

Trójfazowe mostki diodowe z pasywnym obwodem dla przepływu trzeciej harmonicznej

Streszczenie. W artykule omówiono topologię trójfazowego mostka diodowego z pasywnym obwodem dla przyływu trzeciej harmonicznej wraz z procedurą doboru wartości poszczególnych elementów. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych z uwzględnieniem indukcyjności sieci zasilającej przy mocy uzasadniającej trójfazowe zasilanie. Wykazano trudności z zastosowaniem praktycznym układu.

Abstract. The paper presents the typology of a three phase bridge diode rectifier with a passive current injection network. It describes the procedure for the choice of particular elements in the system. It presents simulation results taking into account the inductance of supply network at powers which justify the use of three-phase power supply. It also analyzes problems concerning practical application of the system. (**Three phase rectifier with passive current injection network**).

Słowa kluczowe: trójfazowy mostek diodowy, trzecia harmoniczna.

Keywords: three phase rectifier, current injection network.

Wstęp

Zasilanie energią elektryczną odbiorników średniej mocy odbywa się najczęściej z trójfazowej sieci zasilającej poprzez prostownik diodowy w układzie mostkowym, gdy wymagane jest stałe napięcie zasilające. Prostota i mała liczba elementów układu przekłada się na dużą sprawność oraz niezawodność. Jednak kształt prądu pobieranego przez taki prostownik wymuszony procesem przewodzenia diod odbiega znacznie od sinusoidalnego przyczyniając się tym samym do odkształcenia napięcia w sieci zasilającej o określonej impedancji wyjściowej. Stopień odkształcenia napięcia jest przede wszystkim zależny od indukcyjności sieci, która jednocześnie stanowiąc filtr wpływa na stopień odkształcenia prądu. W tabeli nr:1 zestawione są względne wartości amplitud istotnych harmonicznych w prądzie wejściowym prostownika oraz wartości współczynnika THD(z ang. Total Harmonic Distortion) dla tego prądu przy różnych wartościach indukcyjności sieci L_s .

Tabela 1. Stopień odkształcenia prądu wejściowego trójfazowego prostownika diodowego w zależności od indukcyjności sieci zasilającej.

Numer harmonicznej	5	7	11	13	17	19	THDi [%]
$L_s = 0\text{mH}$	0,200	0,143	0,091	0,077	0,059	0,053	28,4
$L_s = 0,5\text{mH}$	0,195	0,129	0,074	0,057	0,036	0,030	25,6
$L_s = 1\text{mH}$	0,89	0,118	0,060	0,043	0,022	0,015	23,6
$L_s = 2\text{mH}$	0,175	0,100	0,039	0,025	0,013	0,011	20,8
$L_s = 3\text{mH}$	0,161	0,086	0,027	0,017	0,012	0,010	18,6

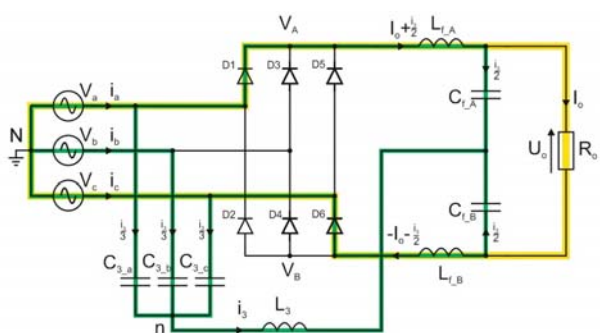
Prąd wejściowy prostownika nie posiada harmonicznych wielokrotnych trzem. Rozkładając na składowe harmoniczne napięcie wyjściowe grupy anodowej i katodowej prostownika (napięcie V_{AN} i V_{BN} na rys:1) możemy zauważyć, że trzecie harmoniczne i ich nieparzyste wielokrotności są ze sobą w fazie i mają równe amplitudy. Stąd jak wykazano w literaturze [1-12] kształt prądu pobieranego przez diodowy prostownik mostkowy wynika z braku możliwości przepływu wyższych harmonicznych prądu wielokrotnych trzem poprzez obciążenie. Wprowadzenie dodatkowego obwodu, tworzącego obwód rezonansowy dla wymuszenia przepływu harmonicznych prądu wielokrotnym trzem w układach wielofazowych zaproponowano w pracy [1], następnie uogólniono w pracy [2]. Temat dalej był rozwijany w pracach [3,4]. Do dalszego rozwoju zagadnienia przyczynili się między innymi autorzy w pracach [5,7,9,10,11,12]. W pracy [6] autor proponuje

