

doi:10.15199/48.2021.02.18

System zasilania falowników wielopoziomowych wykorzystujący wielopulsowe prostowniki z dławikami sprzężonymi magnetycznie

Streszczenie. W artykule przedstawiono propozycję systemów zasilania falownika wielopoziomowego, która oparta została na wielopulsowym przekształtniku AC/DC. Prezentowany układ zastosowano do zasilania trójpoziomowego falownika NPC. Został on zbudowany na bazie mostków diodowych zasilanych z sieci trójfazowej i połączonych równolegle przez system sieciowych dławików sprzężonych magnetycznie. Dławiki służą do przesuwania w fazie kolejnych napięć sieci, w taki sposób, aby uzyskać wielofazowy system napięciowy, który umożliwi zasilanie mostków prostowniczych. Taka konstrukcja systemu zasilania pozwala ograniczać wyższe harmoniczne prądu, co prowadzi do znacznej redukcji współczynnika zniekształceń prądu i poprawy kompatybilności systemu.

Abstract. The paper presents a proposal of the multi-pulse AC/DC converter providing supply for multilevel inverters. The presented solution can be applied to three-level NPC inverters. The converter is constructed from diode bridge rectifiers connected parallel as well as the system of coupled reactors. The reactors are used to shift subsequent line voltages so that they create a multiphase voltage system supplying component rectifiers. This design permits to block higher current harmonics what leads to considerable reduction of the current distortion factor and to improving the compatibility of the system. (**The power supply system for multi-level inverters using multi-pulse rectifiers with coupled reactors**)

Słowa kluczowe: dławiki sprzężone magnetycznie, NPC, falowniki napięcia, analiza harmoniczych, prostowniki wielopulsowe.

Keywords: power converters, NPC inverters, energy consumption, harmonic analysis.

Wstęp

Zapewnienie zasilania dla systemów przekształcania energii elektrycznej, w których stosowane są wielopoziomowe falowniki napięcia prowadzi do poważnych problemów związanych z poziomem obciążenia i wymaganiami dotyczącymi jakości energii. Systemy wykorzystujące falowniki wielopoziomowe stosuje się najczęściej w warunkach zasilania odbiorników dużej mocy. Wzrost poziomu mocy zwykle powoduje liczne problemy z kompatybilnością elektromagnetyczną, ponieważ współczesne przekształtniki są budowane przy użyciu bardzo szybko przełączanych elementów półprzewodnikowych [1]. Ważną kwestią jest także metoda diagnozowania [2] i strategia sterowania [3] falownikami trójpoziomowymi. Falowniki wielopoziomowe są szeroko stosowane w aplikacjach związanych z odnawialnymi źródłami energii [4], układami napędowymi pojazdów [5] i większością maszyn elektrycznych dużej mocy [6].

Wielopoziomowy falownik napięcia wymaga zasilania wielosekcyjnym źródłem napięcia stałego. W ogólnym przypadku, przy wymaganej liczbie n poziomów napięcia wyjściowego, falownik musi być zasilany ze źródła napięcia stałego złożonego z $n - 1$ sekcji o jednakowych napięciach. I tak, falownik trójpoziomowy z diodami poziomującymi (z ang. Neutral Point Clamped – NPC), będący przedmiotem dalszych rozważań musi być zasilany ze źródła napięcia stałego U_D podzielonego na dwie sekcje, każda o napięciu $U_D/2$ tak, że trójfazowe napięcie wyjściowe falownika przyjmuje wartości, mierzone w stosunku do ujemnego bieguna źródła U_D , równe: 0, $U_D/2$ i U_D . W większości przypadków, napięcie U_D uzyskuje się z wyprostowania napięć trójfazowej linii elektroenergetycznej, przy czym bardzo często, prostowniki wykonywane są jeszcze w wersji niesterowanej za pomocą diod mocy (np. przemienniki częstotliwości stosowane w układach napędowych pracujących bez zwrotu energii do linii zasilającej lub niektóre przemienniki w układach bezprzerwowego zasilania). Tego typu prostowniki są dla linii zasilającej odbiornikami nieliniowymi tak, że prądy linii nie są sinusoidalne i zawierają wyższe harmoniczne.

