

Pasywny koncentrator dla falowników jednofazowych z wyjściem trójfazowym wykorzystujący dławiki sprzężone magnetycznie

Streszczenie. W pracy przedstawiono pasywny koncentrator dla falowników jednofazowych z wyjściem trójfazowym, który wykorzystuje dławiki sprzężone magnetycznie. Rozważono dwa warianty współpracy koncentratora z jednofazowymi falownikami napięcia. W pierwszym wariantcie zaproponowano topologię układu, w której do koncentratora podłączono trzy jednofazowe falowniki pełnomostkowe, natomiast w drugim wariantcie sześć falowników półmostkowych. Opracowano system sterowania falownikami nie wykorzystujący modulacji PWM. Dla napięć zasilających utworzono wspólny punkt gwiazdowy w postaci dzielnika pojemnościowego obejmującego wszystkie falowniki. Opisano badania symulacyjne, w których przedstawiono uzyskane przebiegi napięć i prądów oraz oceniono wpływ zmiany napięcia zasilania falowników na pracę koncentratora i kształt napięć wyjściowych.

Abstract. This paper presents a passive concentrator for single-phase inverters with three-phase output, which uses magnetically coupled reactors. Two variants of cooperation of the concentrator with single-phase voltage inverters were considered. The first variant proposed a system topology in which three single-phase full-bridge inverters were connected to the concentrator, while the second variant proposed six half-bridge inverters. The inverter control system that does not use PWM modulation has been developed. A common star point was created for the supply voltages in the form of a capacitive divider covering all inverters. Simulation studies are described, presenting the obtained voltage and current waveforms. The impact of changing the supply voltage of the inverters on the operation of the concentrator and the shape of the output voltages was assessed. (*Passive concentrator for single-phase inverters with three-phase output using magnetically coupled reactors*).

Słowa kluczowe: dławiki sprzężone magnetycznie, jednofazowe falowniki napięcia, koncentrator, mikroświat, sieć izolowana.

Keywords: magnetically coupled reactors, single-phase voltage inverters, concentrator, coupling, smart grid, isolated grid.

Wstęp

Rozwój odnawialnych źródeł energii jest obecnie głównym motorem działań podejmowanych w energoelektronice, które przyczyniają się do powstawiania rozwiązań układowych nastawionych na współpracę różnych przekształtników i kondycjonowanie energii elektrycznej. Aspekty te są szczególnie istotne, gdy rozważane są możliwości podłączania sieci OZE (Odnawialne Źródła Energii) do istniejącego systemu elektroenergetycznego [1].

W systemach OZE związanych z fotowoltaiką podstawową grupę przekształtników stanowią falowniki napięcia. W zdecydowanej większości są to falowniki jednofazowe [2].

We współczesnych systemach fotowoltaicznych stosuje się dwa główne podejścia. Pierwsze podejście opiera się na budowie systemu fotowoltaicznego wykorzystującego jeden falownik dużej mocy lub drugie podejście, które wykorzystuje kilka falowników mniejszej mocy. Następnie, falowniki są podłączane przez filtry L lub LCL do systemu elektroenergetycznego. Czasem w takiej strukturze pojawiają się też liczniki energii i inne urządzenia oraz aparaty, które nie są objęte zakresem artykułu [2,3,4].

Skupiając się natomiast na pobieraniu energii z paneli fotowoltaicznych i zmianie tej energii na prąd przemienny koncentrujemy się na falownikach i ich połączeniach.

Zdaniem autorów istotne staje się takie łączenie falowników między sobą i z publicznym systemem elektroenergetycznym, aby ten proces był efektywny oraz zapewniał kondycjonowanie energii elektrycznej prowadzące do utrzymania wysokiej jakości. W kontekście opisywanych w artykule wariantów koncentratora efektywność oznaczałaby liczbę źródeł energii elektrycznej, np. łańcuchów fotowoltaicznych, które można podłączyć do jednego koncentratora. Czym więcej falowników można podłączyć, tym efektywniej jest wykorzystany koncentrator. Użycie dławików sprzężonych magnetycznie oraz zastosowane sterowanie falownikami pozwala uzyskać wielopoziomowe przebiegi napięć wyjściowych, które

charakteryzują się niską zawartością wyższych harmonicznych. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia też utworzenie trójfazowego systemu elektroenergetycznego. System ten może mieć charakter sieci izolowanej [5].

Opisywany koncentrator jest układem pasywnym, dlatego jego podstawową zaletą jest to, że nie musi być zasilany i nie jest też sterowany, co zdecydowanie ułatwia jego użytkowanie i powoduje, że jest odporny na uszkodzenia. Zastosowana topologia połączenia dławików sprzężonych magnetycznie zmniejsza ich liczbę w proponowanych wariantach koncentratora. Ograniczenie liczby elementów magnetycznych w urządzeniach energoelektrycznych jest obecnie pożądanym zabiegiem ze względu na koszty materiałowe i tendencję do minimalizacji gabarytów urządzeń. Wykorzystane połączenie dławików sprzężonych magnetycznie nosi nazwę TDSA (Trójfazowy Dławik Sprzężony w wariantcie połączeń lambda) i zostało opisane szerzej w pracy [6].