zastosowanie transformatora, którego zadaniem jest zmiana amplitudy trzeciej harmonicznej i dodatkowo odzyskiwanie energii niesionej przez tą harmoniczną. Jednak wyniki badań eksperymentalnych prezentowanych w literaturze dotyczą przekształtników o stosunkowo niewielkiej mocy rzędu 1-2kW, gdy trójfazowe zasilanie dotyczy raczej układów większej mocy. Ponadto literatura omawiając istotę rozwiązania wprowadza analizę teoretyczną przy zaniedbaniu indukcyjności sieci zasilającej. Praktycznie użyteczną konfigurację układu prezentowaną na rysunku 1 zaproponowano w pracach [5,6].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań symulacyjnych obrazujących wpływ różnych wartości indukcyjności sieci na pracę układu zasilanego trójfazowo przy wybranych mocach odbiornika. Wyniki symulacji w programie PSpice poprzedzone będą dyskusją dotyczącą właściwego doboru elementów.

Dodatkowy pasywny obwód dla przepływu trzeciej harmonicznej prądu

Dodatkowy obwód z sprzężeniem pojemnościowym prezentowany w pracy [5] dla którego przeprowadzono symulacje jest przedstawiony na rysunku 1.



Rys 1. Układ trójfazowego mostka diodowego z pasywnym obwodem dla przepływu trzeciej harmonicznej prądu

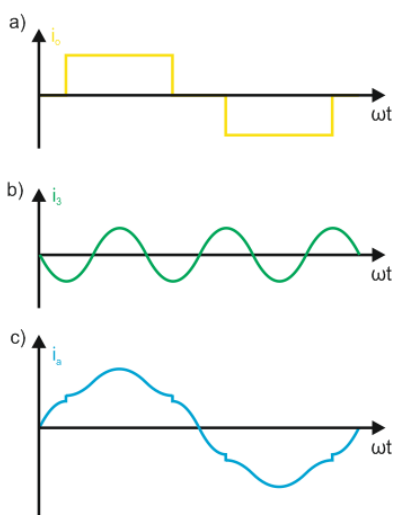
Prąd pobierany z sieci w takim układzie zawiera dwie składowe. Pierwsza z nich to składowa wymuszona poprzez prąd obciążenia prostownika diodowego w czasie, gdy przewodzi jedna z diod podłączonych do danej fazy. Drogę tej składowej w wybranej chwili czasowej wyróżniono kolorem żółtym. Drugą składową stanowi prąd trzeciej harmonicznej płynący w dodatkowym obwodzie. Drogę tej składowej w wybranej chwili czasowej wyróżniono kolorem

zielonym. Składowa ta przyjmuje dwie wartości w zależności od trybu przewodzenia diod podłączonych do danej fazy. W przypadku, gdy żadna z diod nie przewodzi wartość tej składowej równa jest jednej trzeciej prądu trzeciej harmonicznej. Natomiast, gdy któraś z diod przewodzi składowa ta równa jest jednej szóstej prądu trzeciej harmonicznej. Powyższe rozważania można ująć równaniami (1).

$$(1) \quad i_a = \begin{cases} \frac{i_3}{3} & \text{gdy D1/D2 nie przewodzą} \\ I_o - \frac{i_3}{6} & \text{gdy D1 przewodzi} \\ -I_o - \frac{i_3}{6} & \text{gdy D2 przewodzi} \end{cases}$$

gdzie: i_a – prąd pobierany z fazy, i_3 – prąd trzeciej harmonicznej, I_o – prąd obciążenia.

W wyniku złożenia dwóch składowych otrzymujemy prąd pobierany z sieci zasilającej. Kształt tego prądu wraz ze składowymi został przedstawiony na rysunku 2.



