

doi:10.15199/48.2022.02.29

Filtracja aktywna w zastosowaniu do prostowników wielopulsowych z dławikami sprzężonymi magnetycznie

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania symulacyjne i laboratoryjne wielopulsowych prostowników z dławikami sprzężonymi magnetycznie, które zostały podłączone do sieci elektroenergetycznej i współpracują z równoległym filtrem aktywnym (APF). W pracy porównano dwa typy przekształtników wielopulsowych AC/DC, którymi są prostowniki dwunasto- i dwudziestoczerwopulsowe. Przedstawiono zarówno zasady działania, jak i wyniki uzyskanych badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych. Omawiane układy pozwalają na redukcję niepożądanych wyższych harmonicznych w prądzie sieci zasilającej. Do budowy prostowników wielopulsowych zastosowano zespoły dławików sprzężonych magnetycznie skonfigurowanych w układzie TDSA.

Abstract. The article describes the laboratory and simulation tests of 12- and 24-pulse power grid converter systems with DC voltage output that work together with shunt active power filter (APF). It presents both the operations' principles and the results of these tests. The systems under discussion make it possible to reduce the number of unwanted higher harmonics in the power network current. Moreover, they can also help eliminate the 23- and 25-order harmonics especially in the conditions of local power network supply. In order to obtain the multi-pulse system's operation, a set of coupled three-phase power network reactors (TDSA) has been used. (Active filtration in application to multi-pulse rectifiers with magnetically coupled reactors).

Słowa kluczowe: energetyczne filtry aktywne, sieciowe trójfazowe dławiki sprzężone, wielopulsowy przekształtnik sieciowy, kondycjonowanie energii.

Keywords: active energy filters, network three-phase coupled chokes, multi-pulse network converter, energy conditioning.

Wstęp

Zasilanie prostownika z sieci generuje niepożądane, wyższe harmoniczne prądu płynącego w sieci. Wraz ze wzrostem liczby pulsów przekształtnika maleje współczynnik THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) tego prądu. W celu wyeliminowania wyższych harmonicznych prądu płynącego w sieci, można zastosować filtry aktywne APF (ang. *Active Power Filter*). Moc wytworzona przez APF musi być proporcjonalna do mocy zniekształceń. Zwiększając liczbę pulsów przekształtnika, np. za pomocą zestawu odpowiednio dobranych dławików sieciowych sprzężonych magnetycznie, uzyskuje się zmniejszenie mocy odkształceń. Rozwiązanie to jednak nie pozwala na całkowite wyeliminowanie odkształceń. Zaletą jego jest natomiast to, że w konsekwencji można zastosować APF o mniejszej mocy. Aktualność problematyki jakości energii elektrycznej jest celem prowadzenia wielu badań w tematyce filtracji aktywnej, których wyniki są przedstawione w licznych publikacjach [1-4].

W publikacjach [5,6] zostały przedstawione propozycje zastosowania wyżej wymienionych prostowników jako układów zasilających falowniki wielopoziomowe. W takich aplikacjach ujawniają się problemy z negatywnym oddziaływaniem mostków prostowniczych na system elektroenergetyczny. Sytuacja ta wymusza dodatkowe mechanizmy poprawy kształtu prądów płynących w sieci zasilającej. Celowość stosowania prostowników wielofazowych wydaje się zasadna ze względu na ich właściwości, które szerzej omówiono w dalszej części pracy. Natomiast w publikacji [7] została przedstawiona koncepcja zastosowania szeregowego filtra aktywnego współpracującego z prostownikiem osiemnastopulsowym.