Najważniejszą jednak zaletą opisywanego rozwiązania jest to, że przez dobranie odpowiedniej liczby zwojów dla przyjętej topologii połączenia dławików na wyjściu struktury, która jest trójfazowa, uzyskuje się - przy elementarnie prostym sterowaniu falowników jednofazowych, trójfazowe przebiegi wielopoziomowe, które przekładają się na bardzo niską zawartość THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) dla napięć i prądów wyjściowych [6].

Układ dławików sprzężonych magnetycznie jako pasywny sprzęg do falowników jednofazowych

Trójfazowy dławik sprzężony (ang. *Harmonic Cancelling Reactor*, *Harmonic Blocking Current Transformer*) został opatentowany w 1974 roku przez U. Meier'a [6]. W latach 1989-1990 M. Depenbrock i C. Niermann opublikowali układ prostownika 12-pulsowego z zastosowaniem trójfazowych dławików sprzężonych do pracy równoległej dwóch trójfazowych układów mostkowych [7,8]. Układ wykorzystujący dławiki sprzężone magnetycznie typu TDSA był również stosowany do budowy prostowników 12, 18 czy 36 plusowych, jako stabilnych źródeł napięcia do

falowników wielopoziomowych w pracach [9,10,11]. Struktura TDSλ jest optymalna pod względem użytej liczby elementów magnetycznych. Charakteryzuje się dużą sprawnością (powyżej 90%) a jej głównym parametrem zależnym od obciążenia jest moc gabarytowa [6].

Trójfazowy dławik sprzężony, dzięki odpowiedniej konstrukcji blokuje określone wyższe harmoniczne (np. rzędu 5, 7, 17, 19 itd.) a ponadto przekształca dwa systemy trójfazowe o zadanym wzajemnym przesunięciu fazowym w jeden system trójfazowy.

Dławiki (Df) zbudowane są z trzech oddzielnych rdzeni magnetycznych z odpowiednio dobraną liczbą zwojów (N_a , N_b , N_c). Przyjęta topologia połączeń między dławikami pozwala uzyskać na ich wyjściu dwa trójfazowe i symetryczne układy napięciowe przesunięte wzajemnie w fazie o kąt $\pi/6$, ale wzajemne przesunięcie fazowe można modyfikować przez zmianę liczby zwojów w szerokim zakresie. Taka możliwość została wykorzystana przy budowie prostowników wielopusowych, tj. 18, 24 czy 36 plusowych [6]. W tych przekształtnikach wykorzystano kilka struktur TDSλ jednocześnie.

Korzystając z zależności (1) można dobrać dla zadanego kąta, w naszym przypadku jest to kąt $\pi/12$, liczbę zwojów N_a i N_b , ponieważ liczba zwojów oznaczona przez N_c wynika z zależności (2). Wartość kąta fazowego między wektorami przestrzennymi napięć wyjściowych układu TDSλ (rys. 1) zależy bezpośrednio od stosunku liczby zwojów (N_b/N_a) odpowiednich uzwojeń. Zgodnie z [9], otrzymuje się zależność przekładni p dławika w układzie TDSλ od kąta α przesunięcia trójfazowych systemów napięć zasilających. Stosunek liczby zwojów spełniający powyższy warunek, dla odpowiednich dławików układu TDSλ, wynosi:

$$(1) \quad p = \frac{N_b}{N_a} = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3}-\alpha)} = \frac{\sin(\frac{\pi}{12})}{\sin(\frac{\pi}{3}-\frac{\pi}{12})}$$

$$(2) \quad N_c = N_a + N_b$$

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. Schemat dławików sprzężonych magnetycznie w układzie TDSλ przedstawiono na rysunku 1.

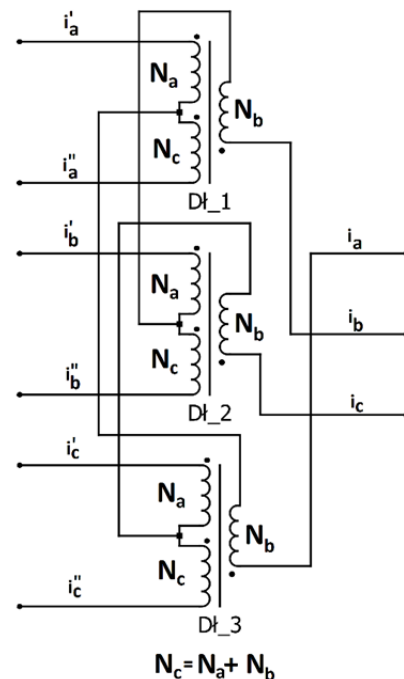
Wybrane warianty koncentratora

Przedstawiona na rysunku 1 topologia układu TDSλ umożliwia różne konfiguracje podłączenia falowników jednofazowych a następnie otrzymanie na wyjściu napięcia trójfazowego o niskiej zawartości THD. Prezentowany układ dławików wprowadza stałe przesunięcie, które powoduje, że na wyjściu dławików powstaje trójfazowe napięcie o dużej liczbie poziomów.

