

Prostownik niesterowany 36-pulsowy

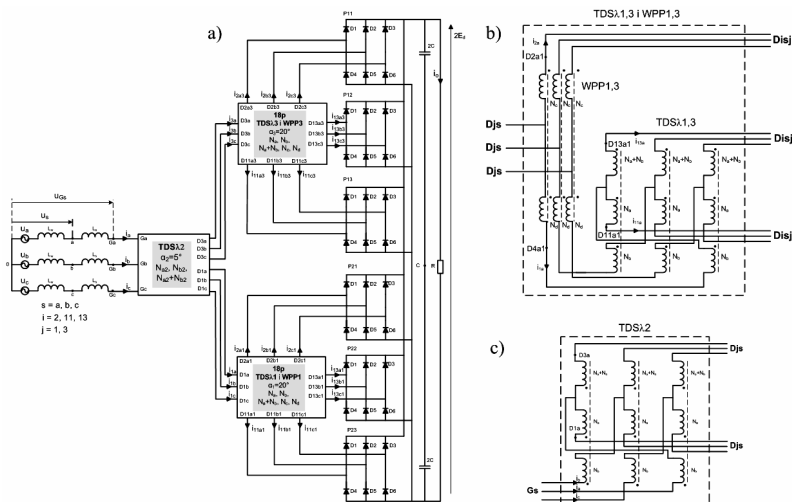
Streszczenie: W artykule omówiono działanie oraz wybrane rezultaty badań eksperymentalnych 36-pulsowego beztransformatorowego przekształtnika AC-DC. Do realizacji przekształtnika stosuje się trójfazowe dławiki sprzężone o mocy gabarytowej znacznie mniejszej niż odpowiednich transformatorów wielozwojowych. Zastosowanie układów magnetycznie sprzężonych pozwala przy tym znacznie zredukować odkształcenia prądu pobieranego z sieci w różnych warunkach zasilania, co prowadzi do tzw. warunków CPC przetwarzania energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: przekształtniki wielopulsowe, prostowniki diodowe, dławiki sprzężone, układy kondycjonowania energii elektrycznej

Opis i zasada działania układu

W przypadku, gdy aplikacja prostownika wielopulsowego wymaga spełnienia bardziej rygorystycznych warunków, dotyczących zawartości harmonicznnych, niż może zapewnić opisany w [1, 2, 3, 4] prostownik 24-pulsowy, istnieje możliwość racjonalnej syntezy prostownika 36-pulsowego, z wykorzystaniem wersji λ połączeń uzwojeń, zastosowanych w układzie 12-pulsowym [3, 4, 5, 6] oraz w przedstawionym w [2, 3, 4, 7] układzie 18-pulsowym.

Układ prostownika 36-pulsowego, wykorzystujący koncepcje połączeń poszczególnych elementów obwodu magnetycznego prostownika 12-pulsowego oraz 18-pulsowego, został pokazany na rysunku 1a, przy czym na rysunku 1b oraz 1c przedstawiono w sposób szczegółowy oznaczenie zacisków poszczególnych uzwojeń WPP-TDS λ oraz TDS λ .



Rys.1. Prostownik niesterowany 36-pulsowy z systemami dławików sprzężonych WPP-TDS λ : a) schemat ideowy, b) konfiguracja uzwojeń układów 18-pulsowych zasilających prostowniki diodowe, c) konfiguracja uzwojeń układu 12-pulsowego

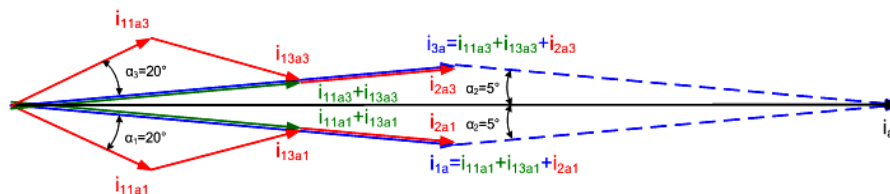
W obwodzie wejściowym prostownika 36-pulsowego z rysunku 1a, zasilanego z sieci trójfazowej o napięciu fazowym u_s ($s = a, b, c$) i indukcyjności wewnętrznej źródła zasilania L_w , znajdują się liniowe dławiki L_s ($L_w \ll L_s$), szeregowy trójfazowy dławik sprzężony TDS2 w wersji λ oraz dwa równoległe trójfazowe 18-pulsowe układy dławików sprzężonych WPP1-TDS1 i WPP3-TDS3 (TDS1 i TDS3 również w wersji λ).