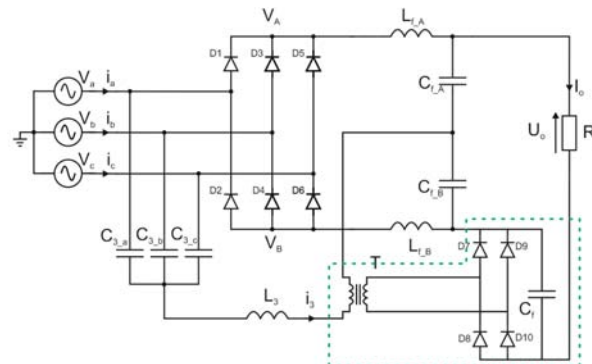
Rys. 2. a) Przebieg prądu obciążenia pobierany z fazy, b) Przebieg prądu trzeciej harmonicznej, c) Prąd pobierany z fazy

Rozkładając przebieg prądu z rysunku 2c na składowe harmoniczne i wyznaczając wartość współczynnika zniekształcenia prądu THD można dowiedzieć[5], że optymalną wartość wynoszącą 5.125% uzyskuje się w ogólnym przypadku, gdy wartość skuteczna trzeciej harmonicznej jest równa wartości prądu obciążenia oraz występuje rezonans dla trzeciej harmonicznej napięcia. Jednak wraz ze zmianami mocy odbiornika zmienia się również wartość prądu płynącego przez obciążenie w następstwie czego stosunek przy którym uzyskuje się najmniejsze zniekształcenie prądu pobieranego z sieci zasilającej nie jest zachowany. Kiedy wartość prądu obciążenia zmniejszy się na tyle, że będzie mniejsza od jednej drugiej amplitudy prądu trzeciej harmonicznej układ przejdzie w tryb pracy przewodzenia nieciągłego. Jest to sytuacja bardzo nie korzystna, ponieważ prąd w indukcyjności filtrującej zostaje gwałtownie przerywany co w efekcie prowadzi do pojawienia się na zaciskach mostka diodowego krótkotrwałych impulsów napięciowych o dużej amplitudzie mogących doprowadzić do uszkodzenia diod.

Dostosowanie amplitudy trzeciej harmonicznej do zmiennych warunków obciążenia przy jednoczesnym przekazaniu przenoszonej energii do odbiornika jest

możliwe przez wprowadzenie dodatkowego transformatora W pracy[6,12] autor proponuje zastosowanie transformatora, który umożliwi zmianę amplitudy trzeciej harmonicznej prądu wraz ze zmianami wartości prądu obciążenia.

W tym artykule analizowany jest układ przedstawiony na rys.3, gdzie pomocniczy obwód do odzyskiwania energii został zaznaczony zieloną przerywaną linią.



Rys. 3. Układ trójfazowego mostka diodowego z pasywnym obwodem dla przepływu trzeciej harmonicznej prądu i transformatorem

Warunki doboru elementów układzie.

Transformator pomocniczy:

Wyjścia obu układów prostownikowych, głównego-trójfazowego oraz pomocniczego-jednofazowego są połączone szeregowo. Napięcia wyjściowe prostowników sumują się stanowią napięcie wyjściowe układu, Prądy wyjściowe prostowników są tożsame równe prądowi obciążenia I_o . Prąd wejściowy prostownika pomocniczego wymuszony przez trzecią harmoniczną prądu pozostaje równy I_3/k_T , gdzie k_T – przekładnia transformatora. Zależność pomiędzy amplitudą prądu zasilającego prostownik pomocniczy a wartością średnią prądu wyjściowego tego prostownika ma postać: $\sqrt{2} I_3/k_T = \pi/2 I_o$. Biorąc pod uwagę warunek pracy optymalnej [5]: $I_3 = I_o$, możemy określić przekładnię transformatora $k_T = 2\sqrt{2}/\pi$.

Kondensatory: C_{fA}, C_{fB} :

Są to elektrolityczne kondensatory filtrujące prostownika głównego, wartość ich pojemności warunkuje dopuszczalna wartość tętnień w napięciu wyjściowym. Jednocześnie muszą one przewodzić składową przemienną prądu o wartości $I_3/2$ co warunkuje minimalną wartość ich pojemności. Ze względu na ograniczenie tętnień w napięciu wyjściowym ich pojemności są na tyle duże, że nie są istotne w określaniu częstotliwości rezonansowej obwodu pomocniczego, gdyż są szeregowo połączone z kilkadziesiąt krotnie mniejszymi pojemnościami sprzęgającymi C_{3a}, C_{3b}, C_{3c} .