Jednofazowe falowniki podłączone do układu TDSλ wymagają dedykowanego systemu sterowania. Klasyczna strategia sterowania jednofazowymi falownikami napięcia wymaga, aby klucze elektroniczne w falownikach były przełączane co π , natomiast w proponowanym układzie, w jego strategii sterowania należy również uwzględnić przesunięcia o kąt $\pi/12$, które wprowadza układ TDSλ. Aby w układzie TDSλ zapewnić przesunięcie o kąt $\pi/12$ należy dobrać odpowiednią przekładnię zwojową elementów indukcyjnych [12]. W rozważanym przypadku uzwojenia te zostały dobrane w następującym stosunku: 3.72:1:2.72.

Mając na uwadze przedstawione wymagania co do napięć wejściowych dla układu TDSλ - pochodzących z falowników jednofazowych podłączonych do dławików, w

pracy rozważono dwa warianty podłączenia falowników do koncentratora.



Rys.1. Konfiguracja uzwojeń dla układu dławików sprzężonych w układzie TDSλ, gdzie $N_c = N_a + N_b$

Istotną cechą opisywanego rozwiązania jest fakt, że w sterowaniu falowników wykorzystuje się podstawową strategię typu włącz - wyłącz przełączania kluczy elektronicznych. W strategii tej nie jest używana modulacja PWM (ang. *Pulse-width Modulation*). Dzięki temu minimalizowane są straty wynikające z przełączania kluczy elektronicznych a układ sterowanie jest bardzo prosty [12].

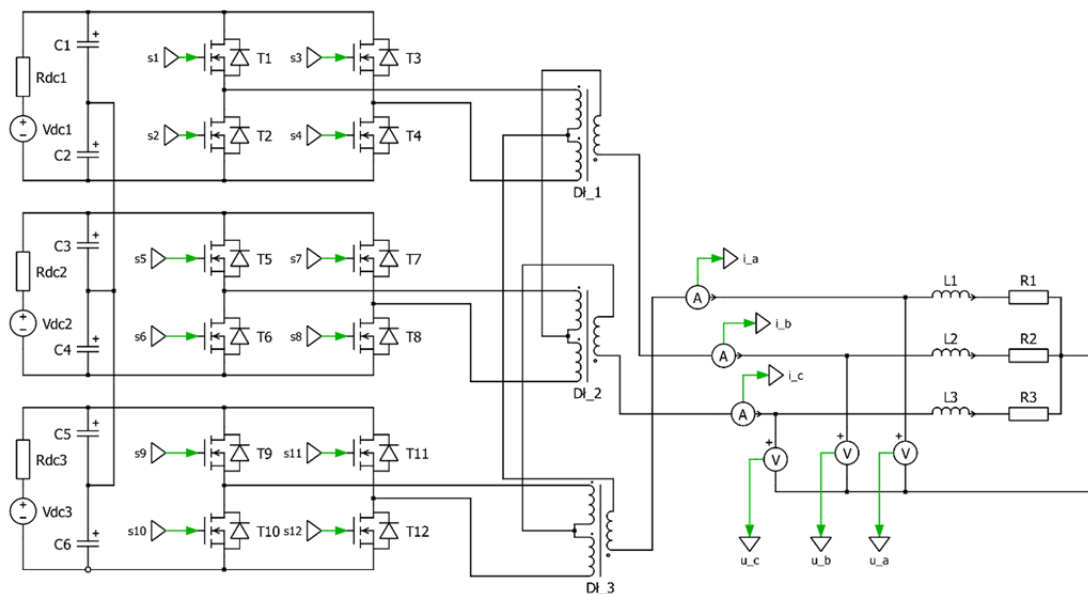
W pierwszym wariancie, do układu TDSλ (rys.1) podłączone zostały trzy falowniki jednofazowe w układzie mostka H. Na rysunku 2 została przedstawiona topologia koncentratora z trzema tego typu falownikami.

Na rysunku 3 przedstawiono drugi wariant koncentratora. W tej wersji, do układu TDSλ podłączonych zostało sześć jednofazowych falowników półmostkowych. Po dwa falowniki na każdy dławik Df_i , gdzie i to numer dławika, który przyjmuje indeksy od 1 do 3.