Rysunek 2 przedstawia wykres wektorów przestrzennych prądów sześciu trójfazowych systemów zasilających, utworzonych za pomocą układów dławików sprzężonych WPP1-TDS λ 1, WPP3-TDS λ 3 oraz TDS λ 2.

Wektor przestrzenny napięcia sieci zasilającej tworzy suma napięć indukowanych na uzwojeniach układu TDS λ 2, o liczbach zwojów N_{a2} , N_{b2} , $N_{a2}+N_{b2}$. Napięcia te powodują jednocześnie przepływ prądów o żądanych wartościach amplitud i wzajemnych przesunięciach fazowych. Uzyskane w efekcie dwa wektory napięć trójfazowych, przesuniętych wzajemnie o kąt $2\pi/36$, zasilają układy WPP1, 3-TDS λ 1,3. Na podobnej zasadzie jak dla prostowników 18-pulsowego oraz 24-pulsowego zachowana jest symetria napięć zasilających poszczególne prostowniki diodowe w układzie 36-pulsowym, gdzie kąt fazowy między wektorami przestrzennymi napięć wyjściowych układów WPP1,3-TDS λ 1,3 musi być równy $2\pi/18$. Stanowi to równocześnie warunek 36-pulsowej pracy całego układu prostownika.

Przebiegi napięć u_{Djs} między punktem środkowym obwodu napięcia stałego C a punktami odniesienia Djs układów WPP3-TDS λ 3 i WPP1-TDS λ 1 prostownika 36-pulsowego, zgodne są z przebiegami odpowiadających napięć (u_{GsC}) układu 18-pulsowego, opisanego szczegółowo w [2, 7]. Pozostałe przebiegi napięć i strumieni, dotyczące układów WPP3-TDS λ 3 i WPP1-TDS λ 1 również zgodne są z odpowiednimi przebiegami przedstawionymi w [2, 7].

Na rysunku 3 zamieszczono przebiegi wybranych napięć u_{D1aC} , u_{D3aC} oraz u_{D1aD3a} w odniesieniu do układu TDS λ 2 analizowanego prostownika 36-pulsowego z rysunku 1a, wyznaczone na podstawie metody przedstawionej w [1, 2, 5, 7, 8].



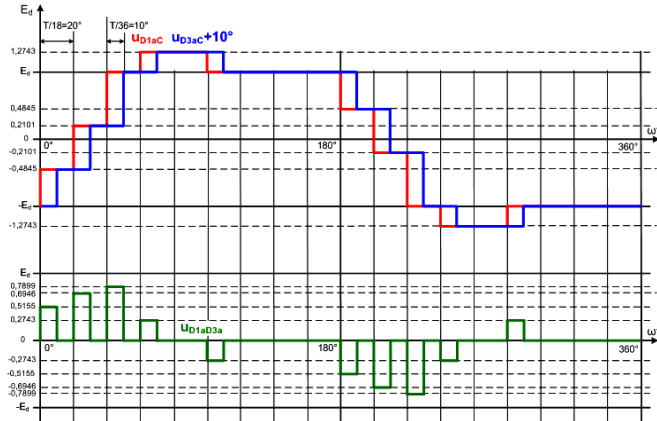
Rys. 2. Wykres wektorów przestrzennych prądów przekształtnika 36-pulsowego według schematu z rysunku 1a

Dla układu TDS λ 2 analizowanego prostownika 36-pulsowego napięcia u_{D1sC} wyprzedzają napięcia u_{D3sC} o 10° . Przebieg napięcia u_{D1sD3s} na uzwojeniach głównych układu TDS λ 2 (rys. 1a) wyznacza się, jako różnicę powyżej określonych napięć:

$$(1) \quad u_{D1sD3s} = u_{D1sC} - u_{D3sC}$$

Przebieg napięcia u_{D1aD3a} dla fazy a został pokazany na rysunku 3. Według definicji w celu określenia strumienia uzwojenia dławika oblicza się całkę z napięcia na tym uzwojeniu.

VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014



Rys. 3. Wybrane przebiegi czasowe napięć u_{D1aC} , u_{D3aC} i u_{D1aD3a} w odniesieniu do układu TDS λ 2 prostownika 36-pulsowego według rysunku 1a

Zgodnie z powyższym, strumień uzwojenia głównego dławika TDS λ 2 opisuje zależność:

$$(2) \quad \Psi_{D1sD3s \max} = \int_0^{T/36} u_{D1sD3s \max} dt$$

Z uwzględnieniem rysunku 3 można wyznaczyć wartość maksymalną tego strumienia dla uzwojenia TDS λ 2:

$$\Psi_{D1sD3s \max} = \left(E_d \cdot \frac{T}{36} \right) \cdot \begin{pmatrix} -1 + 0,5155 + 0,6946 \\ +0,7899 + 0,2743 \end{pmatrix} = 1,2743 \cdot E_d \cdot \frac{T}{36} = 7,0794 \cdot 10^{-4} \cdot E_d [\text{Wb}]$$

(3)

W [2] podano odpowiednie wzory dla dławików WPP1,3-TDS λ 1,3. Zgodnie z nimi oraz rysunkiem 1b maksymalne wartości strumieni uzwojeń dławików TDS λ 1,3 i uzwojeń dławików WPP1,3 opisują zależności (4) i (5):

$$(4) \quad \Psi_{D11sjD13sj \max} = \int_0^{T/18} u_{D11sjD13sj \max} dt = 2E_d \cdot T/18 = 2,222 \cdot 10^{-3} E_d [\text{Wb}]$$

$$(5) \quad \Psi_{D2sjD4sj \max} = \int_0^{T/18} u_{D2sjD4sj \max} dt = 0,6304 \cdot E_d \cdot T/18 = 7,0044 \cdot 10^{-4} E_d [\text{Wb}]$$

Dla układu 36-pulsowego maksymalną wartość $U_{Gs \max}$ pierwszej harmonicznej napięcia U_{Gs} , określa według [2], następująca zależność:

$$(6) \quad U_{Gs \max} = \frac{4}{3} \cdot E_d \cdot \frac{36}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{36}\right)$$

Wartość kąta fazowego między wektorami przestrzennymi napięć wyjściowych układów WPP1,3-TDS λ 1,3 i TDS λ 2 (rys. 1a), zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w [2], zależy bezpośrednio od stosunku liczby zwojów odpowiednich uzwojeń poszczególnych układów dławików. Zgodnie ze wzorami przedstawionymi w [2],

otrzymuje się zależności (7)–(9) przekładni p dławika od kąta α przesunięcia trójfazowych systemów napięć zasilających prostowniki diodowe. Dla odpowiednich dławików przekształtnika 36-pulsowego stosunek liczby zwojów spełniający powyższy warunek wynosi:

$$(7) \quad p_2 = \frac{N_{b2}}{N_{a2}} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin(60^\circ - \alpha_2)} = \frac{\sin 5^\circ}{\sin(60^\circ - 5^\circ)} = 0,1064$$

$$(8) \quad p_1 = \frac{N_b}{N_a} = \frac{\sin \alpha}{\sin(60^\circ - \alpha)} = \frac{\sin 20^\circ}{\sin(60^\circ - 20^\circ)} = 0,5321$$

$$(9) \quad p_3 = \frac{N_d}{N_c} = \frac{1}{2 \cos \alpha} = \frac{1}{2 \cos 20^\circ} = 0,5321$$

Sposób obliczania mocy gabarytowej układu magnetycznego S_G , zgodnie z definicją podaną w [2], przedstawiają zamieszczone tamże równania. Jednocześnie, jak wspomniano w [2], w celu wyznaczenia skutecznej wartości prądów w uzwojeniach dławika (wielkość niezbędna do wyznaczenia mocy gabarytowej), przyjmuje się założenie, że moc w obwodzie prądu stałego ($P_d = 2E_d I_o$) jest równa mocy harmonicznym podstawowych prądów pobieranych ze źródła zasilania.

