy napięciu 400 V jak i 690 V, proponuje się zastosowanie transformatora umożliwiającego zmianę konfiguracji uzwojeń. Poszczególne uzwojenia powinny być przygotowane na pracę przy napięciu 400 V i prądzie wynikającym z warunków 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). Pozwoli to w pełni wykorzystać obwód magnetyczny transformatora. Na rys. 1 pokazano podłączenie transformatora do prostownika diodowego, niemniej możliwe jest również jego włączenie w obwód przekształtnika tranzystorowego, przy czym wtedy transformator musi pracować jako obniżający napięcie.

Na rys. 1 pokazano miejsca podłączenia filtrów/dławików badanych (zawsze po stronie zasilania). Należy zaznaczyć, że w przypadku badania tylko jednego z filtrów (po stronie prostownika diodowego *Filtr 1 AC/DC* lub tranzystorowego *Filtr 2 AC/DC*) wymagane jest zastosowanie odpowiednich filtrów dodatkowych. Przy badaniu *Filtru 1 AC/DC* wymagany jest filtr dodatkowy dla prostownika tranzystorowego, aby możliwa była jego współpraca z siecią. Przekształtnik tranzystorowy może w tym przypadku realizować funkcje dodatkowe, takie

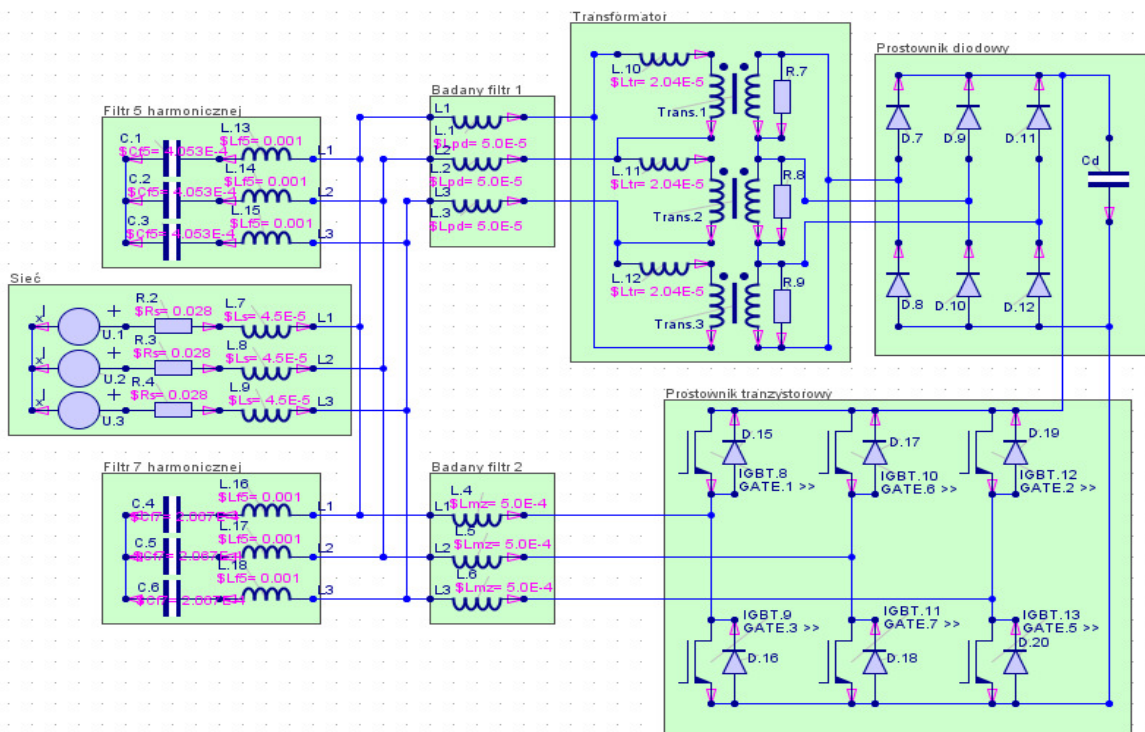
jak generacja mocy biernej czy też generacja harmonicznych w prądzie, co może zmniejszyć negatywny wpływ stanowiska na sieć (omówiono w punkcie dotyczącym badań symulacyjnych). Podczas testu *Filtru 2 AC/DC*, dodatkowy filtr po stronie prostownika diodowego zmniejsza negatywny wpływ prostownika na sieć. Dzięki dodatkowym funkcjom (generacja mocy biernej i harmonicznych) możliwe jest testowanie *Filtru 2 AC/DC* nie tylko dla pracy, jak dla układów napędowych, ale i również jak w przypadku pracy jako energetyczne filtry aktywne [6]. Założona możliwość generacji wybranych harmonicznych prądu umożliwia testowanie dławików w warunkach nietypowych.