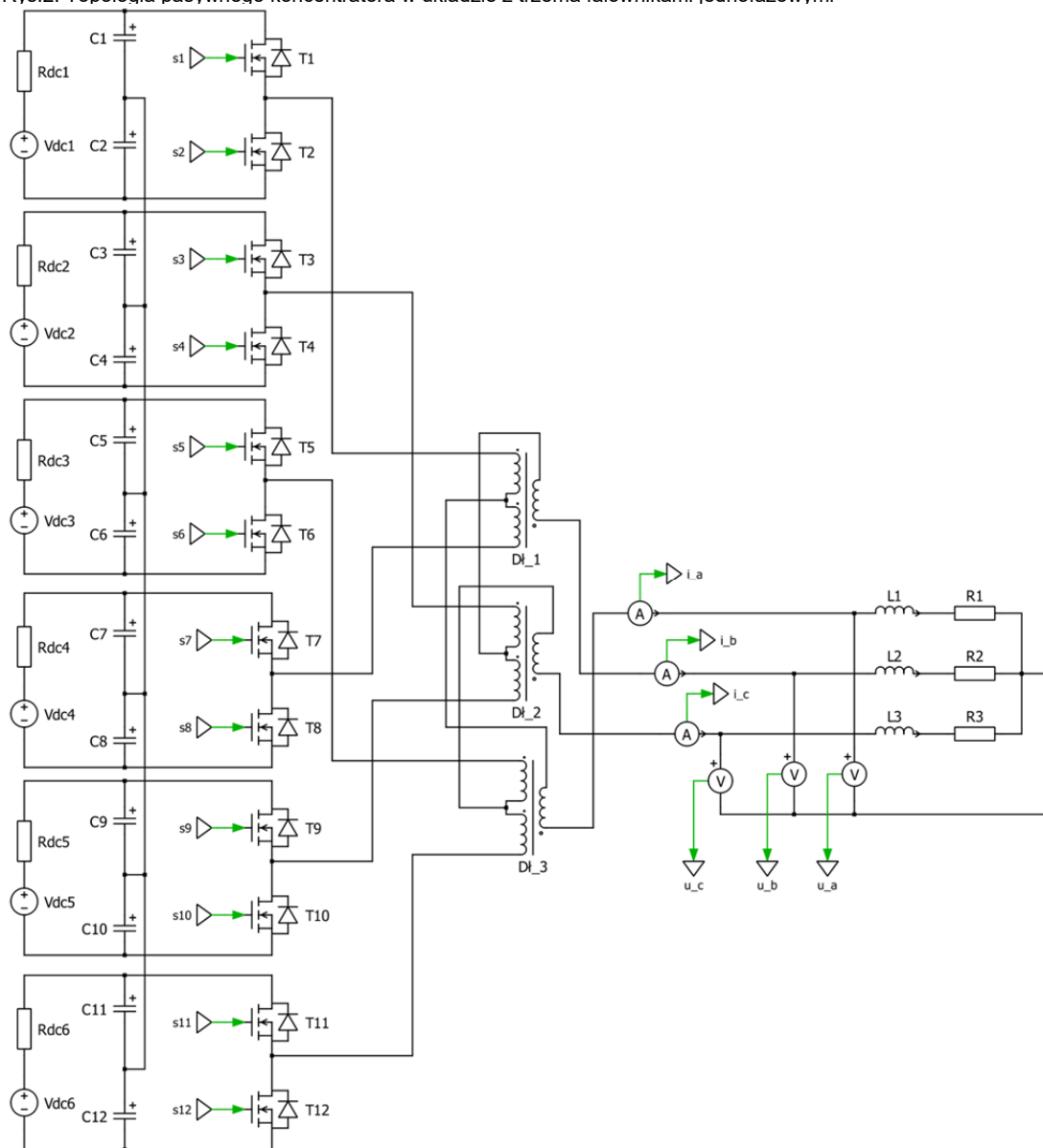
Topologia zastosowanego falownika jednofazowego jest główną różnicą między wariantami koncentratora.

Istotnym elementem występującym na każdym schemacie, jest dzielnik pojemnościowy napięć (tworzony przez kondensatory oznaczone: $C_1 = C_2 = \dots = C_{12}$), który tworzy wspólny punkt gwiazdowy dla wszystkich napięć w obwodach pośredniczącym falowników jednofazowych. Celem dzielnika pojemnościowego jest utworzenie połączenia dla składowych przemiennych prądów w obwodzie zasilania przy jednoczesnej eliminacji składowych stałych.