Jako układ zasilania falowników napięcia, w tym także falowników wielopoziomowych, stosuje się bardzo często prostowniki. Prosta konstrukcja i wysoka wydajność są

niewątpliwie zaletą tych przekształtników, natomiast charakteryzują się one też negatywnym oddziaływaniem na system energoelektryczny, wprowadzając wyższe harmoniczne prądu. Te harmoniczne są wyjątkowo niepożądane, ponieważ są źródłem dodatkowych strat mocy w linii zasilającej, odkształcają napięcie zasilania i emitują sygnały elektromagnetyczne, które zakłócają działanie systemów informatycznych i sterujących. Międzynarodowe standardy, na przykład IEEE, określają bardzo surowe wymagania dotyczące obecności wyższych harmonicznych prądu pobieranych ze źródeł zasilania, a także dopuszczalne odkształcone napięcia. Normy opisują również dopuszczalne wartości współczynników THDI i THDU (ang. *Total Harmonic Distortion*), które są powszechnie stosowane w elektroenergetyce do oceny zniekształceń prądów i napięć. Na przykład, dopuszczalny współczynnik odkształceń napięcia dla odbiorników zasilanych z sieci niskiego napięcia wynosi 3% w przypadku obiektów specjalnych, takich jak szpitale lub lotniska i 5% w przypadku obiektów ogólnych, w tym zakładów przemysłowych. Zasadniczo dopuszczalny współczynnik odkształcenia prądu nie powinien przekraczać kilku procent (2% ÷ 10%). Warto również zauważyć, że wymogi dotyczące dopuszczalnych amplitud poszczególnych harmoniczych prądu są również znormalizowane. Współczynniki THD są zdefiniowane w następujący sposób:

$$(1) THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

gdzie: h jest rzędem harmoniczej, I_h jest wartością skuteczną harmoniczej prądu, I_1 jest wartością skuteczną harmoniczej prądu podstawowego, a I jest wartością skuteczną prądu pobranego ze źródła zasilania.

Podobnie, THD_U jest zdefiniowane jako:

$$(2) THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% = \frac{X_Z}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (h \cdot I_h)^2} \cdot 100\%$$

Warto nadmienić, że jeśli odwołujemy się do NORM wówczas współczynniki THD są definiowane w normach. Oblicza się je na podstawie wartości skutecznych pierwszych 40 harmonicznych – czyli sumujemy do 40 – tej właśnie, a nie do nieskończoności. Ponieważ $U_h = hX_z I_h$, to X_z jest reaktancją źródła zasilania, która jest określana dla częstotliwość 50 Hz na podstawie testu zwarcia. W przypadku, gdy znany jest prąd zwarcia I_z , reaktancję można obliczyć jako $X_z = U_1 / I_z$. W praktyce inżynierskiej problemem jest wyznaczenie wartości prądu zwarcia, którego właściwe nie znamy, a jesteśmy w stanie oszacować jego wartość, dlatego znamy jedynie tzw. spodziewany prąd zwarcia. Taka sytuacja wynika z faktu, że nie wykonujemy próby zwarcia rzeczywistej linii zasilającej, a jedynie wykonujemy próby zwarcia co najwyżej transformatorów, w tym energetycznych.

Wielopulsowy prostownik, jak już zostało wspomniane, jest źródłem wyższych harmonicznych prądu, których rząd h zależy od liczby tętnieniowej q prostownika:

$$(3) \quad h = kq \pm 1, k \in N$$

Jeżeli wielopulsowy prostownik współpracuje z filtrem indukcyjnym o dużej stałej czasowej, to tętnienia prądu wyjściowego są silnie ograniczone. Przy założeniu, że tętnienia prądu mają wartość zerową można napisać następującą zależność:

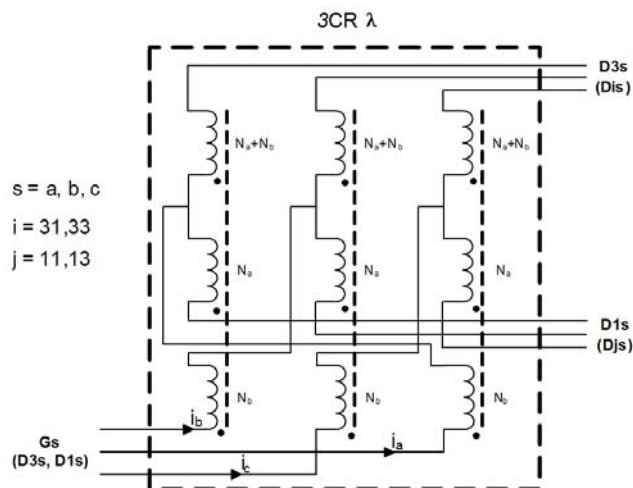
$$(4) \quad I_h = I_1 / h$$

Oczywistym wnioskiem wynikającym ze wzoru (3) jest to, że musimy stosować układy przekształtnikowe o dużych wartościach q (układy wielopulsowe), aby spełnić wymagania określone przez normy. W praktyce, do zasilania falowników często stosuje się układy 6-, 12- i 18-pulsowe. Kiedy równanie (4) jest spełnione, uzyskuje się następujące przybliżone wartości THDI reprezentujące zawartość wyższych harmonicznych prądu: 31% dla $q = 6$; 15% dla $q = 12$ i 9,6% dla $q = 18$. Z pewnością, zwiększenie reaktancji źródła zasilania przez zastosowanie dławików sprzężonych prowadzi do znacznego zmniejszenia THDI. W rozwiązaniach klasycznych wartość q można zwielokrotnić, na przykład przez szeregowe lub równoległe połączenie trójfazowych prostowników mostkowych i odpowiednie przesunięcie fazowe w transformatorach zasilających przetworniki. W pracy przedstawiono propozycję zasilania trójfazowego falownika za pomocą napięcia stałego uzyskanego ze złożonego przekształtnika AC/DC, w którym zastosowano wielopulsowe prostowniki diodowe i dławiki sprzężone [7-11].

Struktura dławika sprzężonego magnetycznie

Mostki prostownicze wchodzące w skład omawianego przekształtnika AC/DC są połączone do linii za pomocą jednostki oznaczonej jako 3CRλ. Na rysunku 1 przedstawiono konfigurację jednostki 3CRλ. Układ dławików sprzężonych magnetycznie zbudowany jest z wykorzystaniem trzech oddzielnych rdzeni magnetycznych o wybranej liczbie zwojów (N_a , N_b , $N_a + N_b$). To urządzenie wprowadza zadane przesunięcie fazowe między napięciami fazowymi linii wejściowej i wyjściowej. Kąt przesunięcia można regulować w szerokim zakresie. W przypadku, gdy odpowiednio dobrany jest współczynnik zwojów, na wyjściu urządzenia uzyskuje się dwa symetryczne trójfazowe układy napięciowe, przesunięte fazowo o $\pi/6$. Tak więc, jednostka składająca się z dławików sprzężonych magnetycznie dostarcza sześciu napięć zasilających przesuniętych wzajemnie o ustalony kąt. Możliwe jest połączenie ze sobą trzech lub nawet

większej liczby jednostek 3CRλ w celu zwiększenia liczby impulsów przekształtnika AC/DC. W celu uproszczenia analizy działania jednostki, specjalny schemat notacji zacisków 3CRλ został przedstawiony na schemacie (rys. 1).



Rys.1. Jednostka 3CRλ składająca się z 9 dławików sprzężonych magnetycznie [9].

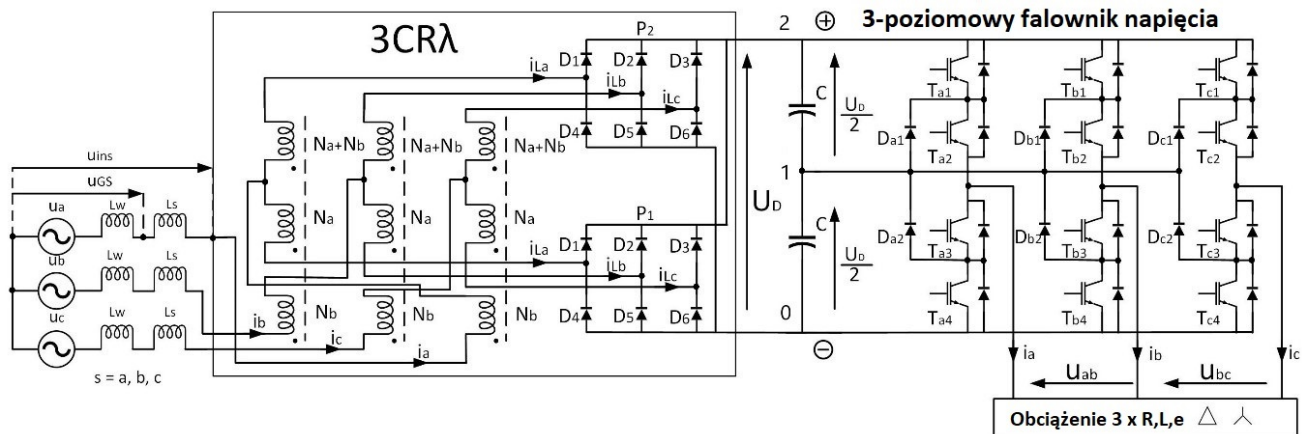
Unikalną jednostkę 3CRλ można podłączyć do dwóch standardowych trójfazowych mostków prostowniczych. Jeżeli wyjścia tych prostowników są połączone równoległe, można otrzymać 12-pulsowe napięcie wyjściowe [7,9,10]. Działanie układu, sposób wyznaczania przebiegów prądu i napięcia oraz projekt i wyniki symulacji wraz z badaniami eksperymentalnymi zostały przedstawione i omówione w [7,9,10].

