

ANDRZEJ SIKORA, BARBARA KULESZ*

WIELOFAZOWE TRANSFORMATORY PROSTOWNIKOWE PODSTACJI TRAKCYJNYCH

MULTI-PHASE RECTIFIER TRANSFORMERS FOR TRACTION SUBSTATIONS

Streszczenie

Istnieją różne rozwiązania transformatorów prostownikowych podstacji trakcyjnych, np. 6-fazowe (12-pulsowe) czy 12-fazowe (24-pulsowe), gdzie liczba pulsów odnosi się do kształtu napięcia wyprostowanego. Wpływ asymetrycznego napięcia zasilania na pracę takich układów jest tematem niniejszego artykułu. Asymetrię zdefiniowano tutaj jako zawartość procentową składowej symetrycznej przeciwnej w napięciu zasilającym. Skonstruowano modele symulacyjne układów 12- i 24-pulsowych oraz przeprowadzono badania symulacyjne, otrzymując przebiegi prądów i napięć transformatorów, a także napięcia i prądu trakcyjnego (obciążenie rezystancyjne). Przeprowadzono również analizę harmoniczną. Otrzymane wyniki wskazują, że wartość średnia napięcia wyprostowanego nie jest zależna od asymetrii napięcia zasilającego. Wartości i kształt prądów są jednak różne dla różnych faz transformatora, podobnie jak czasy przewodzenia diod w mostkach prostownikowych. Prowadzi to do obniżenia dopuszczalnej wartości prądu uzwojeń transformatora oraz dopuszczalnej mocy obciążenia transformatora.

Słowa kluczowe: transformatory, prostowniki, podstacje trakcyjne, jakość napięcia

Abstract

Traction substations rectifier transformers may be designed in different ways. e.g. as 6-phase 12-pulse or 12-phase 24-pulse devices, where number of pulses relates to d.c. output voltage waveforms. The impact of asymmetrical supply voltage, and asymmetry here is defined as percentage of negative phase sequence component has been investigated in the paper. Simulation models of 12- and 24-pulse transformers have been constructed on the basis of standard transformer equivalent scheme. Appropriate simulations have been run, giving waveforms of currents and voltages for the d.c. output loaded with resistive load. The harmonic analysis has been accordingly done. The results show that the average value of rectified voltage is not influenced by asymmetrical supply. However, current values and waveforms differ greatly from phase to phase and conducting times for different diodes in bridge rectifier are also different. This in turn leads to lowering allowable current value in transformer windings and drop in transformer's capacity.

Keywords: transformers, rectifiers, traction substations, voltage quality

* Dr inż. Andrzej Sikora, dr inż. Barbara Kulesz, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska.

1. Rodzaje transformatorów prostownikowych

W Polsce pojazdy trakcyjne zasilane są z sieci trakcyjnej prądu stałego. W celu otrzymania takiego napięcia stosuje się zespoły prostownikowe instalowane na podstacjach trakcyjnych. Składają się one z transformatorów i układów prostownikowych. Transformatory prostownikowe stosowane w trakcji elektrycznej zasilane są napięciem trójfazowym z sieci energetyki zawodowej. Liczba faz po stronie wtórnej transformatora $m_2 \geq 3$. Dzięki wielofazowości tych transformatorów można uzyskać układy prostownicze o zwiększonej liczbie pulsów napięcia wyprostowanego przypadającej na jeden okres napięcia zasilającego.

Aby praca poszczególnych uzwojeń wtórnych transformatora prostownikowego była poprawna, muszą być zachowane (wg normy PN-EN 60076-1:2001):

- równość napięć (tolerancja $\pm 0,5\%$),
- równość przesunięć fazowych pomiędzy poszczególnymi grupami uzwojeń (tolerancja $\pm 10'$),
- równość impedancji zwarciowej każdej grupy uzwojeń wtórnych liczona względem uzwojenia pierwotnego (tolerancja $\pm 10\%$).