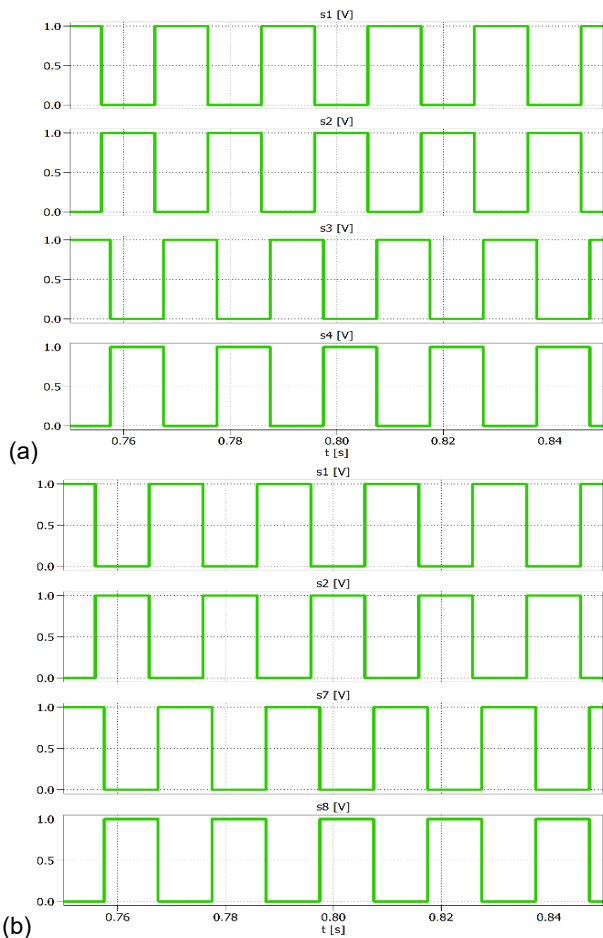
Na rysunku 4 (a) i (b) przedstawiono przykładowe sygnały sterujące kluczami elektronicznymi dla falowników odpowiadających za powstanie napięcia na dławiku oznaczonym Df_1 w obu rozważanych wersjach koncentratora. Sterowanie pozostałymi falownikami w tych wariantach koncentratora odbywa się na podobnej zasadzie ale sygnały sterujące (oznaczone $s_{1...12}$) są przesunięte w fazie o $2\pi/3$ i $4\pi/3$ aby zapewnić zgodność z trójfazowym systemem elektroenergetycznym. W jednym i drugim przypadku falowniki kształtują napięcie fazy B.



Rys.2. Topologia pasywnego koncentratora w układzie z trzema falownikami jednofazowymi



Rys.3. Topologia pasywnego koncentratora w układzie z sześcioma falownikami jednofazowymi

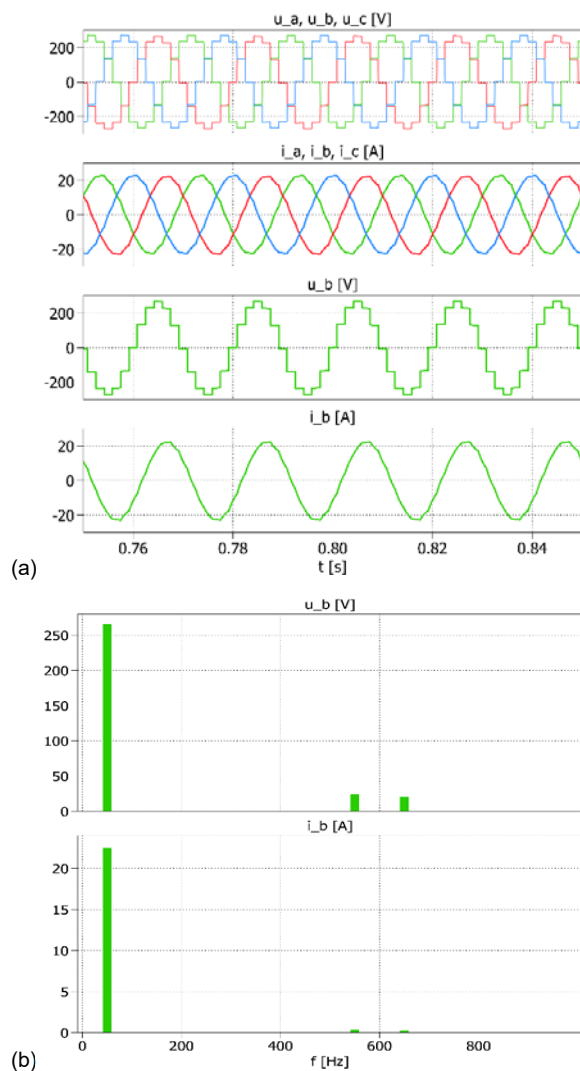


Rys.4. Przykładowe sygnały sterujące falownikami podłączonymi do dławika *Df1* w (a) - pierwszym wariantcie z falownikami pełnomostkowymi i (b) - drugim wariantcie z falownikami półmostkowymi

Badania symulacyjne

W badaniach symulacyjnych przedstawiono podstawowe przebiegi napięć i prądów wyjściowych przy obciążeniu rezystancyjno-indukcyjnym o wartościach: $R_1=R_2=R_3=10\ \Omega$ i $L_1=L_2=L_3=20\ \text{mH}$. Badania symulacyjne wykonano w programie PLECS. Aby pokazać możliwości układu wykonano symulacje, w których przedstawiono działanie koncentratora przy zasilaniu falowników napięciem stałym o wartości $V_{dc1} = 400\ \text{V}$, gdzie *i* oznacza kolejny numer falownika i przyjmuje wartości od 1 do 6. W pracy pokazano również scenariusz, w którym pierwszy falownik podłączony do dławika *Df1* ma obniżone napięcie do $V_{dc1} = 200\ \text{V}$. Celem tego badania było zobrazowanie, jak koncentrator reaguje na zmianę napięcia zasilania, która w podseciach fotowoltaicznych zdarza się często w wyniku np. zaciemnienia łańcucha paneli czy uszkodzenia jednego z nich.