Trójpoziomowy falownik z 12-pulsowym prostownikiem

Na rysunku 3 przedstawiono 12-pulsowy prostownik wykorzystany do zasilania trójpoziomowego falownika NPC. W obwodzie prostownika, na rysunku 2 - oznaczonym ramką, zastosowano dławiki sprzężone magnetycznie w wariacie 3CRλ. Prostownik składa się z dwóch mostków trójfazowych (P1, P2) połączonych równoległe i dostarcza napięcie 12-pulsowe do obwodu pośredniczącego trójpoziomowego falownika. Pojemność obwodu wynikająca z szeregowego połączenia dwóch pojemności C ($C/2$) powoduje, że układ działa jako źródło napięcia. Dwunastopulsowe napięcie prostownika jest połączone do obwodu pośredniego między biegunami 0 (-) i 2 (+).

Z pewnością można rozważyć inne i bardziej korzystne połączenie prostownika 12-pulsowego z obwodem pośredniczącym. Warte uwagi byłoby odłączenie wyjść mostków prostowniczych i podłączenie każdego z nich do jednej sekcji (pojemność C) napięcia pośredniczącego UD. Zaproponowane rozwiązanie sprawia, że potencjał bieguna 1 jest bardziej stabilny podczas pracy falownika. Stabilność potencjału powoduje, że podział napięcia UD jest dokładny, co gwarantuje prawidłowe działanie falownika trójpoziomowego.

Zgodnie z schematem systemu przedstawionym na rysunku 2, wewnętrzna indukcyjność fazowa sieci trójfazowej jest oznaczona jako L_w , zaś dodatkowa indukcyjność wprowadzona do układu przez L_s . Relacje co do wartości między tymi indukcyjnościami spełniają warunek: $L_s \gg L_w$. Przeprowadzono testy symulacyjne działania systemu dla różnych wartości L_s . Przyjęto również, że obciążenie obwodu pośredniczącego było stałe i równe mocy 2 kW. Podstawowe parametry modelu symulacyjnego prostownika zamieszczono w tabeli 1.

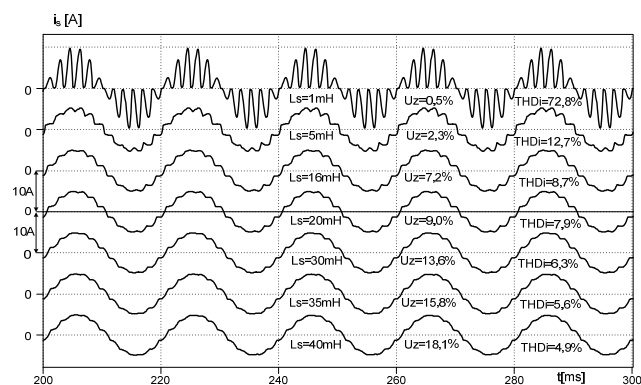


Rys.2. Schemat prostownika 12-pulsowego zasilającego trójpoziomowy falownik.

Tabela 1. Parametry symulacyjne modelu dla mocy 2 kVA i prostownika 12—plusowego

| | |
|---|---------------------------|
| Znamionowe napięcie międzyprzewodowe | $U_s = 400V$ |
| Liczba zwojów uzwojenia N_a | 204 |
| Liczba zwojów uzwojenia N_b | 75 |
| Indukcyjność dławika sieciowego | $L_s = 22 \text{ mH}$ |
| Pojemność kondensatorów obwodu pośredniczącego | $C = 10 \text{ mF}$ |
| Rezystancja obciążenia | $R = 102 \Omega$ |
| Gęstość prądu uzwojeń dławików sprzężonych | $J = 2,5A/mm^2$ |
| Powierzchnia przekroju komuny rdzenia 3CR1 | $S_{Fe} = 8 \text{ cm}^2$ |
| Kąt przesunięcia wektorów prądów wejściowych dławików sprzężonych | $2\alpha = 30^\circ$ |
| Indukcyjność wewnętrzna linii zasilającej | $L_w = 0,1mH$ |
| Współczynnik wypełnienia rdzenia żelazem | $k_{Fe} = 0,9$ |