Wyższe harmoniczne prądów fazowych (rzędu $36k \pm 1$, $k = 1, 2, 3, \dots$, generowane przez napięcie wejściowe dławików sprzężonych) są tłumione przez indukcyjności dławików L_s i można je pominąć. Oznacza to, że skuteczne wartości prądów w uzwojeniach dławików są w przybliżeniu równe skutecznym wartościom harmonicznym podstawowych.

Amplituda harmonicznnej podstawowej napięcia o przebiegu 36-schodkowym, zgodnie z zależnością (6), wynosi:

$$(10) \quad U_{Gs \max} = 1,332E_d$$

Przy pominięciu strat mocy wartość idealizowanego napięcia stałego na wyjściu układu 36-pulsowego, według [2], opisuje zależność:

$$(11) \quad 2E_{di} = \frac{3\pi \cdot \sqrt{2} \cdot U_s}{\sqrt{3} \cdot 36 \cdot 2 \cdot \sin(180^\circ / 36)}$$

przy czym U_s jest wartością skuteczną znamionowego napięcia międzyprzewodowego sieci zasilającej.

W analizowanym układzie 36-pulsowym (rys. 1a) napięcie wyjściowe $2E_{di}$ jest cyklicznie doprowadzane, poprzez diody sześciu mostków, do zacisków Djs dławików TDS λ_2 z liczbą zwojów $2N_{a2} + N_{b2}$ na czas równy jednej trzydziestej szóstej okresu T napięcia linii zasilającej.

W podobny sposób doprowadzane jest napięcie do zacisków dławików WPP1,3-TDS $\lambda_1,3$ z liczbą zwojów $2N_a + N_b$. Liczby zwojów $2N_{a2} + N_{b2}$ oraz $2N_a + N_b$ muszą być tak dobrane, aby w tym czasie ($T/36$), zgodnie z zależnościami (3), (4) i (5), nie zostały przekroczone dopuszczalne wartości strumieni rdzeni dławików TDS λ_2 i WPP1,3-TDS $\lambda_1,3$.

Podobnie jak dla prostownika 24-pulsowego wartość przybliżona znamionowego napięcia stałego $2E_d$, uwzględniająca znamionowy współczynnik sprawności układu η ($\eta \approx 0,97$) oraz względne napięcie zwarcia linii $u_{z\%}$ (L_w – reaktancja zwarcia generatora) i dławików L_s , opisana jest zależnością zamieszczoną w [2]. Napięcie zwarcia zależy bezpośrednio od wartości indukcyjności L_s i określa je zależność również podana w [2].

Zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w [2], wybór wartości $u_{z\%}$ na poziomie około 10% gwarantuje redukcję harmonicznnych prądu linii do dopuszczalnych wartości.

VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Wartość średnią znamionowego prądu stałego i_o można wówczas obliczyć, wykorzystując założoną wartość znamionowej mocy obwodu prądu stałego, według [2].

Dławiki WPP1-TDS λ 1 oraz WPP3-TDS λ 3 projektuje się według zasad podanych w [1, 2, 5, 7, 8], dostosowanych dla układów 36-pulsowych. Rdzenie żelazne tych dławików najprościej jest wykonać w postaci dwunastu oddzielnych rdzeni jednofazowych.

Zgodnie z przedstawionymi w [2] rozważaniami moc gabarytowa układu magnetycznego prostownika 36-pulsowego wyraża się jako suma mocy gabarytowych poszczególnych elementów magnetycznych WPP i TDS λ . Uwzględniając zależność (10) oraz fakt, że dla układu TDS λ 2 (rys. 1a) charakterystyczny jest kąt $\alpha_2 = 5^\circ$ przesunięcia wyjściowych napięć zasilających, otrzymuje się następujące równanie mocy dla tego układu:

$$(12) \quad P_d = 2E_d I_o = 3 \cdot \frac{1,332E_d}{\sqrt{2}} (I_{1,1s} + I_{1,3s}) \cos 5^\circ$$