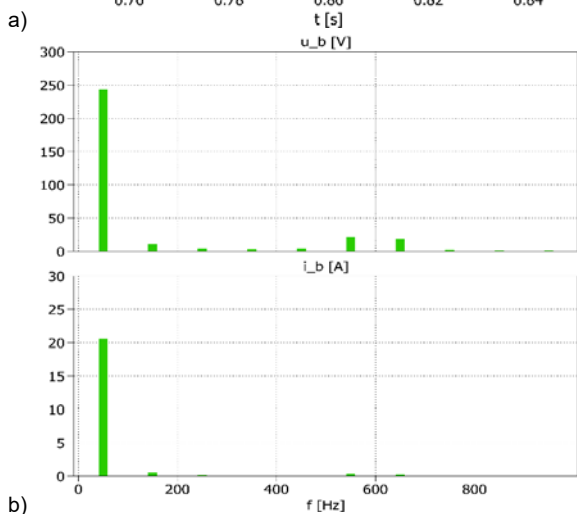
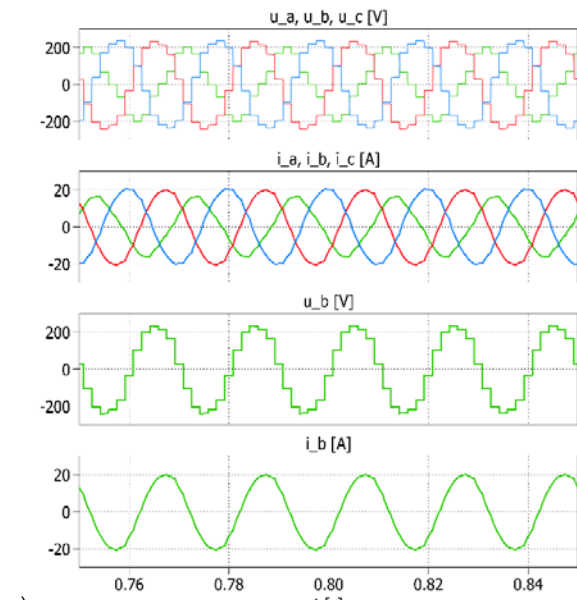
Na rysunku 5 (a) przedstawiono przebiegi napięć i prądów dla fazy B i obciążania RL w wariantcie pierwszym i drugim. Natomiast na rysunku 5 (b) przedstawiono widma amplitudowe tych przebiegów. Mimo, że w obu wariantach koncentratora zastosowano różne falowniki, to przebiegi napięć i prądów na wyjściu dławików oraz ich widma są takie same. Dlatego autorzy nie przedstawili w pracy wyników symulacji oddzielnie dla dwóch wariantów koncentratora przy typowej jego pracy. Takie rozróżnienie nastąpiło w drugim etapie badań symulacyjnych, w których oceniono wrażliwość pracy wariantów koncentratora na zmianę napięcia zasilania.



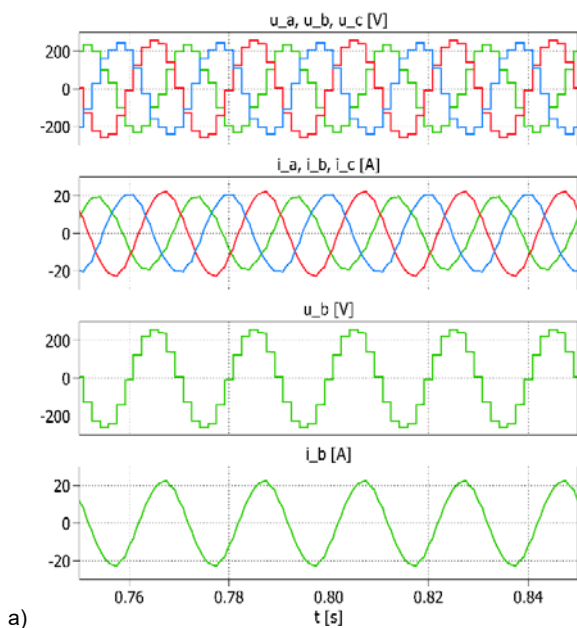
Rys.5. Przebiegi napięć i prądów na wyjściu układu TDS λ dla pierwszego wariantu koncentratora w fazie B (a) oraz widmo amplitudowe tego napięcia i prądu (b)

