

Wysokosprawny obwód balansujący w jednofazowym trójpoziomowym falowniku dwugałęziowym z diodami poziomującymi

Streszczenie. W artykule przedstawiono metody realizacji naturalnego równoważenia napięć na kondensatorach wejściowych w jednofazowym trójpoziomowym falowniku dwugałęziowym z diodami poziomującymi. Metody wykorzystują obwód balansujący RLC oraz obwód RLC z transformatorem, co przy odpowiednim sterowaniu umożliwia zapewnienie naturalnego równoważenia napięć na kondensatorach wejściowych. W przypadku zastosowania układu balansującego z transformatorem możliwe jest wyeliminowanie nieaktywnych składowych z prądu balansującego. W wyniku działania metody w stanie zrównoważonego podziału napięć przez obwód balansujący nie płynie prąd, co eliminuje straty energii związane z przepływem prądu balansującego wysokiej częstotliwości i prąd elementów półprzewodnikowych.

Abstract. The paper presents methods of DC-link voltage natural balancing in the single-phase NPC inverter with two three-level legs. The methods use the RLC balancing circuit and the RLC balancing circuit with transformer. Proper modulation enables DC-link capacitor voltages balancing. In the configuration with the RLC balancing circuit and the transformer the unnecessary components from the balancing current can be eliminated under the balanced state. In a consequence the balancing current in the balanced state disappears decreasing power losses in the converter and current of semiconductor devices. **Methods of DC-link voltage natural balancing in the single-phase NPC inverter with two three-level legs**

Słowa kluczowe: Układ wielopoziomowy, falownik z diodami poziomującymi, naturalny balans napięć,

Keywords: Multilevel converter, diode-clamped inverter, dc-link voltage natural balancing,

doi:10.12915/pe.2014.06.29

Wprowadzenie

Falowniki z diodami poziomującymi (diode-clamped) są bardzo szeroko analizowanymi układami w literaturze [1] - [4]. W falowniku skonfigurowanym z gałęzi trójpoziomowych na wejściu układu znajduje się dzielnik napięcia złożony z dwóch połączonych szeregowo kondensatorów. Dla poprawnej pracy falownika, niezbędny jest równy podział napięć na kondensatorach wejściowych falownika. Zapewnia to prawidłową realizację napięcia wyjściowego, ale również utrzymanie napięć na łącznikach półprzewodnikowych układu w zakresie wartości znamionowych. Jednym z problemów aplikacyjnych takich układów jest możliwość wystąpienia niezrównoważenia napięć wejściowych, co może prowadzić nawet do uszkodzenia układu.

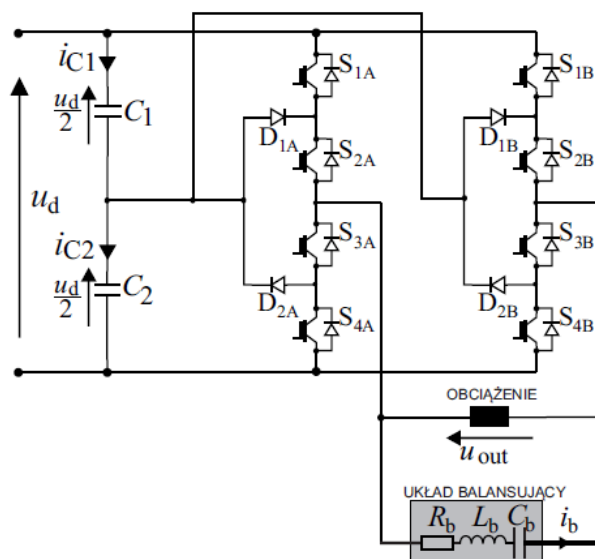
Równoważenie napięć na kondensatorach układów wielopoziomowych rozwiązuje się na wiele sposobów [6] – [44], przez metody naturalnego balansu, specjalne sterowanie, oraz dodatkowe układy. W falownikach trójpoziomowych z diodami poziomującymi możliwe w realizacji są zarówno sposoby kontroli prądów węzła neutralnego, ale również naturalnego balansu [6]-[7]. W artykule przedstawiono wyniki badań metody naturalnego balansu w jednofazowym falowniku z pięciopoziomowym napięciem wyjściowym. Taki układ złożony jest z dwóch trójpoziomowych gałęzi z diodami poziomującymi i jest analizowany w [6], [12], [17], [25], [45].

Jednofazowy trójpoziomowy falownik dwugałęziowy z diodami poziomującymi

Jednofazowy falownik napięcia z pięciopoziomowym napięciem wyjściowym jest mostkowym układem złożonym z trójpoziomowych gałęzi z diodami poziomującymi (rys. 1).