Do opcjonalnych układów na stanowisku należy zaliczyć transformator 400/690 V oraz pasywne filtry harmonicznych. Transformator musi być stosowany, gdy zaistnieje potrzeba badania dławików o napięciu znamionowym 690 V. Moc transformatora w tym przypadku jest zależna od chwilowych różnic między wartościami prądów w prostowniku diodowym oraz tranzystorowym i stanowi część mocy, przy której odbywa się test filtrów. Opcjonalne filtry harmonicznych pozwalają na ograniczenie

prądu chwilowego, na który muszą być dobrane zabezpieczenia w punkcie przyłączenia stanowiska do sieci oraz na zmniejszenie mocy znamionowej transformatora 400/690 V. Ze względu na widmo harmonicznych prądu prostownika diodowego wystarczającym jest ograniczenie 5 i 7 harmonicznej. Analizę wpływu filtrów pasywnych przedstawiono w części dotyczącej badań symulacyjnych. Podobny efekt można uzyskać stosując filtrację harmonicznych prądu w przekształtniku tranzystorowym, co wymaga jednak pomiaru w przekształtniku prądu prostownika diodowego.

3. Model symulacyjny układu i algorytm sterowania prostownika tranzystorowego

Na rys. 2 pokazano model symulacyjny obwodów mocy stanowiska przygotowany w programie GeckoCIRCUITS. W modelu pokazano rozwiązanie dla testów dławików 400 V. Dla sieci przyjęto parametry odpowiadające mocy zwarciowej 5 MVA. Do sieci podłączone są dławiki dla prostownika diodowego (50 uH) oraz dławiki dla prostownika tranzystorowego (500 uH).



Rys. 2. Model symulacyjny obwodów głównych stanowiska do badania dławików

Prostownik diodowy podłączony jest do sieci poprzez transformator o napięciu zwarcia 2 % oraz przekładni 1,25 (co zapewnia odpowiednią wartość napięcia w obwodzie DC). Transformator ma uzwojenia połączone w trójkąt i moc 500 kVA. Na rys. 2 pokazano również opcjonalne filtry pasywne piątej i siódmej harmonicznej, pozwalające zredukować prądy w punkcie zasilania. Wyniki badań symulacyjnych pokazano przy braku filtrów, poza sytuacją gdy zostało to opisane.