przy czym $I_{1,1s}$ i $I_{1,3s}$ oznaczają skuteczne wartości harmonicznnych podstawowych prądów w uzwojeniach dławików układu TDS λ 2. Przyjmując $I_{1,1s} = I_{1,3s} = I_{js}$ w równaniu (12), otrzymuje się:

$$(13) \quad I_{js} = 0,355 \cdot I_o$$

Wartość skuteczna prądu pobieranego z sieci jest równa sumie wektorowej prądów $I_{1,1s}$ i $I_{1,3s}$:

$$(14) \quad I_s = 2I_{js} \cos 5^\circ = 0,707 \cdot I_o$$

Według [2], moc gabarytową dławika TDS λ 2 można wyrazić, jako:

$$(15) \quad S_{TDS\lambda 2} = 1,5\pi \frac{\sqrt{2}}{T} [\Psi_{D1sD3s \max} \cdot I_{js} + \frac{N_{b2}}{2N_{a2} + N_{b2}} \cdot \Psi_{D1sD3s \max} \cdot I_s]$$

przy czym I_s jest prądem fazowym pobieranym ze źródła zasilania.

Podstawiając do prawej strony równania (15): $\Psi_{D1sD3s \max} = 7,0794 \cdot 10^{-4} E_d$ zgodnie z (3) oraz $I_{js} = 0,355I_o$ według (13) i $I_s = 0,707I_o$ według (14), otrzymuje się:

$$(16) \quad S_{TDS\lambda 2} = 1,5 \cdot \pi \cdot \frac{\sqrt{2}}{20 \cdot 10^{-3}} [7,0794 E_d \cdot 10^{-4} (0,355 I_o + \frac{0,1064}{2 + 0,1064} \cdot 0,707 I_o)] = 0,0461 \cdot (2E_d I_o)$$

zatem ostatecznie:

$$(17) \quad \frac{S_{TDS\lambda 2}}{P_d} = 4,61\%$$

Przy obliczaniu mocy gabarytowej układów dławików sprzężonych WPP1-TDS λ 1 i WPP3-TDS λ 3 według zasad podanych w [1, 2, 5, 7, 8], należy dodatkowo uwzględnić połowę mocy po stronie prądu stałego oraz wartość napięcia wyprostowanego wyrażonego wzorem (10). Równanie, opisujące moc gabarytową według [2], dla przypadku dławików sprzężonych TDS λ 1 oraz TDS λ 3 przyjmie postać:

$$(18) \quad S_{TDS\lambda 1,3} = 0,5 \cdot 3 \cdot \pi \frac{\sqrt{2}}{20 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\Psi_{D11sjD13sj \max} \cdot I_{1,1s} + \frac{(N_b / 2N_a)}{+N_b} \cdot \Psi_{D11sjD13sj \max} \cdot I_{1,1s} \right]$$

gdzie $I_{1,is}$ i $I_{1,1s}$ oznaczają skuteczne wartości harmonicznych podstawowych prądów (rys. 1b) w uzwojeniach dławików układów TDS λ 1 i TDS λ 3.

W odniesieniu do układów dzielników prądu WPP1 i WPP3 otrzymujemy:

$$(19) \quad S_{WPP1,3} = 0,5 \cdot 3 \cdot \pi \frac{\sqrt{2}}{20 \cdot 10^{-3}} \cdot \left\{ \begin{array}{l} [N_c / (N_c + N_d)] \Psi_{D2sjD4sj \max} \cdot I_{1,is} + \\ [N_d / (N_c + N_d)] \Psi_{D2sjD4sj \max} \cdot I_{1,1s} \end{array} \right\}$$

Uwzględniając maksymalne wartości strumieni odpowiednich uzwojeń układów 18-pulsowych, opisane równaniami (4) i (5), a także wartości przekładni według wzorów (8) i (9) oraz po obliczeniu, według zasad podanych w [2], odpowiednich wartości prądów układów WPP1-TDS λ 1 i WPP3-TDS λ 3 oraz podstawieniu ich do wzorów (18) i (19), otrzymujemy:

$$(20) \quad S_{TDS\lambda 1,3} = 6,61\% \cdot P_d$$

$$(21) \quad S_{WPP1,3} = 1,95\% \cdot P_d$$

Całkowita moc gabarytowa układu magnetycznego przekształtnika 36-pulsowego wyraża się zatem zależnością:

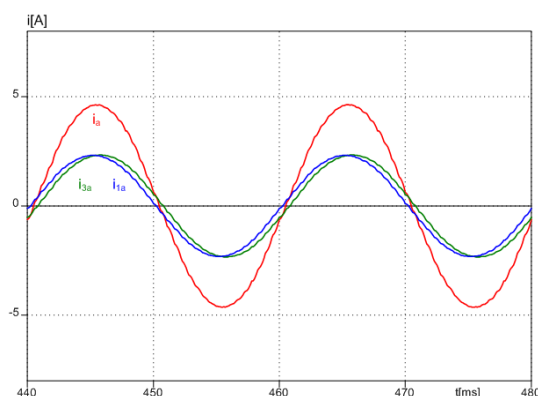
$$(22) \quad S_{TDS2} + S_{WPP1-TDS\lambda 1} + S_{WPP3-TDS\lambda 3} = [(6,61\% + 1,95\%) \cdot 2 + 4,61\%] P_d = 21,73\% \cdot P_d$$

Wartość tę należy uznać za bardzo korzystną.

Wyniki badań symulacyjnych

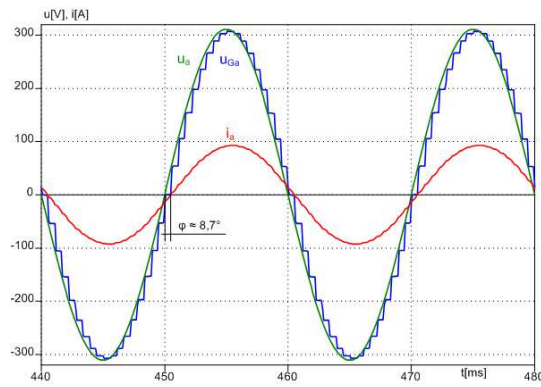
Uzyskane w wyniku symulacji przebiegi czasowe wybranych prądów i napięć w odniesieniu do układu prostownika 36-pulsowego o mocy 2 kVA, z systemem trójfazowych dławików sprzężonych WPP-TDS λ , według rysunku 1a, pokazano na rysunkach od 4 do 7.

Pokazany na rysunku 4 kształt prądu i_a , pobieranego ze źródła zasilania, ma przebieg czasowy odbiegający tylko nieznacznie od przebiegu sinusoidalnego. Napięcie u_{D1aD3a} na zaciskach wyjściowych układu TDS λ 2, mierzone względem punktu neutralnego, ma przebieg 36-schodkowy (rys. 5), potwierdzający prawidłowe działanie prostownika. Przyjęte 10% napięcie zwarcia [1, 2, 5, 7, 8] powoduje, że przebieg czasowy prądu i_a jest przesunięty w fazie względem napięcia źródłowego u_a o około $8,7^\circ$ ($\cos\varphi_1 \approx 0,988$, rys. 6). Prądy dopływające do prostowników P11-P13 i P21-P23 są wzajemnie przesunięte w fazie o kąt 10° (rys. 6), odpowiadający liczbie pulsów układu. W przebiegu czasowym prądu pobieranego ze źródła zasilania praktycznie występują jedynie harmoniczne 35. i 37. Pozostałe wyższe harmoniczne rzędów $36k \pm 1$ ($k = 1,2,3,\dots$) są silnie stłumione. Współczynnik THD $_i$ jest równy w przybliżeniu 1,04% (rys. 7), co należy uznać za bardzo dobry rezultat.