Układ mostkowy umożliwia uzyskanie modulacji napięcia wyjściowego pomiędzy pięcioma poziomami oraz, w zależności od sterowania, pracę przy częstotliwości składowej zmiennej na wyjściu o dwukrotnej wartości w stosunku do częstotliwości impulsowania pojedynczego łącznika. Napięcie na elementach półprzewodnikowych nie powinno przekraczać wartości równej połowie napięcia wejściowego ($u_d/2$). Problemem w takim układzie, podobnie jak w innych układach NPC, jest możliwość wystąpienia niezrównoważenia wartości napięć na kondensatorach

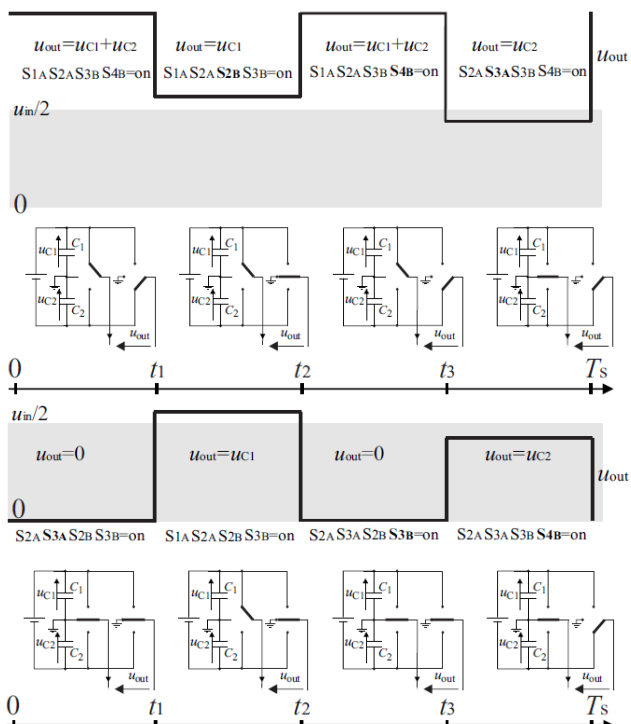
wejściowych. Może to spowodować przekroczenie znamionowego napięcia łączników i uszkodzenie układu.



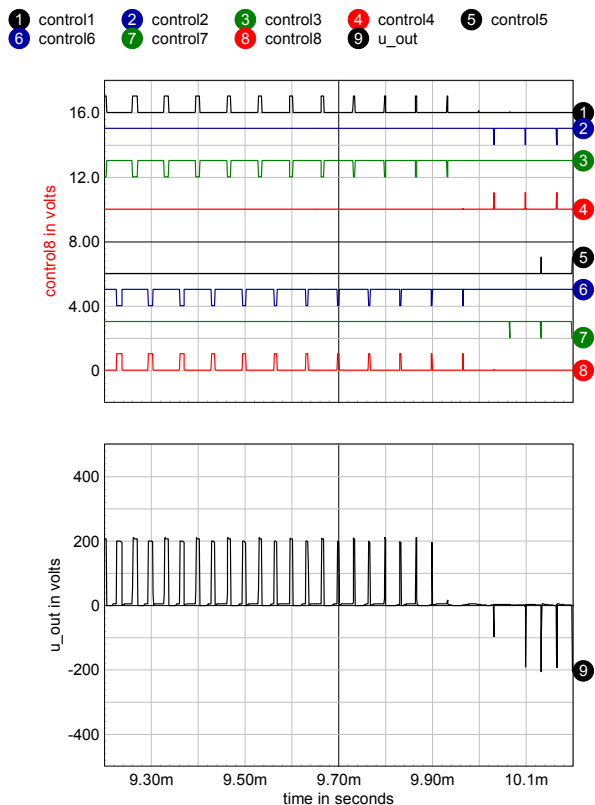
Rys. 1. Jednofazowy trójpoziomowy falownik dwugałęziowy z diodami poziomującymi

Jedną z metod zapewnienia zrównoważenia wartości napięć wejściowych w takim falowniku może być realizacja naturalnego balansu napięć, pomimo, że w pojedynczej gałęzi z diodami poziomującymi naturalny nie występuje. W dwugałęziowym układzie naturalne równoważenie napięć wejściowych można uzyskać przynajmniej na dwa sposoby, które zostaną przedstawione w tym artykule. Dla demonstracji obu metod wykorzystany zostanie obwód balansujący, czyli dodatkowy obwód złożony z szeregowo połączonych elementów RLC (rys. 1). Częstotliwość rezonansową obwodu balansującego dobiera się do częstotliwości jakie występują w napięciu wyjściowym jedynie w stanie niezbalansowania. Występujący w tym stanie prąd balansujący jest silnie pobudzany przez nawet niewielkie napięcie niezrównoważenia, co następnie wpływa na równoważenie napięć na kondensatorach falownika. Zjawiska te opisano w [6], [7].

Modulacja i naturalne równoważenie napięć wejściowych jednofazowego dwugałęziowego falownika napięcia z diodami poziomującymi



Rys. 2. Modulacja napięcia wyjściowego dwugałęziowego falownika napięcia z diodami poziomującymi umożliwiającą realizację naturalnego równoważenia napięć wejściowych. Kształt napięcia wyjściowego odzwierciedla przykładowy przypadek nierównoważenia napięć, gdzie $u_{C1} > u_{C2}$.