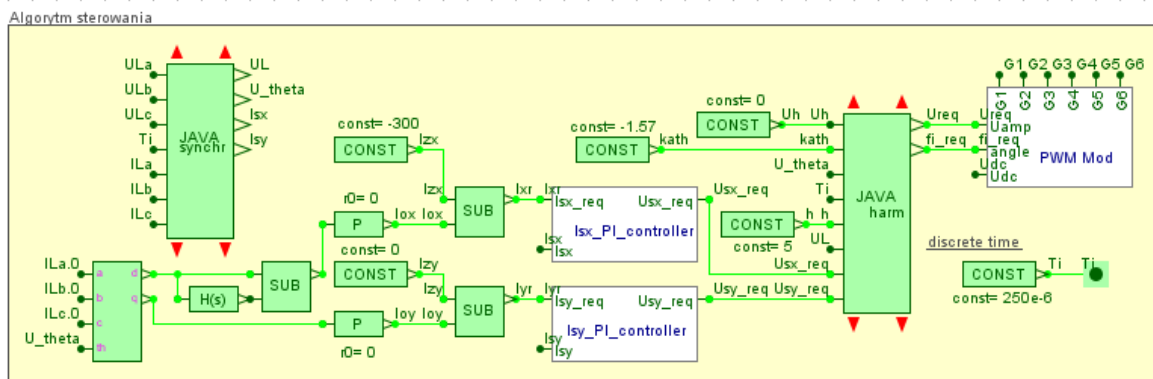
Zasadniczy algorytm sterowania prostownika tranzystorowego bazuje na wymuszeniu składowej d (odpowiedzialnej za moc czynną) i q (odpowiedzialnej za moc bierną) prądu wejściowego. Zmiany prądu czynnego powodują zmiany prądu wejściowego prostownika diodowego, natomiast napięcie obwodu pośredniczącego jest zapewniane przez prostownik diodowy i zależy od punktu pracy. Należy zaznaczyć, że prostownik tranzystorowy pracuje w trybie zwrotu energii do sieci (zadane ujemne wartości składowej d prądu, co powoduje pobór mocy po stronie prostownika diodowego). Schemat ideowy układu sterowania przekształtnika tranzystorowego pokazano na rys. 3. Algorytm sterowania zrealizowany jest w wersji dyskretnej, przy założeniu pracy z częstotliwością 2 kHz i podwójnym odświeżaniem rejestrów z zadanymi wypełnieniami PWM dla tranzystorów. Regulacja odbywa się w układzie wirującym zorientowanym względem napięcia sieci. Podstawowymi wielkościami zadanymi są prądy I_{zx} i I_{zy} odpowiadające odpowiednio za moc czynną i bierną przekształtnika. Na podstawie zadanych wartości prądów w regulatorach PI wyznaczane są zadane składowe napięć, które później transformowane są do układu stacjonarnego i realizowane za pomocą modulatora *PWM Mod*. Taka regulacja pozwala na

wymuszanie przepływu mocy czynnej w stnowisku oraz niezależną generację mocy bierniej (indukcyjnej lub pojemnościowej) po stronie prostownika tranzystorowego. Blok *JAVA_harm* umożliwia dodatkowo zadanie amplitudy i przesunięcia fazowego dla określonej harmonicznej napięcia, co pozwala na utworzenie określonej harmonicznej prądu w dławiku badanym po stronie prostownika tranzystorowego. Model symulacyjny przedstawia generację jednej harmonicznej, niemniej możliwe jest wytworzenie większej ilości harmonicznych.

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 elementem odejmujący *SUB*) pozwala na realizację funkcji 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.