Kondensatory: C_{3a}, C_{3b}, C_{3c} :

Są to kondensatory sprzęgające, które wraz z indukcyjnością rozproszenia transformatora pomocniczego L_r oraz równoległe połączonymi dławikami L_{fA} i L_{fB} oraz C_{fA} i C_{fB} decydują o częstotliwości rezonansowej obwodu pomocniczego. Mała wartość pojemności tych kondensatorów z powodu dużej reaktancji wymusza wysokie napięcia na tych elementach.

Z kolei zbyt duża wartość tych pojemności powoduje przepływ znacznych prądów pojemnościowych pomiędzy fazami źródła. Amplituda tego prądu winna być kilkanaście razy mniejsza od amplitudy pierwszej harmonicznej prądu pobieranego przez prostownik.

Kondensator C_f .

Jest to kondensator filtrujący prostownika pomocniczego, jego pojemność winna zapewnić tętnienia napięcia wyjściowego porównywalne do tętnień prostownika głównego. Stąd wartość jego pojemności wypada większa od pojemności kondensatorów C_{f_A}, C_{f_B} .

Parametry symulowanego układu.

Napięcie zasilające - $V_s = 230V$, stąd średnie napięcie wyjściowe prostownika głównego - $538V$, a średnie napięcie wyjściowe prostownika pomocniczego - $46V$, stąd całkowite napięcie wyjściowe $V_o \sim 580V$. Rezystancja obciążenia $R_o = 10\Omega$ co jest równoważne mocy obciążenia $\sim 33kW$. Kondensatory sprzęgające $C_{3a} = C_{3b} = C_{3c} = 40\mu F$ (amplituda międzyfazowych prądów pojemnościowych - $4.2A$ przy amplitudzie podstawowej harmonicznnej prądu wejściowego - $69A$). Łączna niezbędna indukcyjność obwodu rezonansowego (indukcyjność równoległe połączonych dławików L_{f_A} i L_{f_B} plus indukcyjność rozproszenia transformatora) - $20mH$. Pojemności filtrujące $C_{1A} = C_{1B} = 1mF$ (tętnienia napięcia prostownika głównego - $1V$) $C_f = 20mF$ (tętnienia prostownika pomocniczego - $2V$).

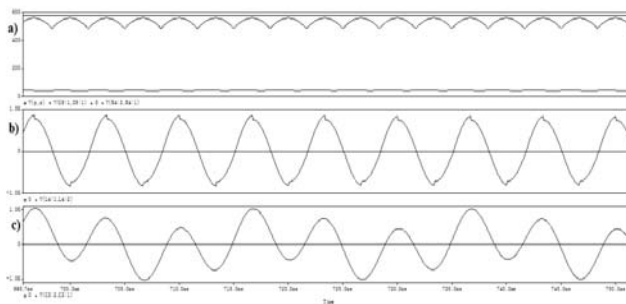
Wyniki badań symulacyjnych.

Na kolejnych rysunkach prezentowane są charakterystyczne przebiegi czasowe, zaś w tabeli 2 zamieszczone są wyniki symulacji dla różnych wartości indukcyjności sieci zasilającej.

Tabela 2 Stopień odkształcenia prądu wejściowego trójfazowego prostownika diodowego z dodatkowym obwodem dla przepływu trzeciej harmonicznnej w zależności od indukcyjności sieci zasilającej.