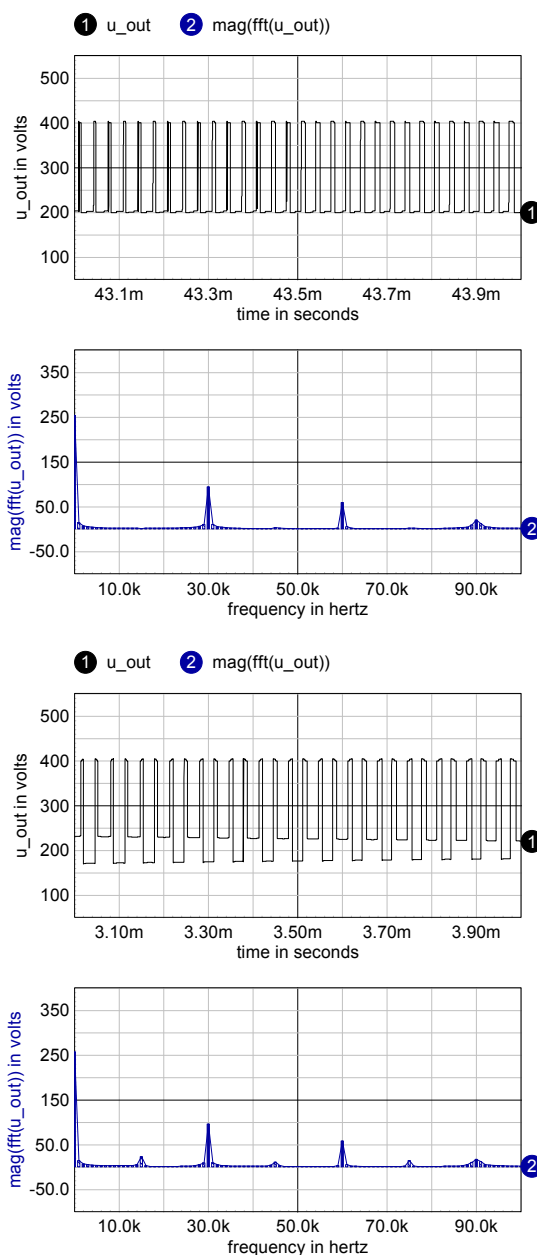
Rys. 3. Przebiegi sygnałów sterujących i napięcia wyjściowego dwugałęziowego falownika napięcia z diodami poziomującymi dla sterowania przedstawionego na rys. 2. Wyniki symulacyjne programu ICAP/4.

Dla naturalnego równoważenia napięć istotne jest, aby metoda modulacji spełniała następujące warunki:

- wzbudzenie zjawiska naturalnego równoważenia napięć przez wystąpienie w napięciu wyjściowym dodatkowej składowej o częstotliwości równej częstotliwości impulsowania pojedynczego tranzystora jeśli $U_{C1avg} \neq U_{C2avg}$.
- w prądzie kondensatorów wejściowych również wystąpią składowe o częstotliwości impulsowania łącznika, co powinno spowodować sprowadzenie średnich wartości napięć do równego poziomu.

Poprawę jakości zasilania napięcia wyjściowego w omawianym falowniku można uzyskać przez zwiększenie częstotliwości składowych i impulsowych w napięciu wyjściowym oraz minimalizację wartości składowych zmiennych wysokich częstotliwości.

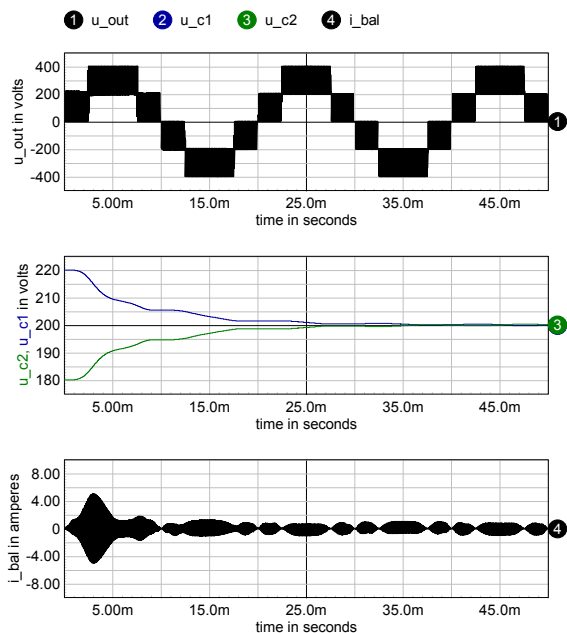
Dla spełnienia powyższych warunków optymalne wydaje się być sterowanie przedstawione w [7], gdzie modulację dwugałęziowego falownika realizowano zgodnie z zasadą przedstawioną na rys. 2, oraz rys. 3.