Działanie układu TDS λ z trzema lub sześcioma falownikami jednofazowymi i napięciami zasilania falowników V_{dc1} o tej samej wartości pozwala uzyskać takie same wartości i kształty napięć i prądów wyjściowych. Napięcie fazowe jest wielopoziomowe a prąd bliski przebiegowi sinusoidalnemu. Zawartość THD dla napięcia fazy B $\text{THD}_u = 15,1\ \%$, a dla prądu tej fazy $\text{THD}_i = 2\ \%$. Widma amplitudowe dla fazy B potwierdzają powyżej przedstawione wartości THD. W widmie napięcia wyjściowego występuje niewielka zawartość 11 (9 %) i 13 (7,5 %) harmonicznej. Dla porównania, te same harmoniczne dla prądu wyjściowego stanowią w przypadku 11 harmonicznej 1,5 % i 13 harmonicznej 1,1 %.

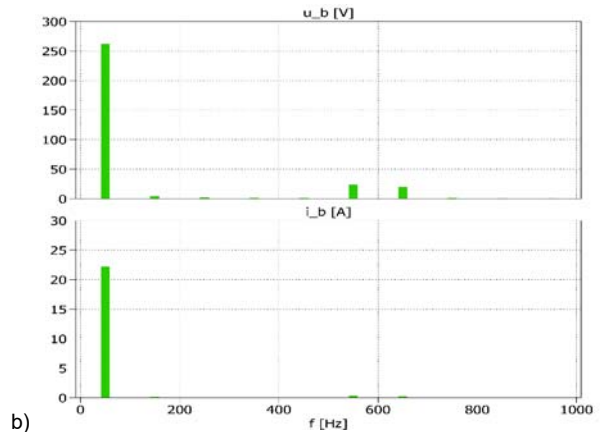
Natomiast na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przebiegi napięć i prądów wyjściowych dla obu wariantów koncentratora w sytuacji, w której dla pierwszego falownika (pierwszy wariant – falownik z tranzystorami: T1, T2, T3 i T4, oraz drugi wariant – falownik z tranzystorami T1 i T2) napięcie zasilania zostało obniżone do połowy, czyli $V_{dc1} = 200\ \text{V}$. Zmniejszenie napięcia zasilania dla jednego falownika w każdym z rozważanych wariantów koncentratora spowodowało zaburzenie w postaci zmiany kształtu przebiegów napięć wyjściowych oraz zmniejszenia amplitudy prądów. Otrzymane przebiegi różnią się w obu wariantach intensywnością zmian.



Rys. 6 Przebiegi napięć i prądów w fazie B na wyjściu układu TDS λ w pierwszym wariantie koncentratora dla obniżonego napięcia $V_{dc1} = 200$ V (a) oraz widmo amplitudowe (b)



Rys. 7 Przebiegi napięć i prądów w fazie B na wyjściu układu TDS λ w drugim wariantie koncentratora dla obniżonego napięcia $V_{dc1} = 200$ V (a) oraz widmo amplitudowe (b)



Rys. 7 Przebiegi napięć i prądów w fazie B na wyjściu układu TDS λ w drugim wariantie koncentratora dla obniżonego napięcia $V_{dc1} = 200$ V (a) oraz widmo amplitudowe (b)

W wariantcie pierwszym koncentrator zdecydowanie gorzej poradził sobie po obniżeniu napięcia do 200 V na pierwszym falowniku. Taka reakcją koncentratora wynika z tego, że w tym przypadku zmiana napięcia zasilania wpłynęła jednocześnie na napięcie wyjściowe całej drugiej fazy. Natomiast podobna zmiana napięcia dla pierwszego falownika w wariantcie drugim nie jest już tak znacząca dla koncentratora i kształtu oraz wartości napięć wyjściowych. Wpływ zmiany napięcia jest też zauważalny w amplitudowych charakterystykach widmowych. W pierwszym wariantcie, w widmie napięcia (rys. 7 (b)) dla fazy B widać wyraźnie zarysowaną 3 harmoniczną oraz pozostałe nieparzyste harmoniczne, natomiast w widmie prądu widać [wpływ 3, 11 i 13 harmonicznej](#). W przypadku drugiego wariantu zmiana napięcia w charakterystykach widmowych [prądu](#) (rys. 8 (b)) jest praktycznie niedostrzegalna, [natomiast w przypadku napięcia](#) widać jedynie wpływ 3, 11 i 13 harmonicznej.