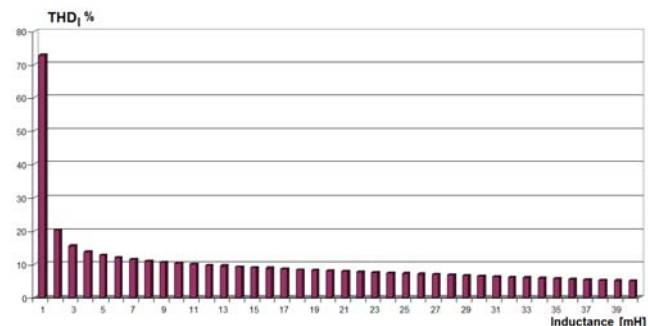
Na rysunku 3 pokazano wyniki testów symulacyjnych w postaci przebiegów prądu fazowego. Na następnym rysunku (rys. 4) pokazano wartości THDI jako funkcję napięcia zwarciego i indukcyjności cewek L_s . Testy symulacyjne przeprowadzono przy założeniu, że sieć jest symetryczna, a napięcie fazowe ma kształt fali sinusoidalnej. Dla małej wartości L_s (1mH, $u_z\% = 0,5\%$) przebieg prądu był nieciągły, a całkowity poziom zniekształceń - reprezentowany przez współczynnik zawartości harmonicznyc THDI, osiągnął 72,7%. Wartość współczynnika THDI została określona dla pasma ograniczonego do 40-tej harmonicznyc.



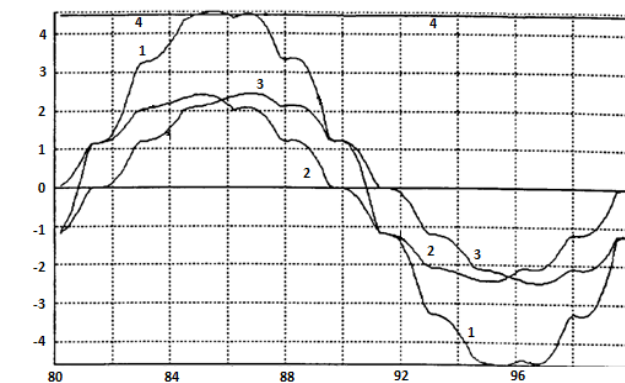
Rys.3. Przebiegi prądu fazowego zależne od L_s .

Jeśli indukcyjność jest większa niż 10 mH, współczynnik THDI osiąga wartość poniżej 10%. Jednak wartość ta jest stosunkowo duża, więc dławiki sprzężone magnetycznie wprowadzają do układu znaczną moc bierną. Zwiększając indukcyjność można poprawić kształt przebiegów prądu zasilającego. Jednocześnie wyższa indukcyjność L_s prowadzi do wzrostu kąta komutacji. Dla indukcyjności np.

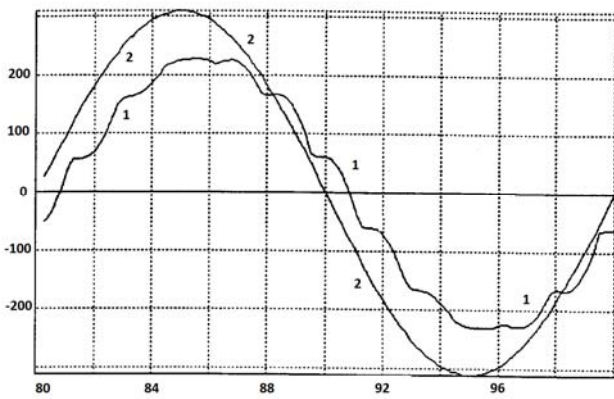
$L_s = 20 \text{ mH}$ i przy założeniu obciążenia 2 kW, wartość THDI pozostaje poniżej 8%.



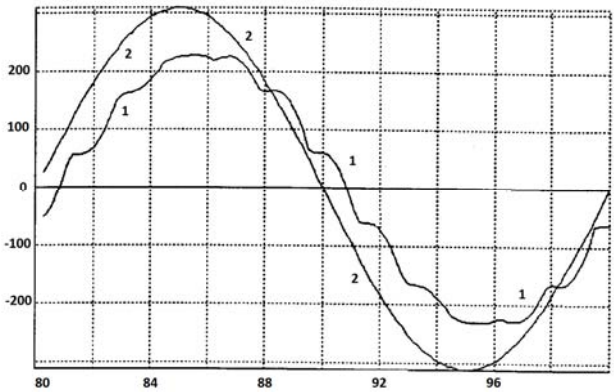
Rys.4. Współczynnik THDI jako funkcja indukcyjności cewek L_s .