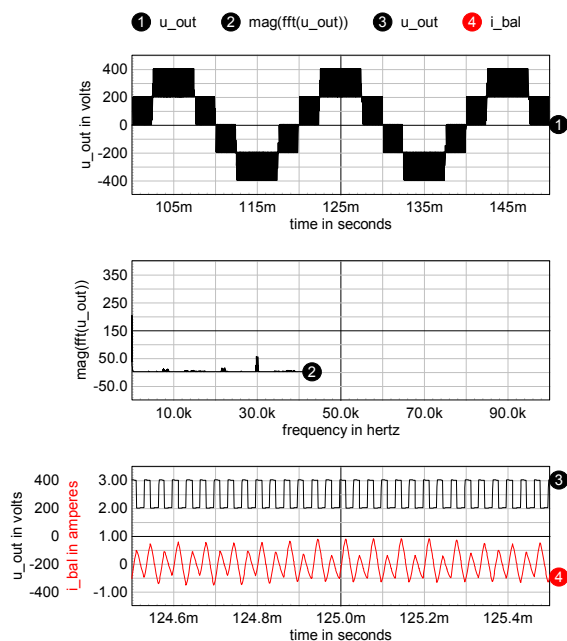
Rys. 4. Przebiegi napięcia wyjściowego i spektrum w przypadku zrównoważenia i nierównoważenia napięć dwugałęziowego falownika napięcia z diodami poziomującymi (rys. 1). Częstotliwość impulsowania $f_{SW} = 15\text{kHz}$.

Realizacja modulacji przedstawionej na rys. 2 skutkuje, w stanie nierównoważenia napięć wejściowych, pojawieniem się w napięciu wyjściowym składowej o częstotliwości impulsowania łącznika. Na rys. 4 przedstawiono przebiegi napięcia wyjściowego i spektrum w przypadku zrównoważenia i nierównoważenia napięć w falowniku dwugałęziowym z diodami poziomującymi (rys. 1).

Skuteczność działania obwodu balansującego przedstawiono na przykładzie przebiegów z rys. 5, gdzie nieobciążony falownik rozpoczynał impulsowanie w warunkach nierównoważenia napięć ($u_{C1}=220V$, $u_{C2}=180V$). Przepływ prądu balansującego (w obwodzie RLC: 2.35Ω , $1.65mH$, $68nF$ - rys. 1) spowodował redukcję stanu nierównoważenia napięć w czasie porównywalnym z jednym okresem napięcia wyjściowego.



Rys. 5. Start dwugałęziowego falownika z diodami poziomującymi (rys. 1) z warunków nierównoważenia napięć wejściowych.

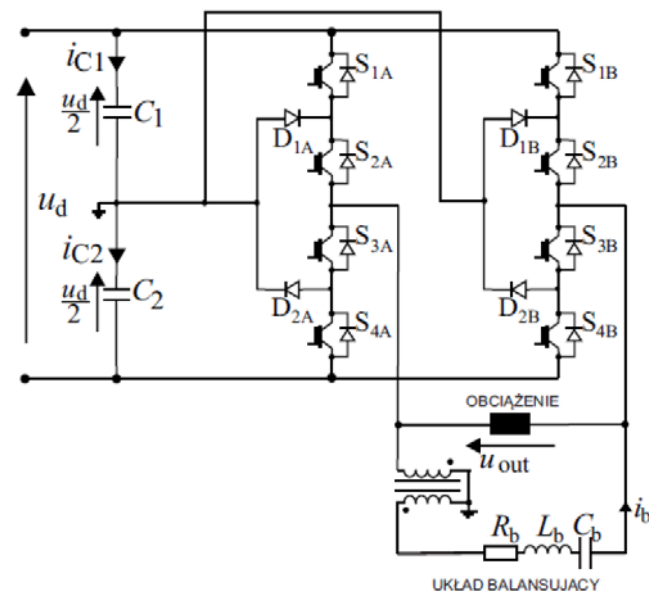


Rys. 6. Przebiegi napięcia wyjściowego i prądu obwodu balansującego oraz spektrum napięcia wyjściowego w stanie ustalonym w przypadku zrównoważenia napięć w dwugałęziowym falowniku napięcia z diodami poziomującymi (rys. 1).

Dołączenie obwodu balansującego do napięcia wyjściowego w falowniku dwugałęziowym z diodami poziomującymi (rys. 1) powoduje przepływ prądu w stanie nierównoważenia napięć, ale również w stanie zrównoważenia. W stanie zrównoważenia napięć w napięciu wyjściowym występuje częstotliwość dwukrotnie wyższa (30kHz) oraz wielokrotnie niższa (50Hz lub 60Hz) od częstotliwości rezonansowej obwodu balansującego. Jednak, dla tych częstotliwości również płynie prąd obwodu balansującego powodując niezależnie od obciążenia straty energii i obciążenie elementów układu (rys. 6), co jest niekorzystnym aspektem takiego rozwiązania.

Jednofazowy trójpoziomowy falownik dwugałęziowy z diodami poziomującymi z obwodem balansującym o zredukowanych stratach w stanie zrównoważenia napięć

Redukcję prądu obwodu balansującego w stanie zrównoważenia wartości napięć wejściowych można uzyskać przez modyfikację obwodu balansującego, oraz modulacji. Na rys. 7 przedstawiono jednofazowy dwugałęziowy falownik z diodami poziomującymi z obwodem balansującym z transformatorem. Obwód taki wykorzystano do równoważenia napięć w systemach falowników równoległych [6].