Opólny układ prostownika wielopulsowego z filtrem aktywnym

Opisane w pracy układy przekształtników AC/DC z filtrem aktywnym nie posiadają typowej dla prostowników diodowych wady, która polega na wprowadzaniu wyższych harmonicznych prądu do linii zasilającej [8]. W rozważanej konstrukcji prostowników niesterowanych, zastosowano dławiki magnetycznie sprzężone. Zostały one zainstalowane między linią zasilającą a diodowymi

mostkami prostowniczymi. Sprzężone magnetycznie dławiki z odpowiednio dobranymi uzwojeniami umożliwiają zamianę trójfazowego napięcia linii zasilającej na układ o większej liczbie faz, bez użycia transformatorów. Jednocześnie, moc trójfazowych dławików sprzężonych jest kilkakrotnie mniejsza od klasycznych transformatorów przekształtnikowych. W tym miejscu należy również wskazać na kolejną cechę zastosowanego układu dławików, a mianowicie umożliwiają one ograniczanie harmonicznych napięcia rzędu $6k \pm 1$ (gdzie: k to dowolna liczba naturalna), na wyjściu trójfazowego układu zasilania, a tym samym ograniczenie wyższych harmonicznych prądów pobieranych z niego.

Działanie prostownika diodowego z trójfazowymi dławikami sprzężonymi, wyznaczenie przebiegów napięć i prądów, projektowanie oraz wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych zostały omówione w pracach [8-13]. Napięciowy charakter odbiornika oraz zastosowane dławiki TDSA (rys. 1) powodują, że kąt przewodzenia diod w prostownikach mostkowych wynosi π (w przypadku odbiornika o charakterze źródła prądowego kąt przewodzenia jest równy $2\pi/3$). Dławiki zbudowane są z trzech oddzielnych rdzeni magnetycznych z odpowiednio dobraną liczbą zwojów (N_a , N_b , N_a+N_b). Dzięki odpowiednio dobranej przekładni uzwojeń dławików, otrzymuje się na ich wyjściu dwa trójfazowe symetryczne układy napięciowe przesunięte wzajemnie w fazie o kąt $\pi/6$.

Przy założeniu, że kąt przewodzenia diod w przekształtniku jest równy π , napięcie na wyjściu dwóch mostków diodowych ma przebieg 12-schodkowy przy znamionowym prądzie obciążenia lub zbliżony do sinusoidy przy pracy jałowej.

Dławiki sprzężone magnetycznie odgrywają w tym systemie podobną rolę jak transformatory przekształtnikowe. Jednak w stosunku do transformatorów przekształtnikowych charakteryzują się kilkakrotnie mniejszą mocą, ale za to bardziej złożonym układem uzwojeń wtórnych. Aby poprawić jeszcze bardziej współczynnik mocy i współczynnik THD, zastosowano filtr aktywny małej mocy, który został oparty na koncepcji trójfazowego falownika napięcia. Zawartość wyższych harmonicznych, których źródłem są trójfazowe mostki

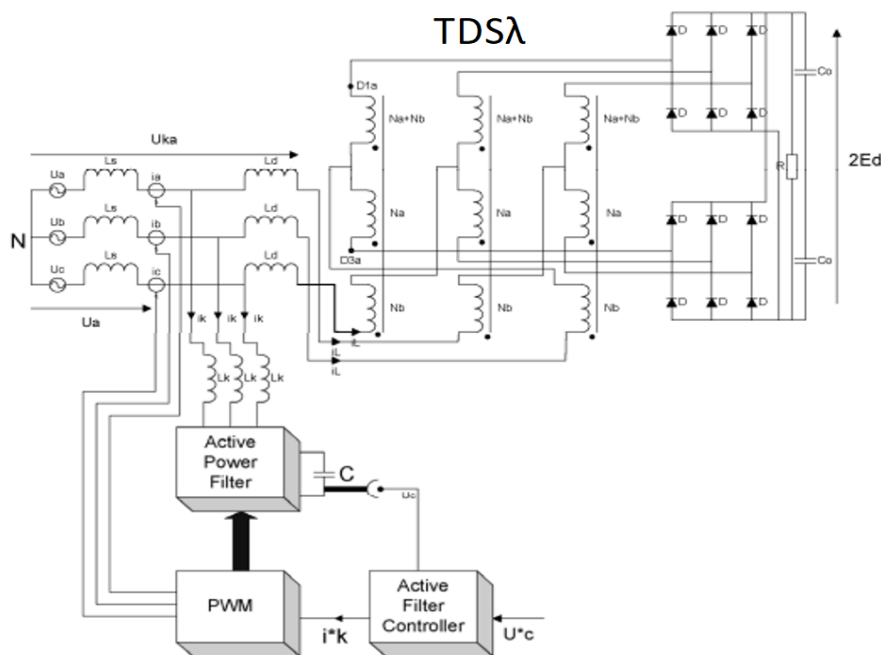
prostownicze, oraz absorpcja mocy biernej opisywanych układów są w znacznym stopniu ograniczone zarówno przez układ TDS λ , jak i równoległy filtr aktywny. Składa się on z dwóch odrębnych obwodów, tj. modulatora PWM i sterownika filtra aktywnego. Aby dokładnie odwzorować prądy kompensacyjne, modulator PWM powinien mieć dużą częstotliwość przełączania, która została oznaczona przez f_{PWM} . Zwykle $f_{PWM} > 10f_{hmax}$, gdzie f_{hmax} reprezentuje częstotliwość najwyższej harmonicznej prądu obciążenia, która ma być skompensowana.