Numer harmonicznnej	5	7	11	13	17	19	THDi [%]
$L_s = 0mH$	0,032	0,011	0,016	0,015	0,012	0,011	4,35
$L_s = 0,5mH$	0,036	0,009	0,016	0,016	0,015	0,019	4,98
$L_s = 1mH$	0,042	0,011	0,021	0,030	0,066	0,015	8,85
$L_s = 2mH$	0,054	0,019	0,099	0,054	0,009	0,005	12,7
$L_s = 3mH$	0,057	0,010	0,026	0,008	0,002	0,012	6,36

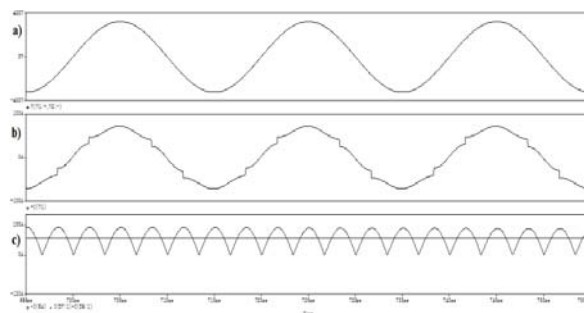
Rys.4 i rys.5 charakteryzują układ zasilany z sieci sztywniej ($L_s = 0$).



Rys.4 Przebiegi napięć ($L_s = 0$), a) napięcie wyjściowe układu, napięcie wyjściowe prostownika głównego, napięcie wyjściowe prostownika pomocniczego, b) napięcie na indukcyjności rezonansowej, c) napięcie na pojemności sprzęgającej.

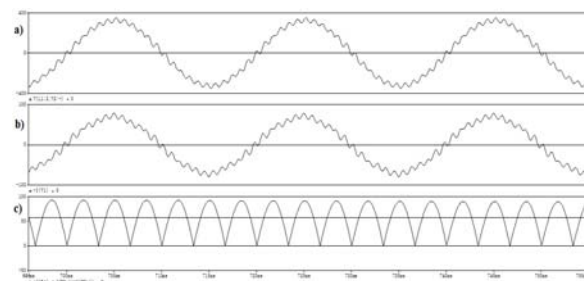
Przy pojemnościach sprzęgających $40\mu F$ napięcia na elementach obwodu rezonansowego są na poziomie $1kV$. Zwiększenie tych pojemności lub wzrost mocy układu skutkować będzie wzrostem tych napięć,

Prąd pobierany z sieci zawiera względne harmoniczne prezentowane w tabl.2 wraz z wartością współczynnika THD. Prąd ten nie powoduje odkształcenia napięcia sieci ze względu na $L_s = 0$.



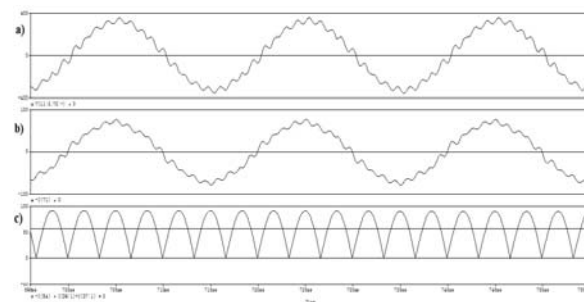
Rys.5 Przebiegi prądów $L_s = 0$, a) napięcie sieci, b) prąd wejściowy prostownika głównego, c) prąd wyjściowy prostownika pomocniczego oraz prąd obciążenia.

Na rys.6 pokazane są przebiegi przy indukcyjności sieci $L_s = 0.5mH$, a w tabeli 2 zestawione są względne wartości najważniejszych harmonicznnych oraz wartość THD. Ponieważ indukcyjność sieci wpływa na częstotliwość rezonansową obwodu pomocniczego, indukcyjności dławików filtrujących L_{1A} i L_{1B} zostały zmniejszone do wartości $19.8mH$. Współczynnik zniekształcenia napięcia dla tego przypadku wynosi: 1.84% .



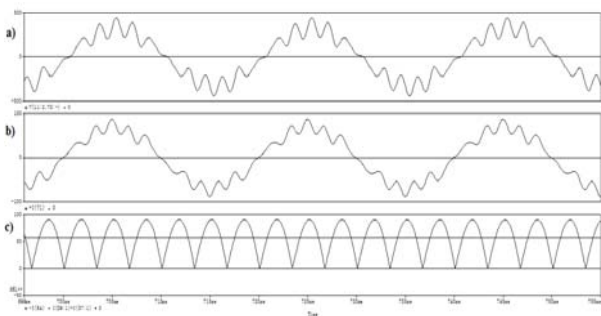
Rys.6 Przebiegi dla $L_s = 0.5mH$, a) napięcie sieci, b) prąd pobierany z sieci, c) prąd wyjściowy prostownika pomocniczego wraz z prądem obciążenia.