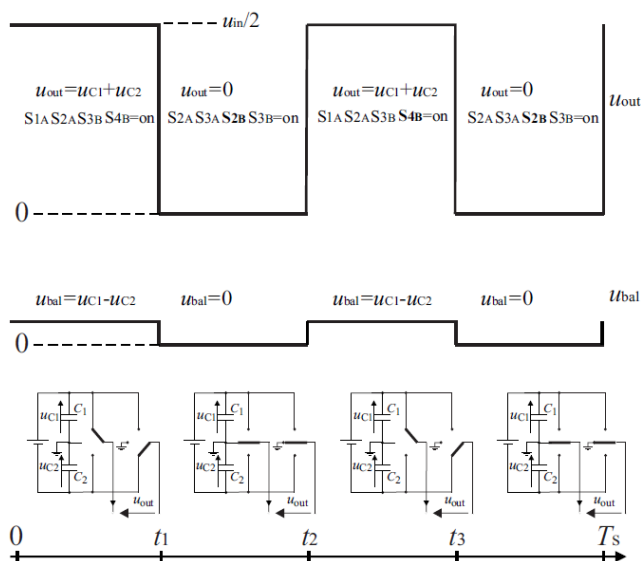
Rys. 7. Jednofazowy trójpoziomowy falownik dwugałęziowy z diodami poziomującymi z obwodem balansującym z transformatorem.

Na rys. 7 przedstawiono sposób modulacji w jednofazowym dwugałęziowym falowniku napięcia z diodami poziomującymi z obwodem balansującym z transformatorem, którego cel jest następujący:

- w stanie nierównoważenia napięć wejściowych w napięciu elementów RLC obwodu balansującego występuje napięcie o częstotliwości impulsowania i płynie prąd obwodu balansującego,
 - w stanie zrównoważenia, występuje zerowe napięcie obwodu RLC w obwodzie balansującym i nie płynie prąd.
- Taki sposób modulacji pozbawia falownika dwóch korzystnych właściwości jakimi są:
- zwiększenie częstotliwości składowych impulsowych w napięciu wyjściowym,
 - zmniejszenie wartości p-p składowych impulsowych w napięciu wyjściowym.

Jednak układ falownika wciąż posiada zredukowane napięcie na łącznikach półprzewodnikowych.

Na rys. 8 przedstawiono sposób modulacji bipolarnej w jednofazowym dwugłęziowym falowniku napięcia z diodami poziomującymi z obwodem balansującym z transformatorem.



Rys.8. Modulacja napięcia wyjściowego jednofazowego dwugłęziowego falownika napięcia z diodami poziomującymi z obwodem balansującym z transformatorem umożliwiającą realizację naturalnego równoważenia napięć wyjściowych. Kształt napięcia balansującego odzwierciedla przykładowy przypadek nierównoważenia napięć, gdzie $u_{C1} > u_{C2}$.

Realizując modulację przedstawioną na rys. 8 w napięciu wyjściowym naprzemiennie z wartością $u_{out}=0$ występuje napięcie:

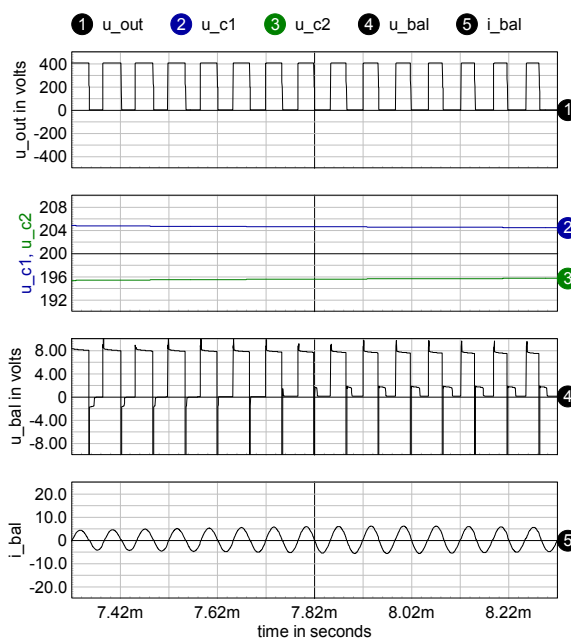
- (1) $u_{out}=u_{C1}+u_{C2}$,
- (2) $u_{out}=-u_{C1}-u_{C2}$

W napięciu obwodu balansującego naprzemiennie z wartościami zerowymi występują wartości:

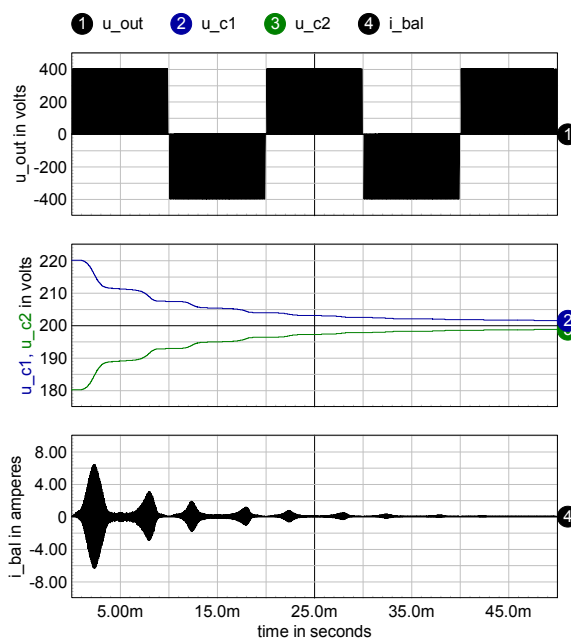
- (3) $u_{bal}=u_{C1}-u_{C2}$
- (4) $u_{bal}=-u_{C1}+u_{C2}$

Jeżeli w falowniku występuje stan zrównoważenia napięć wejściowych to napięcie obwodu balansującego jest zerowe. W przeciwnym przypadku w napięciu obwodu balansującego występują impulsy o częstotliwości impulsowania.

Na rys. 9 przedstawiono przebiegi w falowniku w stanie ustalonym, dla układu ze zrównoważonymi napięciami na kondensatorach wejściowych oraz nierównoważonymi. Z przebiegów tych wynika, że w proponowanej metodzie w stanie ustalonym występuje dodatkowa składowa prądu balansującego o częstotliwości impulsowania łączników. Składowa ta dodaje się do prądu obciążenia zwiększając szybkość równoważenia napięć, a także zapewniając możliwość naturalnego równoważenia napięć niezależnie od obciążenia. Przebiegi przedstawione na rys. 10 potwierdzają efektywność naturalnego równoważenia wartości napięć wejściowych w falowniku z obwodem balansującym z transformatorem. Przebiegi te (rys. 10) obrazują przypadek startu modulacji falownika w warunkach nierównoważenia napięć wejściowych ($u_{C1}=220V$, $u_{C2}=180V$).



Rys. 9. Przebiegi napięcia wyjściowego, napięć na kondensatorach wejściowych i napięcia balansującego RLC oraz prądu balansującego w przypadku nierównoważenia napięć w jednofazowym dwugłęziowym falowniku napięcia z diodami poziomującymi z obwodem balansującym z transformatorem (rys. 7). Wyniki symulacyjne programu ICAP/4.



Rys. 10. Przebiegi napięcia wyjściowego, napięć na kondensatorach wejściowych i napięcia obwodu balansującego RLC oraz prądu balansującego w przypadku nierównoważenia napięć w jednofazowym dwugłęziowym falowniku napięcia z diodami poziomującymi z obwodem balansującym z transformatorem. Wyniki symulacyjne programu ICAP/4.

W rozwiązaniu gdzie uzwojenie transformatora dołączone jest pomiędzy fazą falownika a punktem NP może wystąpić przepływ niepożądanego prądu magnesującego w wyniku wystąpienia niesymetrii napięć fazy falownika. W dalszych badaniach należy rozważyć rozdzielanie pojemności obwodu balansującego na strony

pierwotną i wtórną transformatora w celu blokowania składowych stałych napięć gałęzi falownika.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono problem realizacji naturalnego zrównoważenia napięć na kondensatorach wejściowych w jednofazowym trójpoziomowym falowniku dwugałęziowym z diodami poziomującymi. Przedstawiono dwie koncepcje realizacji naturalnego zrównoważenia napięć. W obu przypadkach można wykorzystać dodatkowy obwód balansujący. W proponowanej nowatorskiej koncepcji obwód balansujący jest zmodyfikowany w stosunku do znanej w literaturze topologii szeregowej RLC. W nowym rozwiązaniu zastosowano transformator uzyskując zniesienie składowych prądów występujących w stanie zrównoważenia napięć. Obwód balansujący z transformatorem staje się mniej stratny niż w alternatywnym rozwiązaniu obwodu RLC w stanie zrównoważenia napięć, zapewniając równocześnie efektywność redukcji stanu niezrównoważenia napięć wejściowych.