Wnioski

W czasach rozwoju różnego rodzaju mikro sieci, które są zasadniczo dedykowane do wszechobecnych systemów OZE, przedstawiona propozycja koncentratora umożliwiającego podłączenie jednofazowych falowników i konwersję napięć jednofazowych na system trójfazowy wydaje się być ciekawą propozycją, która w znacznym stopniu rozwiązuje też problem kondycjonowania energii ze względu na użyte dławiki i wielopoziomowy charakter napięć wyjściowych. W opisanych wariantach koncentratora strategię sterowania falownikami jednofazowymi nie wykorzystują PWM, co wpływa na zmniejszenie liczby przełączeń i jednocześnie upraszcza układy sterowania. Układ TDS λ wykorzystujący dławiki sprzężone magnetycznie jest pasywny, co nie wymaga dodatkowego zasilania i czyni go mało podatnym na uszkodzenia.

Prezentowane koncepcje koncentratora z falownikami jednofazowymi charakteryzują się dużą elastycznością, ponieważ można je stosować zarówno do prostych przypadków z trzema łańcuchami fotowoltaicznymi jak i z sześcioma - bez dużych zmian w samej strukturze.

Stosowane w koncentratorach dzielniki pojemnościowe zapewniają również eliminację składowej stałej prądu w obwodzie zasilania.

Opisane warianty koncentratora z falownikami jednofazowymi charakteryzują się podobnymi kosztami inwestycyjnymi. Oba rozwiązania wymagają użycia tej samej struktury dławików oraz tej samej liczby kluczy elektronicznych, natomiast podstawowa różnica między nimi dotyczy liczby kondensatorów tworzących dzielnik

pojemnościowy. W wariancie z falownikami pełnomostkowymi należy użyć sześć kondensatorów, a w wariancie z falownikami półmostkowymi dwa razy więcej kondensatorów. Z drugiej strony, wariant z falownikami pełnomostkowymi umożliwia obsłużenie dwa razy mniejszej liczby łańcuchów fotowoltaicznych niż wariant z falownikami półmostkowymi.

Porównując sprawności obu wariantów można uznać, że jest podobna, natomiast wariant z falownikami pełnomostkowymi jest bardziej wrażliwy na zmianę napięcia zasilania niż wariant z falownikami półmostkowymi.

Istotnym parametrem rozważanej struktury jest moc gabarytowa dławików, która silnie zależy od obciążenia [6].

Proponowane struktury koncentratorów opartych na dławikach sprzężonych magnetycznie oraz falownikach jednofazowych wymagają dalszych badań, zwłaszcza próby ich implementacji w warunkach laboratoryjnych.

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

LITERATURA

- [1] Bose B. K., Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy Systems, in Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 11, s. 2011-2018, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2745621
- [2] Gandoman F. H., Ahmadi A., Sharaf A. M., Siano P., Pou J., Hredzak B., Agelidis V. G., Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Part 1, February 2018, s. 502-514
- [3] Łebkowski, A. Steam and Oxyhydrogen Addition Influence on Energy Usage by Range Extender—Battery Electric Vehicles. Energies 2018, 11, 2403. <https://doi.org/10.3390/en11092403>
- [4] Lamnatou Chr., Chemisana D., Cristofari C., Smart grids and smart technologies in relation to photovoltaics, storage systems, buildings and the environment, Renewable Energy Volume 185, February 2022, s. 1376-1391
- [5] Ayadi F., Colak I., Garip I., Bulbul H. I., Impacts of Renewable Energy Resources in Smart Grid, 2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Paris, France, 2020, pp. 183-188, doi: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144695
- [6] Meier H.U., Combining Inverters for Harmonic Reduction. United States Patent, No 3792286, 1974
- [7] Depenbrock M., Niermann C., Netzfreundliche Gleichrichterschaltung mit netzseitiger Saugdrossel (NSD) - Teil I: Theorie der Wechselspannungsverhältnisse. Etz Archiv Bd. 11 (1989) H.8, s. 241-243
- [8] Depenbrock M., Niermann C., A New 12-Pulse Rectifier Circuit with Line-Side Interphase Transformer and Nearly Sinusoidal Line Current. Proc. of the 6th Conference on Power Electronics and Motion Control, Budapest, Hungary, Oct. 1-3, Vol. 2, 1990, s. 374-378
- [9] Mysiak P., A 24-pulse diode rectifier with coupled three-phase reactor. ISSN 0253-3839, National Taiwan University of Science and Technology, Journal of the Chinese Institute of Engineers, (2007), Vol. 30, No. 7, s. 1189-1204
- [10] Iwaszkiewicz J., Muc A., Mysiak P., A 12-pulse rectifier using coupled reactors for supplying three-inverters, Renewable Energies and Power Quality, Volume No.17, July 2019, <https://doi.org/10.24084/repqj17.382>
- [11] Iwaszkiewicz J., Muc A., Mysiak P., 18-pulse rectifier in arrangement with coupled three-phase reactor, Renewable Energies and Power Quality, Volume No.17, July 2019, <https://doi.org/10.24084/repqj17.383>
- [12] Ourahou M., Ayir W., EL Hassouni B., Haddi A., Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects, Mathematics and Computers in Simulation, Volume 167, January 2020, s. 19-31