Rys.5. Przebiegi prądu sieciowego $i_{R1/s}$, prądu obwodu pośredniego $i_{w4/}$ i prądów uzwojenia $i_{1R2/s}$, 3CR1 dla obciążenia 2 kW. Skala dla prądu – 1A.



Rys.6. Napięcie $u_{p/2}$ i prąd linii zasilającej $i_{R/1}$ przy obciążeniu nominalnym 2 kW.



Rys.7. Oscylogramy napięcia u_{R-1} i prądu w linii zasilającej i_{R-2} oraz napięcia $u_{K1RK2R-3}$ na głównych uzwojeniach 3CR λ przy znamionowym obciążeniu przekształtnika.

Testy eksperymentalne zostały wykonane przy założeniu, że trójpoziomowy falownik wprowadził do systemu obciążenie równe 2 kW mocy. Założono, że stan falownika został opisany przez wektor napięcia, który oznaczało w taki sposób, że faza A została podłączona do punktu 2 (U_D), faza B do punktu 1 ($U_D/2$) i faza C do punktu 0. Kolejne rysunki 5-7 ilustrują wyniki tych testów. Obejmują one następujące wielkości: napięcie wejściowe jednostki

3CR λ , prąd źródła zasilania i prądy uzwojenia w jednostce 3CR λ , prądy źródła zasilania i prądu zmierzone na zaciskach K1 i K2 (rys. 7).

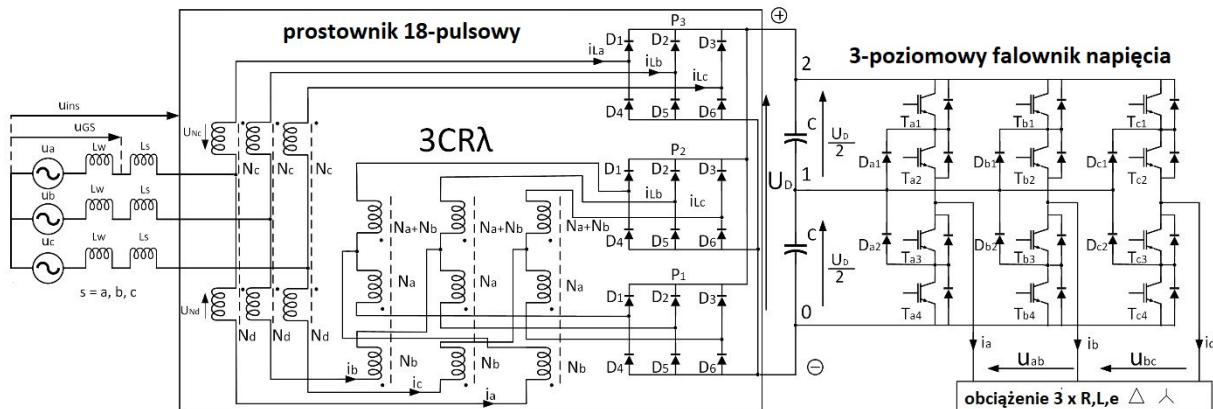
Przedstawione wyniki symulacji i testów eksperymentalnych są w wystarczającym stopniu zgodne z oczekiwaniami. Jednak początkowe testy przeprowadzono przy bardzo niskim poziomie obciążenia. Dlatego kontynuowano prace badawcze nad opracowaniem dławików sprzężonych magnetycznie o większej mocy.

Trójpoziomowy falownik z 18-pulsowym prostownikiem

Dobre właściwości systemu zasilania falownika można też zapewnić przez dołączenie go do połączonych ze sobą trzech trójfazowych prostowników mostkowych, które dostarczą odpowiednio stabilizowane napięcie do obwodu pośredniczącego. Wprowadzenie dławików sprzężonych magnetycznie poprawi kompatybilność systemu. W tym rozdziale opisano możliwość podłączenia prostownika 18-pulsowego do falownika trójpoziomowego.

Zastosowanie jednostki 3CR λ do równoległego połączenia trzech trójfazowych diodowych mostków prostowniczych przedstawiono na rysunku 8. Rysunek ten pokazuje schemat 18-pulsowego prostownika diodowego z równoległą pracą trzech trójfazowych prostowników mostkowych, pracujących przy obciążeniu pojemnościowo-indukcyjnym, które symulują obwód pośredniczący trójpoziomowego falownika. Trójfazową sieć zasilającą reprezentują napięcia źródłowe E_k ($k = a, b, c$). Ponadto cewki o indukcyjności L są instalowane szeregowo ze źródłem zasilania. Równoległa praca trzech trójfazowych prostowników mostkowych, których napięcia są przesunięte fazowo o 20° , odbywa się za pomocą dwóch trójfazowych układów dławików sprzężonych: dzielnika prądu WPP i układu 3CR λ , które razem realizują przesunięcie fazowe o wartości 40° dla dwóch zestawów napięć trójfazowych.