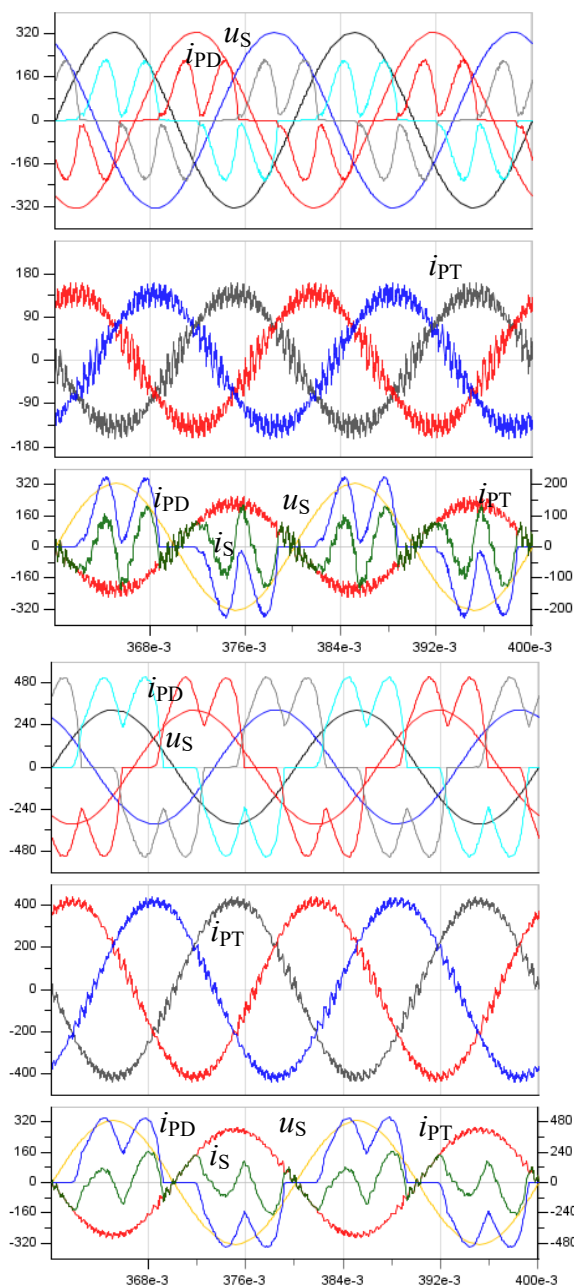
4. Wyniki badań symulacyjnych układu

Podstawowe przebiegi w układzie, przy wartości skutecznej prądu prostownika tranzystorowego 100 A i 300 A, pokazano na rys. 4. Współczynniki odkształceń prądu THD wynoszą odpowiednio 61 % i 34 % dla prostownika diodowego oraz 13 % i 4,6 % dla tranzystorowego. Na rysunku 4 pokazano (od góry): napięcia sieci i prądy prostownika diodowego, prądy prostownika tranzystorowego, napięcie u_s i prąd sieci i_s , prąd prostownika diodowego i_{pD} i tranzystorowego i_{pT} dla jednej fazy.

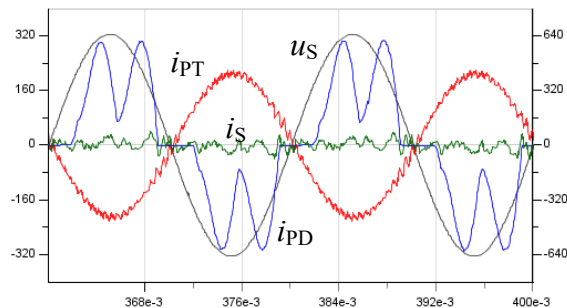


Rys. 3. Blok sterowania prostownika tranzystorowego

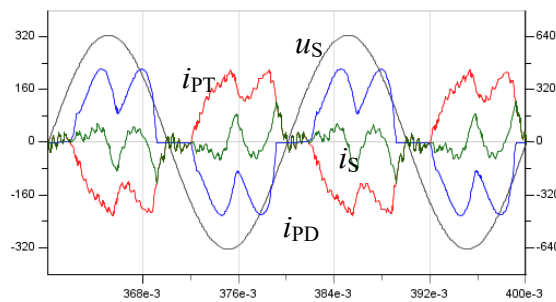
Jak można zauważyć prąd sieci jest różnicą między wartościami chwilowymi prądów obu prostowników, co musi być uwzględnione przy określaniu mocy przyłączeniowej oraz mocy transformatora 400/690 V. W celu ograniczenia tych prądów można zastosować dodatkowe filtry pasywne harmonicznych. Na rys. 5 pokazano pracę stanowiska (dla 300 A) z dodatkowymi filtrami pasywnymi 5 i 7 harmonicznej, co pozwoliło na redukcję wartości chwilowych prądu sieci (na rys. 5-6 występują te same wielkości co na rys. 4). Moc bierna, kompensującą pojemności filtrów, wygenerowano w prostowniku tranzystorowym.



Rys. 4. Praca stanowiska z prądem 100 i 300 A



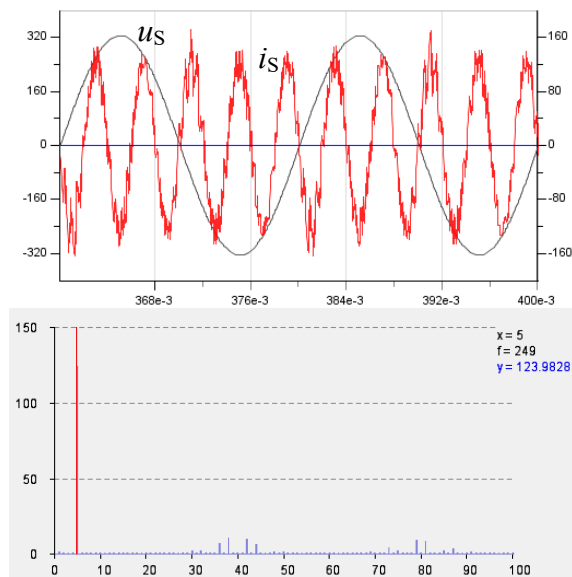
Rys. 5. Praca z filtrami pasywnymi (300 A)