LITERATURA

- [1] Rodriguez J., Bernet S., Steimer P., Lizama I., A Survey on Neutral Point Clamped Inverters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57 (July 2010), 2219-2230
- [2] Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L.G., Wu B., Rodriguez J., Pérez M.A., Leon J. I., Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57 (August 2010), 2553-2580
- [3] Franquelo L. G., Rodríguez J., Leon J. I., Kouro S., Portillo R., Prats M. A.M., The age of multilevel converters arrives, *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 2 (June 2008), 28-39
- [4] Krug D., Bernet S., Fazel S. Saeed, Jalili K., Malinowski M., Comparison of 2.3-kV Medium-Voltage Multilevel Converters for Industrial Medium-Voltage Drives, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 54 (Dec. 2007), 2979-2992
- [5] Rodríguez J., Lai J.S., Peng F.Z., Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 49 (August 2002), 724-738
- [6] Stala R., A Natural DC-Link Voltage Balancing of Diode-Clamped Inverters in Parallel Systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60 (Nov. 2013), n.11, 5008,5018
- [7] Stala R.: Application of Balancing Circuit for DC-Link Voltages Balance in a Single-Phase Diode-Clamped Inverter With Two Three-Level Legs, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58, no. 9 (Sept. 2011), 4185,4195
- [8] Hasegawa K., Akagi H., A New DC-Voltage-Balancing Circuit Including a Single Coupled Inductor for a Three-Level Diode-Clamped PWM Inverter, *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE. IEEE*, 20-24 (Sept. 2009), 2153-2159.
- [9] Shukla A., Ghosh A., Joshi A., Flying Capacitor Based Chopper Circuit for DC Capacitors Voltage Balancing in Diode-Clamped Multilevel Inverter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57 (July 2010), 2249-2261
- [10] Ashaibi A.A., Finney S.J., Williams B.W., Massoud A., Extend the Use of Auxiliary Circuit to Start up, Shut down, and Balance of the Modified Diode Clamped Multilevel Inverter, *Power Electronics and Drive Systems, PEDS '07. 7th International Conference on*, 27-30 (Nov.2007), 1049 – 1053
- [11] Mouton H. du Toit, Natural Balancing of Three-Level Neutral-Point Clamped PWM Inverters, *IEEE Trans. Ind. Electron.* vol. 49(Oct. 2002), 1017-1025
- [12] Busquets-Monge S., Alepuz S., Rocabert J., Bordonau J., Pulsewidth Modulations for the Comprehensive Capacitor Voltage Balance of n-Level Two-Leg Diode-Clamped Converters, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24 (August 2009), 1951-1959.
- [13] McGrath B.P., Holmes D.G., A General Analytical Method for Calculating Inverter DC-Link Current Harmonics, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 45, No. 5, September/October 2009.
- [14] Zaragoza J., Pou J., Ceballos S., Robles E., Jaen C., Corbalan M., Voltage-Balance Compensator for a Carrier-Based Modulation in the Neutral-Point-Clamped Converter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56 (Feb 2009), 305-314
- [15] Bouhali O., Francois B., Berkouk E.M., Saudemont C., DC Link Capacitor Voltage Balancing in a Three-Phase Diode Clamped Inverter Controlled by a Direct Space Vector of Line-to-Line Voltages, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22 (Sept. 2007), 1636-1648
- [16] Holtz J., Oikonomou N., Neutral Point Potential Balancing Algorithm at Low Modulation Index for Three-Level Inverter Medium-Voltage Drives, *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, vol. 43, May/June 2007.
- [17] Busquets-Monge S., Bordonau J., Boroyevich D., Somavilla S., The Nearest Three Virtual Space Vector PWM—A Modulation for the Comprehensive Neutral-Point Balancing in the Three-Level NPC Inverter, *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 2 (March 2004), 11-15
- [18] Leon J.I., Vazquez S., Portillo R., Franquelo L.G., Carrasco J.M., Wheeler P.W., Watson A.J., Three-Dimensional Feedforward Space Vector Modulation Applied to Multilevel Diode-Clamped Converters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, (Jan. 2009), 101-109
- [19] Kang D.W., Ma C.S., Kim T.J. Hyun D.S., Simple control strategy for balancing the DC-link voltage of neutral-point-clamped inverter at low modulation index, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 151 (Sept. 2004). 569-575
- [20] Yan K., Wang W., Zhu Z., lu Q., Study On Neutral-point Balancing For Three-level Space Voltage Vector Pulse-width modulation Inverter, *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 17-20 Oct. 2008, 1571-1576
- [21] Pou J., Zaragoza J., Rodríguez P., Ceballos S., Sala V., Burgos R., Boroyevich D., Fast-processing modulation strategy for the neutralpoint-clamped converter with total elimination of the low-frequency voltage oscillations in the neutral point, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54 (Aug. 2007), 2288–2299
- [22] Barros J. D., Silva J. F., Optimal Predictive Control of Three-Phase NPC Multilevel Converter for Power Quality Applications, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55 (Oct 2008), 3670-3681
- [23] Wang C., Li Y., Analysis and Calculation of Zero-Sequence Voltage Considering Neutral-Point Potential Balancing in Three-Level NPC Converters, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57 (July 2010), 2262-2271
- [24] Renge M.M., Suryawanshi H.M., Three-Dimensional Space Vector Modulation to Reduce Common-Mode Voltage for Multilevel Inverter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57 (July 2010), 2324-2331
- [25] Zhi Z., Yun-xiang X., Wei-ping H., Jiang-yuan L., Lin C., A New SVPWM Method for Single-phase Three-level NPC Inverter and the Control Method of Neutral Point Voltage Balance, *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on*, 1 – 4
- [26] Lewicki A., Krzeminski Z., Abu-Rub H., Space-Vector Pulsewidth Modulation for Three-Level NPC Converter With the Neutral Point Voltage Control, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58 (Nov. 2011), n.11, 5076-5086
- [27] Meynard T.A., Foch H., Thomas P., Courault J., Jakob R., Nahrstaedt M., Multicell Converters: Basics Concepts and Industry Applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 49 (Oct. 2002), 955-964
- [28] Meynard T.A., Foch H., Forest F., urpinC. T, Richardeau F., Delmas L., Gateau G., Lefeuvre T.A., Multicell Converters: Derived Topologies, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 49 (Oct. 2002), 978-987
- [29] Wilkinson R.H., Meynard T.A., Mouton H. du Toit, Natural Balance of Multicell Converters: The Two-Cell Case, *IEEE Trans. Power Electron.* 21 (Nov. 2006), 1649 - 1657
- [30] Pirog S., Stala R., Selection of Parameters for a Balancing Circuit of DC-DC and AC-AC Multicell Converters. *11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2005)*, 11-14 September 2005 – Dresden, Germany
- [31] Stala R., Pirog S., Baszynski M., Mondzik A., Penczek A., Czekonski J., Gasiorek S., Results of Investigation of Multicell Converters With Balancing Circuit—Part I, *IEEE Trans. On Ind. Electron.*, 56 (July 2009), 2610-2619
- [32] Stala R., Pirog S., Mondzik A., Baszynski M., Penczek A., Czekonski J., Gasiorek S., Results of Investigation of Multicell Converters With Balancing Circuit—Part II, *IEEE Trans. On Ind. Electron.*, 56 (July 2009), 2620-2628