Podstawowym założeniem przyjętej koncepcji układu przekształtnika jest utworzenie trzech wektorów przestrzennych napięć trójfazowych przesuniętych wzajemnie o 20° , z przebiegiem sinusoidalnym na biegu jałowym i przebiegiem 18-pulsowym przy obciążeniu nominalnym.



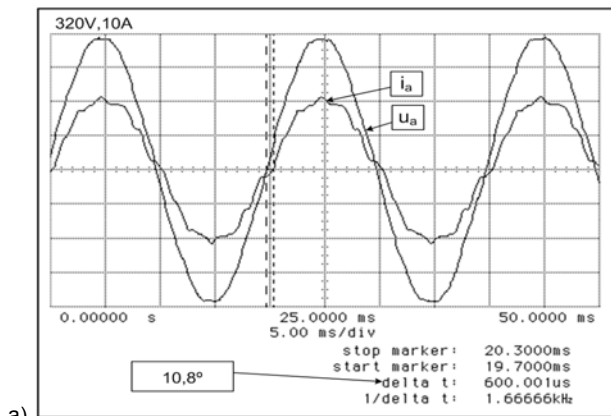
Rys.8. Schemat prostownika 18-pulsowego zasilającego trójpoziomowy falownik.

Systemy dławików sprzężonych magnetycznie oznaczone przez WPP i 3CR λ umożliwiają uzyskanie wymaganego podziału prądu pobieranego ze źródła zasilania i dostarczanego do poszczególnych mostków

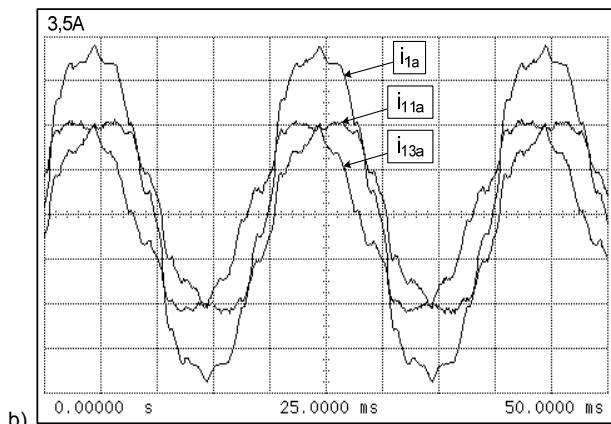
prostowniczych. Trzy układy prądów trójfazowych zasilających poszczególne prostowniki charakteryzują się tą samą wartością skuteczną i w przybliżeniu tymi samymi przebiegami sinusoidalnymi prądów fazowych. Podobnie

jak w przypadku napięć, prądy w układzie 1 (i_{1n}) poprzedzone są przesuniętymi o 20° prądami w układzie 2 (i_{2n}), podczas gdy prądy w systemie 3 (i_{13n}) są opóźnione fazowo o 20° w stosunku do prądów w systemie 2.

Efektom działania trójfazowych dławików sprzężonych magnetycznie jest przekształcenie trójfazowego napięcia źródła zasilania na napięcie dziewięciofazowe. Wybrana liczba zwojów uzwojenia i ich połączenia wynikają z wymaganego przesunięcia fazowego napięcia (system 3CR Δ) i wymaganego wstępnego podziału prądu (system WPP). Przyjmując tożsamość przepływów w systemie WPP, otrzymujemy $N_D / N_C = N_B / N_A$. Całkowita moc znamionowa układu dławików sprzężonych wynosi 16,51% P_d . Współczynnik THD jest mniejszy niż 5% (testy laboratoryjne). Wybrane wyniki testów symulacyjnych pokazano na rysunku 9. Przebiegi napięcia i prądu przedstawione na tych rysunkach są zgodne z założeniami i stosowaną teorią.



a)



b)

Rys.9. Oscylogramy: a) napięcia sieci zasilającej u_a i prądu i_a ze zmierzonym przesunięciem fazowym, b) prądy uzwojenia jednostki 3CR Δ : i_{1a} , i_{11a} , i_{13a} przy nominalnym obciążeniu przekształtnika.