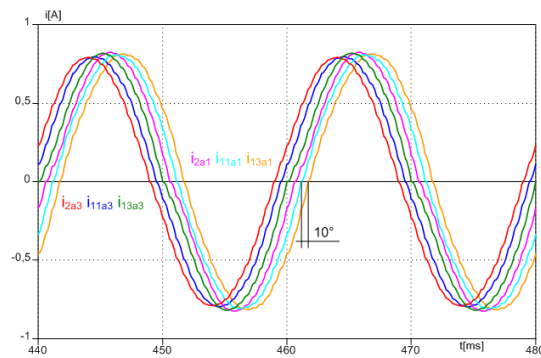


Rys. 4. Przebiegi czasowe prądów i_{1a} , i_{3a} uzwojeń TDS λ 2 na tle przebiegu czasowego prądu sieci i_a

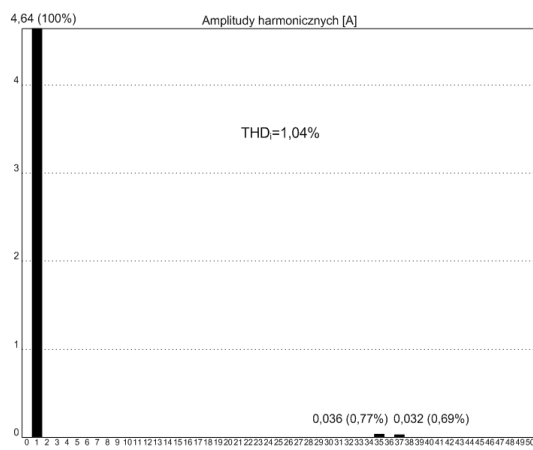
VIII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014



Rys. 5. Przebiegi czasowe napięć u_a i u_{Ga} na tle przebiegu prądu sieciowego i_a w stanie obciążenia znamionowego przekształtnika



Rys. 6. Przebiegi czasowe prądów zasilających mostki diodowe: i_{2a3} , i_{1a3} , i_{13a3} uzwojeń układu WPP3-TDSλ3 oraz i_{2a1} , i_{11a1} , i_{13a1} uzwojeń układu WPP1-TDSλ1



Rys. 7. Widmo przebiegu prądu linii zasilającej i_a

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań, autorzy formułują następujące wnioski:

1. Przedstawione przebiegi potwierdzają prawidłowość zasad projektowania układu prostownika 36-pulsowego i jego działanie zgodne z przedstawionymi założeniami teoretycznymi.
2. W układach 18-, 24- i 36-pulsowym występuje szeregowe połączenie dławików sprzężonych. Widma częstotliwościowe tych dławików (w odróżnieniu od dławika omawianego w [1, 2, 5, 7, 8]), wykazują, że oprócz tłumienia określonych niepożądanych harmonicznych, podstawowa harmoniczna częściowo odkłada się na ich indukcyjnościach, powodując niewielką (kilka woltów w stosunku do układu 12-pulsowego) stratę napięcia.
3. Należy podkreślić, że układy 36-pulsowe, wykorzystujące dławiki sprzężone, są prezentowane w literaturze przedmiotu, ale wyłącznie przy zastosowaniu układów autotransformatorowych.

Bibliografia

1. Mysiak P., "A 24-pulse diode rectifier with coupled three-phase reactor". Journal of the Chinese Institute of Engineers, vol. 30, no. 7, National Taiwan University of Science and Technology, 2007, pp. 1189–1204.
2. Mysiak P., "Multi-pulse diode rectifier with current harmonic blocking reactors". Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, 2010.
3. Paice D.A., "Power electronic converter harmonics: multipulse methods for clean power". IEEE, New York, USA, 1996.
4. Mysiak P., "A review of power electronics rectifier issues with low effects on the mains. The applications and future developments". Przegląd Elektrotechniczny, R. 85, 2009, nr 12, pp. 231–241.
5. Mysiak P., "An DC-output multi-pulse converter in the low voltage power network supply conditions". Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1996.
6. Mysiak P., "A multipulse diode converter - analysis of the work of three-phase coupled reactor applicated". Przegląd Elektrotechniczny, 2009, nr 2, pp.119–124.
7. Mysiak P., "Eighteen-pulse diode rectifier with three-phase coupled reactors". Archiwum Elektrotechniki, vol. L, nr 1, Warszawa 2001.
8. Strzelecki R., Supronowicz H., "Power factor in AC supply systems and improvements methods". Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2000.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Ryszard Strzelecki, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, rstrzele@am.gdynia.pl, Instytut Elektrotechniki, Zakład Przekształtników Mocy, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa.
dr. hab. inż. Piotr Mysiak, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, mysiak@am.gdynia.pl.