Na rys.7 pokazane są przebiegi przy indukcyjności sieci $L_s = 1mH$. Dla zachowania rezonansu indukcyjność dławików filtrujących została zmniejszona do wartości $L_{1A} = L_{1B} = 19.4mH$. W tab.2 widoczne jest znaczne powiększenie współczynnika THD prądu przy względnie największym wzroście 17-tej harmonicznnej. Wartość współczynnika THD w napięciu wynosi 8.42% .



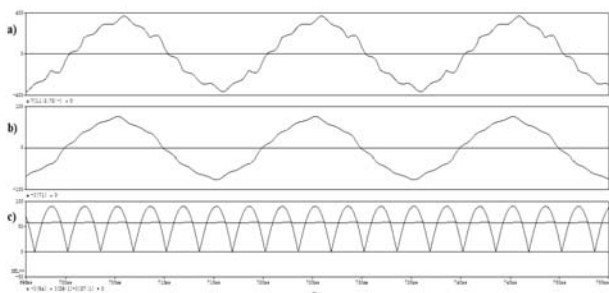
Rys.7 Przebiegi dla $L_s = 1mH$, a) napięcie sieci, b) prąd pobierany z sieci, c) prąd wyjściowy prostownika pomocniczego wraz z prądem obciążenia.

Dalsze powiększanie indukcyjności sieci powoduje wzrost stopnia zniekształcenia i przy indukcyjności $L_s = 2mH$ rys. 8 współczynnik THD prądu wyniesie 12.7% , gdy jego wartość w prostowniku bez obwodu pomocniczego wynosi 20.8% (tab.1). Współczynnik THD w napięciu w tym przypadku wynosi 17.9% .



Rys.8 Przebiegi dla $L_s=2\text{mH}$. a) napięcie sieci, b) prąd pobierany z sieci, c) prąd wyjściowy prostownika pomocniczego wraz z prądem obciążenia.

Jak wynika z tabeli 1 wzrost indukcyjności sieci do wartości $L_s=3\text{mH}$ powoduje zmniejszenie współczynnika THD w prądzie pobieranym przez prostownik z powodu jej właściwości filtracyjnych. Na rys.9 prezentowane są przebiegi symulacyjne przy tej indukcyjności. Wartości indukcyjności filtrujących L_{1A} i L_{1B} zostały zmniejszone do poziomu: 19.1mH . Współczynnik THD w prądzie zmalał do wartości: 6.36% , a współczynnik THD w napięciu do wartości: 8.79% .



Rys.9 Przebiegi dla $L_s=3\text{mH}$. a) napięcie sieci, b) prąd pobierany z sieci, c) prąd wyjściowy prostownika pomocniczego wraz z prądem obciążenia.

Kolejną kwestią jest fakt że przy stałej indukcyjności sieci współczynnik THD w prądzie może zmieniać się wraz z zmianą obciążenia przy stałej przekładni transformatora. Problem prezentują wyniki symulacji przy indukcyjności sieci $L_s=1\text{mH}$ i zmiennej rezystancji obciążenia w zakresie $10\Omega-50\Omega$ zamieszczone w tabeli 3.

Tabela 3 Stopień odkształcenia prądu wejściowego i napięcia wejściowego układu przy zmianie wartości obciążenia.

R_o	10	15	20	25	30	35	40	45	50
THDi [%]	8,85	10,3	11,05	12,0	13,4	14,6	14,3	12,5	10,7
THDu [%]	8,44	6,84	5,48	4,87	4,69	4,47	3,83	2,47	2,08

Przy stałej przekładni transformatora współczynnik zniekształcenia prądu rośnie wraz z odciążaniem układu, natomiast współczynnik zniekształcenia napięcia maleje, gdyż maleje wartość prądu wejściowego.