Podsumowanie

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w Laboratorium Energoelektroniki Akademii Morskiej w Gdyni. Wyniki testów eksperymentalnych okazały się w wystarczającym stopniu zgodne z testami symulacyjnymi i zbliżają się do wyników uzyskanych podczas rozważań teoretycznych. Prostowniki 12- i 18-pulsowe działają dokładnie i zgodnie z oczekiwanymi wynikami.

Zastosowane rozwiązanie oparte na dławikach sprzężonych magnetycznie poprawia kompatybilność wielopulsowych przekształtników AC/DC. Jednocześnie takie rozwiązanie ułatwia i ogranicza środki wymagane do

uzyskania napięcia stałego UD zasilającego falownik trójpoziomowy bowiem pozwala ograniczyć tętnienia napięcia przy znacznym zmniejszeniu pojemności obwodu pośredniczącego. Istota działania oparta na dławikach sprzężonych magnetycznie polega na blokowaniu (eliminowaniu) wyższych harmonicznych prądu rzędu $6k \pm 1$ w napięciu wyjściowym. Prostownik 12-pulsowy, a także 18-pulsowy, może być stosowany jako bardzo przydatne źródło zasilania obwodu pośredniczącego w falownikach trójpoziomowych.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 006/RID/2018/19 kwota finansowania 11 870 000 zł.

Autorzy: dr inż. Adam Muc, E-mail: a.muc@we.umg.edu.pl; dr hab. inż. Jan Iwaszkiewicz, E-mail: j.iwaszkiewicz@we.umg.edu.pl; dr hab. inż. Piotr Mysiak, E-mail: p.mysiak@we.umg.edu.pl; dr inż. Leszek Piechowski, E-mail: l.piechowski@we.umg.edu.pl; Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Morskiej, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

LITERATURA

- [1] J. Iwaszkiewicz, P. Bogusławski, A. Krahel, E. Łowicz, "Three-phase voltage outages compensator with cascaded multilevel converter", Archives of Electrical Engineering, 61, pp. 325–336, 2012
- [2] X.Wu, T.-F. Chen, S. Cheng, T. Yu, C. Xiang, K. Li, "A Noninvasive and Robust Diagnostic Method for Open-Circuit Faults of Three-Level Inverters", IEEE Access, 7, pp. 2006–2016, 2019
- [3] S.K. Giri, S. Banerjee, C. Chakraborty, "An Improved Modulation Strategy for Fast Capacitor Voltage Balancing of Three-Level NPC Inverters", IEEE Trans. Ind. Electron, 66, pp.7498–7509, 2019
- [4] E. Serban, C. Pondiche, H. Serban, C. Lascu, O.Cornea, "DC Voltage Control Architecture in Renewable Energy Based Three-Level Converters. In 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)", 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA, IEEE, 2019 - 2019; pp 1949–1956, 3/17/2019 - 3/21/2019
- [5] A. Łebkowski, "Studies of Energy Consumption by a City Bus Powered by a Hybrid Energy Storage System in Variable Road Conditions", Energies, 12, 951, 2019
- [6] Q. Zhang, X. Xing, K. Sun, "Space Vector Modulation Method for Simultaneous Common Mode Voltage and Circulating Current Reduction in Parallel Three-Level Inverters", IEEE Trans. Power Electron, 34, pp. 3053–3066, 2019
- [7] J. Iwaszkiewicz, P. Mysiak, "Supply system for three-level inverters using multi-pulse rectifiers with coupled reactors", Energies, nr 12, pp. 1-23, 2019
- [8] P. Jankowski, "Modelling of Magneto-Elastic Phenomena in Inductive Dynamic Drive", Journal of Electrical Engineering and Technology 2017, 12, 1073–1081, doi:10.5370/JEET.2017.12.3.1073
- [9] P. Mysiak, "Multipulse diode converters - Frequency domain analysis of operation of the applied coupled three-phase reactor. In Compatibility and power electronics", 2009, CPE '09; 20-22 May 2009, Badajoz, Spain; 6th international conference-workshop. 2009 Compatability and Power Electronics (CPE), Badajoz, Spain, 5/20/2009 - 5/22/2009; IEEE: Piscataway, NJ, 2009; pp 53–60, ISBN 978-1-4244-2855-7
- [10] P. Mysiak, "A 24-pulse diode rectifier with coupled three-phase reactor", Journal of the Chinese Institute of Engineers 2007, 30, 1197–1212, doi:10.1080/02533839.2007.9671347
- [11] M. Depenbrock, C. Niermann, "A new 18-pulse rectifier circuit with line-side interphase transformer and nearly sinusoidal line currents", Eds. IAS 1990