Do implementacji filtra aktywnego można użyć zarówno falownika napięcia (VSI) [14], jak i falownika prądu (CSI). Wszystkie wyniki eksperymentalne przedstawione w tej pracy uzyskano z prototypu układu zrealizowanego z wykorzystaniem falownika VSI [18,11].

Na rysunku 1 przedstawiono podstawową koncepcję przekształtnika 12-pulsowego, w którym zastosowanie trójfazowych dławików sprzężonych magnetycznie z równoległym filtrem aktywnym pozwala na generację dwóch przesuniętych fazowo układów napięć trójfazowych, które stanowią napięcia wejściowe dla dwóch diodowych prostowników mostkowych. Omawiane w literaturze przypadki dotyczą głównie 12-pulsowych przekształtników AC/DC, które nie zawierają filtrów aktywnych. Ponadto, w literaturze nie została szczegółowo opisana analiza działania takiego systemu ani zastosowanych w nim algorytmów. Omówione wcześniej przykłady [8,11]

obejmowały analizę, która stanowiła podstawę do zaprojektowania układu 12-pulsowego i pozwoliła na analizę wpływu parametrów linii zasilającej, w tym jej impedancji, na pracę systemu. Opracowano także fragment ogólnej teorii układów z dławikami sprzężonymi, co pozwoliło na syntezę układów o zwiększonej liczbie faz napięcia zasilającego.

Metody badań opisywanego systemu z filtrem aktywnym obejmowały analizę teoretyczną, testy symulacyjne oraz badania rzeczywistego przekształtnika zawierającego dwa 6-pulsowe układy mostków diodowych, które zasilane są z trójfazowej sieci elektroenergetycznej poprzez system dławików sprzężonych magnetycznie. Zgodnie z przewidywaniami, prądy pobierane z linii zasilającej miały postać nieodkształconej sinusoidy, która jest nietypowa dla klasycznych prostowników 12-pulsowych, realizowanych z wykorzystaniem przekształtników trójfazowych. Wyniki badań mogą być wykorzystane nie tylko do weryfikacji opracowanych metod projektowania rozważanej klasy przekształtników, ale także pozwalają na badanie możliwości zastosowania rozważanego typu przekształtnika w układach napędowych prądu stałego i przemiennego, jako pierwszy stopień w przemienniku częstotliwości. Ze względu na wysoki poziom niezawodności, którą te układy są w stanie zapewnić, mogą one być stosowane w aplikacjach morskich.



Rys.1. Schemat ideowy 12-pulsowego prostownika diodowego z układem dławików sprzężonych TDS λ i równoległym filtrem aktywnym