Odnosząc się do prezentowanych w artykule wartości THD napięcia trzeba mieć na uwadze, że dotyczą one sytuacji, gdy analizowany układ jest jedynym odbiornikiem sieci (moc źródła jest porównywalna z mocą odbiornika). W praktyce do sieci przyłączonych jest wiele odbiorników i możemy uznać, że jej moc jest nieograniczona. Dlatego stopień oddziaływania odbiornika na sieć określamy za pomocą stopnia odkształcenia pobieranego prądu i jego mocy, nie możemy jednak przy tym zaniedbywać indukcyjności sieci.

Wnioski

Przedstawione wyniki symulacji potwierdzają pozytywne cechy analizowanego układu dotyczące wzrostu napięcia wyjściowego i sprawności energetycznej układu. Potwierdzają też możliwość poprawy kształtu prądu pobieranego z sieci w określonym zakresie, zależnym od jej indukcyjności. Jednakże wpływ tej indukcyjności na częstotliwość rezonansową obwodu pomocniczego dla przepływu trzeciej harmonicznej prądu wymaga precyzyjnego doboru indukcyjności filtrujących prostownika głównego, co jest zasadniczą wadą tego rozwiązania. W przypadku braku informacji o wartości indukcyjności sieci optymalne zaprojektowanie układu pod kątem najkorzystniejszego współczynnika zniekształcenia prądu jest utrudnione. Przy tym koszt realizacji tego układu w porównaniu do oczekiwanych korzyści wydaje się ekonomicznie nieuzasadniony. Tłumaczy to dlaczego interesująca teoretycznie propozycja szeroko dyskutowana w literaturze nie znalazła dotychczas zastosowania w praktyce.

LITERATURA

- [1] B. M. Bird, J. F. Marsh, and P. R. McLellan, "Harmonic reduction In multiplex converters by triple-frequency current injection," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 116, no. 10, pp. 1730–1734, Oct. 1969.
- [2] A. Ametani, "Generalized method of harmonic reduction In a.c.–d.c. converters by harmonic current injection," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 119, no. 7, pp. 857–864, July 1972.
- [3] W. B. Lawrance and W. Mielczarski, "Harmonic current reduction in a three-phase diode bridge rectifier," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 39, pp. 571–576, Dec. 1992.
- [4] S. Kim, P. Enjeti, P. Packebush, and I. Pitel, "A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three-phase diode rectifier type utility interface," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 30, pp. 1557–1564, Nov./Dec. 1994.
- [5] Basil M. Saied and Hussein I. Zynal, "Minimizing Current Distortion of a Three-Phase Bridge Rectifier Based on Line Injection Technique IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 21, NO. 6, NOVEMBER 2006"
- [6] Predrag Pejović, "Two Three-Phase High Power Factor Rectifiers that Apply the Third Harmonic Current Injection and Passive Resistance Emulation," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 6, pp. 1228–1240, November 2000.
- [7] Predrag Pejović, and Žarko Janda, "An Improved Current Injection Network for Three-Phase High Power Factor Rectifiers that Apply the Third Harmonic Current Injection," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, April 2000.
- [8] Predrag Pejović, and Žarko Janda, "An Analysis of Three-Phase Low-Harmonic Rectifiers Applying the Third Harmonic Current Injection," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 3, pp. 397–407, May 1999.
- [9] Žarko Janda, and Predrag Pejović, "A High Power Factor Three Phase Rectifier Based on Adaptive Current Injection Applying Buck Converter," Power Electronics and Motion Control, PEMC'00, Košice, pp. 3.140–3.144, September 2000.
- [10] Predrag Pejović, "Three-Phase High Power Factor Rectifier Based on the Third Harmonic Current Injection with Passive Resistance Emulation," Power Electronics Specialists Conference, PESC'00, Galway, pp. 1342–1347, June 2000.
- [11] Hadi Y. Kanaan and Kamal Al.-Haddad, "Three-Phase Current-Injection Rectifier: Competitive Topologies for Power Factor Correction" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 6, September 2012.
- [12] Predrag Pejović "Three-Phase Diode Rectifier with Low Harmonics" Springer

Autorzy: prof. dr hab. inż. Tadeusz Citko, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: t.citko@pb.edu.pl;
mgr inż. Kamil Borkowski, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, E-mail: borkowski_kamil@interia.pl