- [33] Stala R.: The Switch-Mode Flying Capacitor DC/DC Converters With Improved Natural Balancing, *IEEE Trans. Ind. Electron., IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 57 (April 2010), 1369-1382
- [34] McGrath B.P., Holmes D.G., Natural Capacitor Voltage Balancing for a Flying Capacitor Converter Induction Motor Drive, *IEEE Trans. Power Electronics*, 24 (June 2009), 1554-1561
- [35] Piróg S., Baszyński M., Jednofazowy, trójkomórkowy przekształtnik AC/DC z sinusoidalnym prądem linii zasilającej, Część 1, *Przegląd Elektrotechniczny*; 85 (2009), nr 3, 42–47
- [36] Piróg S., Baszyński M., Jednofazowy, trójkomórkowy przekształtnik AC/DC z sinusoidalnym prądem linii zasilającej, Część 2, *Przegląd Elektrotechniczny*; 85 (2009), nr 4, 116–121
- [37] Piróg S., Baszyński M., Modelling a single phase multicell DC/AC inverter using FPGA, *Przegląd Elektrotechniczny* ISSN 0033-2097, (2008), nr 2, 84-87
- [38] Baszyński M., Mondzik A., Realizacja układu trójkomórkowego falownika napięcia, *SENE 2007: VIII krajowa konferencja naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym*, Łódź, 21–23 listopada 2007
- [39] M. Baszyński, A. Mondzik, Wielokomórkowy falownik napięcia oparty o strukturę przekształtnika DC/DC, *Przegląd Elektrotechniczny*; ISSN 0033-2097, (2007), nr 6, 71-74
- [40] Piróg S., Baszyński M., Czekoński J., Gąsiorek S., Mondzik A., Stala R., Wielokomórkowy falownik napięcia: realizacja praktyczna, *Przegląd Elektrotechniczny*; ISSN 0033-2097, (2008), nr 4, 47–53
- [41] Stala R., Mondzik A., A study of the balancing process in multicell ac/ac converter, *Przegląd Elektrotechniczny*; ISSN 0033-2097, (2009), nr 7, 168–172
- [42] Stala R., Mondzik A., Experimental study of a multicell AC/AC converter balancing circuit, *13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008*: September 1 – 3 2008, Poznań-Polska.
- [43] Stala R., Mondzik A., Naturalny balans w przekształtniku wielokomórkowym AC-AC: realizacja praktyczna, *SENE 2007: VIII krajowa konferencja naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym*, Łódź, 21–23 listopada 2007.
- [44] Stala R., Mondzik A., Trójpoziomowy przekształtnik komórkowy AC-AC, *SENE 2007: VIII krajowa konferencja naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym*, Łódź, 21–23 listopada 2007.
- [45] Stala R.: Individual MPPT of Photovoltaic Arrays with Use of Single-Phase Three-Level Diode-Clamped Inverter, *International Symposium on Industrial Electronics IEEE ISIE 2010*, 4-7 July 2010, Bari, Italy, 3456-3462.
- [46] Stala R., Wysokosprawny obwód balansujący w jednofazowym trójpoziomowym falowniku dwugałęziowym z diodami poziomującymi, *SENE 2013: XI krajowa konferencja naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym*, Łódź, 20–22 listopada 2013.

Autor: dr hab. inż. Robert Stala, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przekształcania Energii, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: stala@agh.edu.pl