Rys. 6. Aktywna filtracja harmonicznych w prostowniku tranzystorowym (300 A)

Jak można zauważyć zastosowanie filtrów pasywnych spowodowało zmniejszenie impedancji wejściowej dla prostownika diodowego i zwiększenie THD jego prądu wejściowego. Alternatywnym rozwiązaniem, pozwalającym na ograniczenie prądu sieci, jest funkcja aktywnej filtracji harmonicznych w sterowaniu prostownika tranzystorowego, co pokazano na rys. 6. Podobnie jak na rys. 4 i 5 przekształtnik tranzystorowy pracuje z prądem zadaniem o wartości skutecznej 300 A oraz dodatkowo generuje, wynikające z działania prostownika diodowego, harmoniczne i moc bierną. Ze względu na ograniczoną częstotliwość łącznych tranzystorów (ograniczoną dynamikę) generowany prąd przekształtnika tranzystorowego nie pozwala na pełną eliminację odkształceń prądu sieci.

Dodatkową funkcją realizowaną w prostowniku tranzystorowym jest generacja wybranych harmonicznych. Na rys. 7 pokazano przebiegi prądu oraz widmo harmonicznych przy generacji piątej harmonicznej. W tym przypadku regulatory prądu powinny mieć ograniczoną dynamikę, aby nie wpływały one na generację harmonicznych. Przedstawione widmo prądu obejmuje generowaną harmoniczną oraz prądkę wynikające z przełączeń tranzystorów. Generacja harmonicznych pozwala na badanie dławików i filtrów sieciowych w specyficznych warunkach.



Rys. 7. Generacja harmonicznych w przekształtniku tranzystorowym – przebiegi oraz widmo harmonicznych prądu

5 Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję, model oraz wyniki badań symulacyjnych stanowiska do badania dławików sieciowych stosowanych w prostownikach diodowych i tranzystorowych. W artykule omówiono rolę poszczególnych elementów, ideę zastosowania elementów dodatkowych oraz możliwości ograniczania wpływu stanowiska na sieć zasilającą. Wysoka sprawność stanowiska uzyskiwana jest poprzez przekazywanie mocy do sieci przez prostownik tranzystorowy. Dodatkowe funkcje prostownika tranzystorowego pozwalają na badania filtrów w specyficznych warunkach, a filtry pasywne lub funkcja aktywnej filtracji w prostowniku tranzystorowym pozwala zredukować moc w punkcie przyłączenia stanowiska do sieci. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają poprawne działanie stanowiska w analizowanych stanach oraz pokazują zastosowanie poszczególnych podzespołów i algorytmów sterujących.

6. Literatura

[1]. PN-EN 61000 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - część 3-2: Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A), część 3-12: Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych 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 harmonicznych gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej oraz wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 106, 2015.

[4]. Michalak J., Zygmantowski M., Biskup T., Kołodziej H.: Model przekształtnika trójpoziomowego NPC umożliwiającego zwrot energii do sieci zasilającej, *Logistyka 2014 nr 6, dysk optyczny (CD-ROM)* s. 7390-7399.

[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, Apr 2014.

[6]. Cichowlas M., Malinowski M., Sobczuk D.L., Kaźmierkowski M.P., Rodriguez 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, pp. 410-420, April 2005

Autorzy

dr inż. Tomasz Biskup, ENEL-PC sp. z o.o.
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice
e-mail: t.biskup@enel-pc.pl

dr inż. Henryk Kołodziej, ENEL-PC sp. z o.o.
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice
e-mail: henryk.kolodziej@enel-pc.pl

dr inż. Jarosław Michalak, Politechnika Śląska,
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
e-mail: jaroslaw.michalak@polsl.pl

Informacje dodatkowe

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.*



Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego