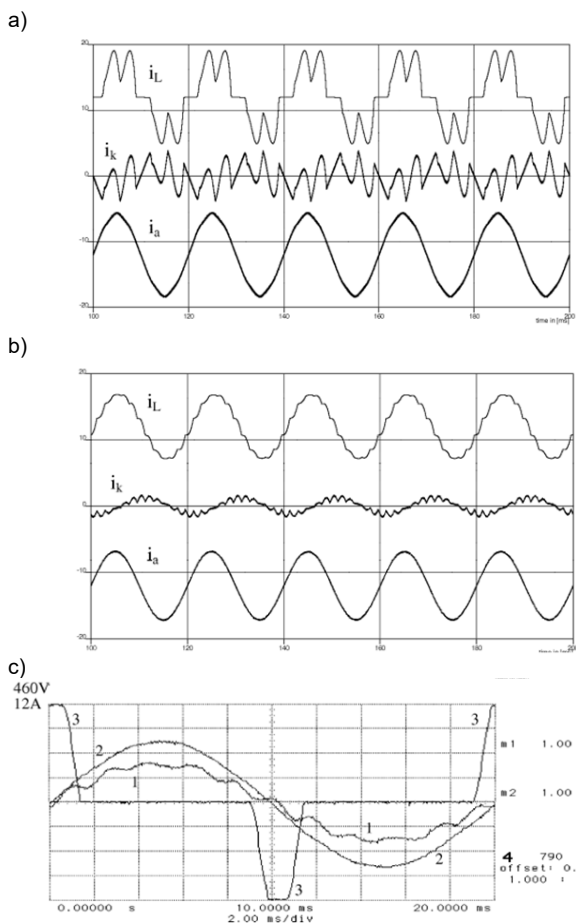
Przeprowadzone prace miały na celu opracowanie metody projektowania przekształtników energoelektronicznych, które zamieniałyby napięcie przemienną, o kształcie zbliżonym do krzywej sinusoidalnej, na napięcie jednokierunkowe i byłyby wyposażone w układ trójfazowych dławików sprzężonych magnetycznie. Podjęte działania obejmowały badania symulacyjne i testy laboratoryjne, dla których zaprojektowano i wykonano modele laboratoryjne 12-pulsowego i 24-pulsowego układu przekształtnika o mocy 2 kVA z równoległym filtrem aktywnym. Szczegółowa analiza problemu umożliwiła opracowanie metody projektowania specyficznych przekształtników energoelektronicznych AC/DC.

Przedstawiony na rysunku 1, 12-pulsowy prostownik diodowy zasilany jest z sieci trójfazowej napięciem fazowym U_n ($n = a, b, c$). Obwód wejściowy przekształtnika zawiera liniowe dławiki sieciowe L_s (reprezentuje sieć zasilającą), L_d , równoległy filtr aktywny i trójfazowy zespół dławików sprzężony magnetycznie TDS λ (rys. 1). Zaciski wejściowe dławika TDS λ są połączone z zaciskami sieci zasilającej poprzez dławiki liniowe L_s , L_d . Zaciski wyjściowe zespołu dławików TDS λ są z kolei połączone z dwoma trójfazowymi układami mostków diodowych. Zaciski prądu stałego wszystkich układów mostkowych są połączone równolegle z kondensatorem filtrującym C. Zadaniem zespołu dławików sprzężonych magnetycznie jest generowanie trzech napięć

przebiegów U_{Kn} , których przebiegi na biegu jałowym przyjmują kształt sinusoidalny. Napięcia U_{Kn} mierzone względem punktu gwiazdowego N obwodu wejściowego można zinterpretować jako wielkości powstałe w wyniku cyklicznych przełączeń napięcia stałego $2E_d$ przez łączniki dwóch mostków. Warunkiem niezbędnym do uzyskania 12-schodkowych przebiegów napięć U_{Kn} jest konieczność przewodzenia wszystkich diod przez kąt π .

Symetria 12-schodkowych napięć U_{Kn} wynika bezpośrednio z kąta przesunięcia fazowego $2\pi/12$ między stanami przewodzenia poszczególnych diod w dwóch mostkach. Zaciski wejściowe D_{mn} ($m = 1, 3$) każdego z dwóch trójfazowych układów mostkowych udostępnia symetryczne napięcia trójfazowe sześciopulsowe. Te dwa układy napięcia trójfazowego są przesunięte o $2\pi/12$, tworząc w ten sposób, za pośrednictwem układów TDS λ , jeden układ sześciofazowy. Można zatem założyć, że ze względu na TDS λ trójfazowe napięcie sieci zostało przekształcone

w napięcie sześciofazowe. Ponadto dwa układy prądów trójfazowych i_{mn} sumują się w dławikach TDS λ i zamieniają na jeden trójfazowy układ prądów pobieranych z linii zasilającej. Przebiegi tych prądów są bardzo zbliżone do krzywej sinusoidalnej. Dławiki sieciowe L_d i równoległy filtr aktywny redukują dodatkowo, do wymaganego poziomu, harmoniczne prądów wyższych rzędów.



Rys.2. Wyniki badań: a) symulacyjnych przekształtnika 6-pulsowego 50 kW z filtrem aktywnym, b) wyniki badań symulacyjnych 12-pulsowego prostownika 50 kW z układem TDS λ i filtrem aktywnym, c) wyniki badań laboratoryjnych prostownika 12-pulsowego 2 kW tylko z układem TDS λ : gdzie: 1 – prąd i_k , 2 - prąd i_a , 3 – prąd i_L

Na rysunku 2 przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych - wyniki badań

symulacyjnych dotyczących przekształtnika 6-pulsowego 50 kW z filtrem aktywnym (rys. 2a), wyniki badań symulacyjnych dotyczyły 12-pulsowego przekształtnika 50 kW z układem TDS λ i filtrem aktywnym (rys. 2b) oraz wyniki badań laboratoryjnych przekształtnika 12-pulsowego 2 kW tylko z układem TDS λ (rys. 2c). Najważniejsza na rysunku 2b jest wyraźnie niewielka moc zastosoanego równoległego filtra aktywnego. Na rysunku 2c należy zwrócić uwagę, że odkształcenie prądu i_a (rys. 2a) jest większe niż w przypadku prądu i_a , zilustrowanego na rysunku 2b.

Prostownik 24-pulsowy z filtrem aktywnym

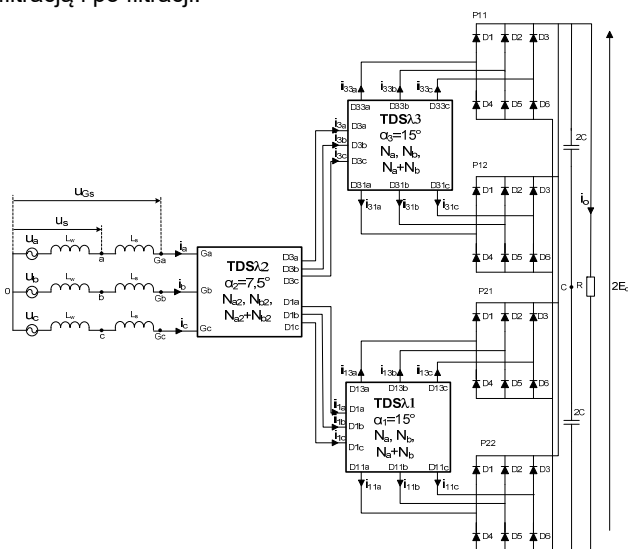
Opisany prostownik 12-pulsowy posłużył jako podstawa koncepcji prostownika 24-pulsowego, który został zaproponowany w pracy [8].

Na rysunku 3 przedstawiono schemat ideowy niesterowanego prostownika 24-pulsowego, który jest zasilany z trójfazowej sieci elektroenergetycznej o napięciu fazowym U_n ($n = a, b, c$). Poniżej przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych dla układu przekształtnika 24-pulsowego o mocy 2 kW.

Współpraca prostowników wielopulsowych z APF – wyniki badań laboratoryjnych

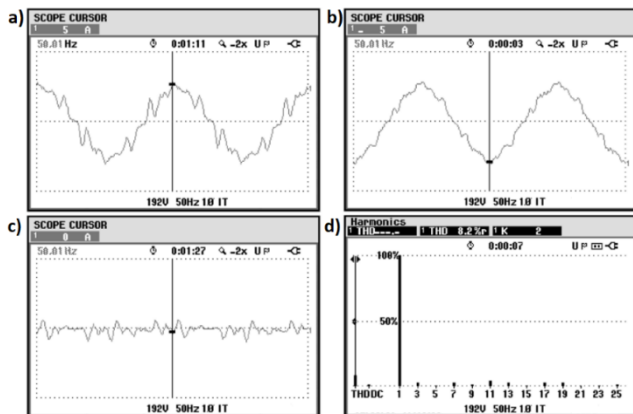
Na podstawie przedstawionych w [12] zależności obliczono szereg parametrów w celu przygotowania laboratoryjnych modeli układów prostowników dwunasto- i dwudziestopulsowych, które współpracowałyby z filtrem APF. Uzyskane wyniki badań, które zostały przeprowadzone z udziałem zbudowanych modeli, przedstawiono na rysunku 9 w postaci przebiegów wybranych wielkości. Badania laboratoryjne wykonano w Laboratorium Energoelektroniki firmy C&T Elmech Sp. z.o.o. w Pruszczu Gdańskim.

Poniżej zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych dla dwunastopulsowego i dwudziestopulsowego prostownika z APF. Na rysunkach 4 i 5 zestawiono przebiegi prądów płynących w sieci przed filtracją i po filtracji.

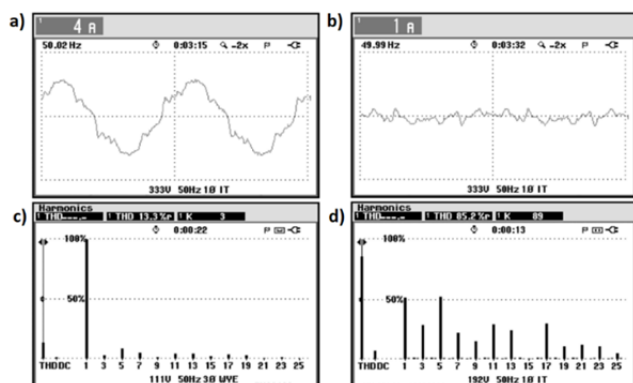


Rys. 3. Schemat ideowy niesterowanego prostownika 24-pulsowego z układem dławików sprzężonych TDS λ

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki dla prostownika dwunastopulsowego, dla którego moc gabarytowa układu TDS λ była równa 13% mocy wyjściowej DC (P_d), a moc APF wynosiła około 20% P_d . Natomiast na rysunku 5 przedstawiono wyniki dla prostownika dwudziestopulsowego dla którego moc gabarytowa układu TDS λ była równa 21% P_d , a moc APF była równa około 20% P_d .



Rys.4. Przebieg prądu płynącego w sieci przed filtracją a) i po filtracji b) wraz z widmem harmonicznym d) oraz przebiegiem prądu kompensującego c) dla prostownika 12-pulsowego



Rys.5. Przebieg prądu płynącego w sieci po filtracji a) i jego widmo amplitudowe c) wraz z przebiegiem prądu kompensującego b) i jego widmem harmonicznym d) dla prostownika 24-pulsowego

Efektywna współpraca prezentowanych układów prostowników wielopulsowych z APF, pozwala pominąć zastosowanie dławików liniowych L_d , a tym samym obniżyć koszty budowy. Układ prostownika wielopulsowego współpracującego z filtrem aktywnym pozwala na uzyskanie prądu zasilającego o niewielkich odkształceniach. Jednocześnie należy zauważyć, że zastosowany układ dławików sprzężonych oraz filtr aktywny charakteryzują się niską mocą, co oznaczać może, że układ taki będzie stosunkowo tani. Praktyczne zastosowanie systemu można rozważyć w odniesieniu do sieci lokalnych, np. okrętowych, które często zasilają odbiorniki nieliniowe.

Wnioski

Koncepcja układu prostowników z dławikami sprzężonymi i filtrem aktywnym jest jednym z podejść stosowanym do zagadnienia poprawy jakości energii pobieranej z sieci zasilającej. Podejście to w szczególności uwzględnia możliwość konstruowania tanich systemów zasilania o zwiększonej niezawodności w trudnych warunkach środowiskowych, na przykład na pokładzie statku.

Omówienie badanych układów z punktu widzenia niezawodności i praktycznych zastosowań w istniejących układach zasilania o wysokich wymaganiach jakościowych (EMC) jest dużym wyzwaniem dla przedstawionej koncepcji z jednoczesnym zastosowaniem układu dławików TDSL i APF.

Korzystnym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie układu składającego się z dławika sprzężonego TDSL do prostownika wielopulsowego z APF, ze względu na kompromis między ograniczeniem mocy dławika i filtra,

a poziomem redukcji harmonicznego prądu linii zasilającej. Proponowane rozwiązanie umożliwia uproszczenie systemu poprzez eliminację dławika L_d i obniżenie kosztów realizowanego układu.

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 hab. inż. Piotr Mysiak, E-mail: p.mysiak@we.umg.edu.pl; dr inż. Adam Muc, E-mail: a.muc@we.umg.edu.pl; Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

LITERATURA

- [1] Rao, M.U.M.; Rosalina, K.M. Transient stability improvement of Microgrid using Series Active Power Filters. In Proceedings of the 2019 Fifth International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, India, 21–22 February 2019; (2019), pp. 1–4
- [2] Geng, H.; Zheng, Z.; Zou, T.; Chu, B.; Chandra, A. Fast Repetitive Control with Harmonic Correction Loops for Shunt Active Power Filter Applied in Weak Grid. *IEEE Trans. Ind. Appl.* (2019), 55, 3198–3206
- [3] Gautam, S.; Aeidapu, M. Sine Cosine Algorithm Based Shunt Active Power Filter For Harmonic Compensation. In Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, India, 12–14 June 2019; (2019), pp. 1051–1056
- [4] Bielecka A., Wojciechowski D., Stability Analysis of Shunt Active Power Filter with Predictive Closed-Loop Control of Supply Current, *Energies*, 14, (2021)
- [5] Muc A., Iwaszkiewicz J., Mysiak P., Piechowski L., System zasilania falowników wielopulsowych wykorzystujący wielopulsowe prostowniki z dławikami sprzężonymi magnetycznie, *Przegląd Elektrotechniczny* (25.06.2021), <http://pe.org.pl/articles/2021/2/18.pdf>, (2021)
- [6] Iwaszkiewicz J., Mysiak P., Supply System for Three-Level Inverters Using Multi-Pulse Rectifiers with Coupled Reactors, *Energies*, (25.06.2021), <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3385>, (2019)
- [7] Sleszynski W., Cichowski A., Mysiak P., Suppression of supply current harmonics of 18-pulse diode rectifier by series active power filter with LC coupling, *Energies*, (25.06.2021), <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/22/6060/htm>, (2019)
- [8] Mysiak P., The DC-output multipulse converter in the low voltage power network supply conditions (in polish). *The doctor's thesis dissertation*, Warsaw Technical University, (1996)
- [9] Miyairi S., New method for reducing harmonics involved in input and output of rectifier with interphase transformer. *IEEE Trans. on Ind. Applic.*, (1986)
- [10] Tunia H., Barlik R., Mysiak P., The coupled reactors system for current higher harmonics reducing in three-phase loads supplying from VSI (in polish). *Electrical Power Quality and Utilisation*, Cracow, (1998)
- [11] Mysiak P., A multi-pulse diode rectifier with a coupled three-phase reactor – the design method and results of the simulation and laboratory tests. *Electrical Power Quality and Utilisation Journal XI* (1), ISSN 1234-6799, (2005)
- [12] Aredes M., Active Power Line Conditioners. The doctor engineer dissertation, Technical University of Berlin, (1996)
- [13] Depenbrock M., A new 18-pulse rectifier circuit with line-side interphase transformer and nearly sinusoidal line currents, *IAS*, (1990)
- [14] Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M., Instantaneous power theory and applications to power conditioning. John Wiley&Sons, (2007)
- [15] Supronowicz H., Strzelecki R., The power factor in AC-power supplying systems and its improvement methods (in polish). Publishing House of Warsaw Technical University, (2000)
- [16] Wojciechowski D., Grid voltages sensorless control of PWM rectifier with active filtering. *Electrical Power Quality and Utilisation Journal XII* (1), 43-48, ISSN 1234-6799, (2006)