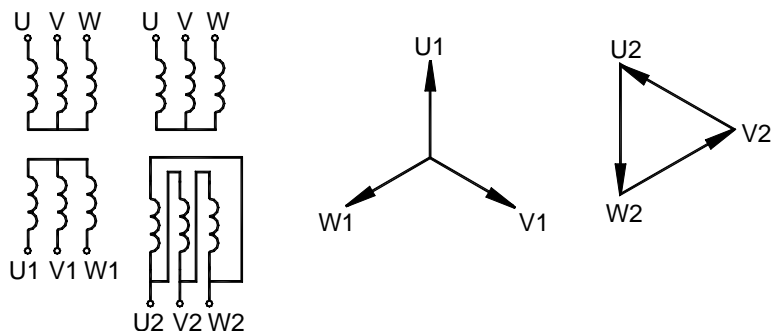
Stawiane są także wymagania dotyczące napięcia sieci [14]:

- w ciągu każdego tygodnia 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego powinno mieścić się w przedziale od 0 do 2% wartości składowej kolejności zgodnej (dla podmiotów przyłączonych bezpośrednio do sieci rozdzielczej o napięciu znamionowym wyższym niż 1 kV, lecz niższym niż 110 kV),
- odkształcenie napięcia charakteryzowane współczynnikiem THD_U nie powinno przekroczyć 8%, przy czym współczynnik ten definiowany jest jako

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

- U_h – wartość skuteczna h -tej harmonicznej napięcia,
- U_1 – wartość skuteczna harmonicznej podstawowej napięcia,
- h – rząd harmonicznej.

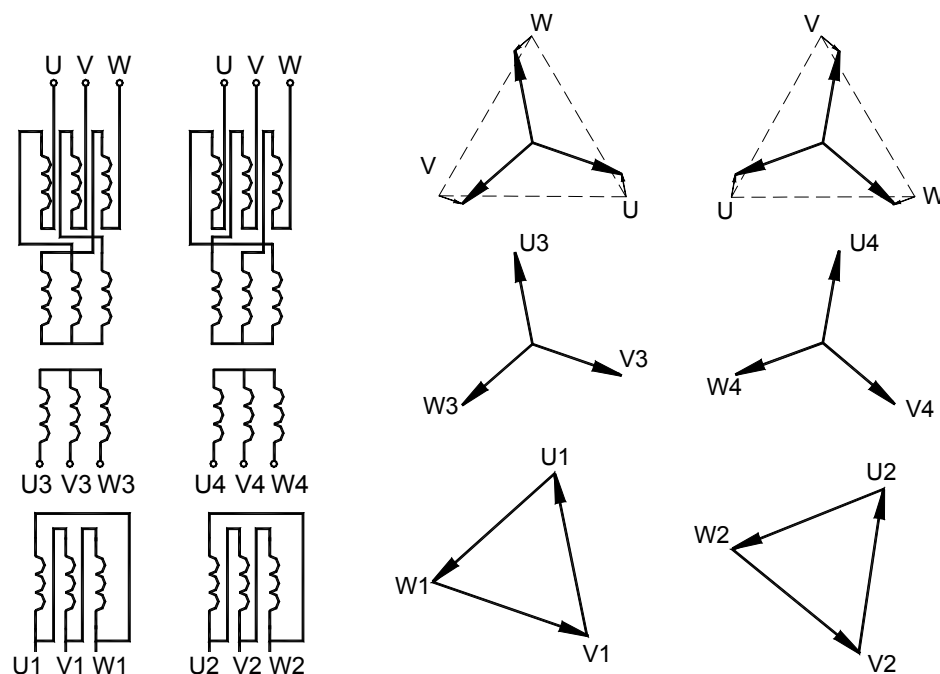


Ryc. 1. Transformator prostownikowy 6-fazowy 12-pulsowy, złożony z dwóch zasilanych transformatorów dwuuzwojeniowych

Fig. 1. 6-phase 12-pulse rectifier transformer consisting of two separate two-winding transformers

Zwiększanie liczby faz m_2 uzwojenia wtórnego można uzyskać na kilka sposobów. Najprostszym z nich jest układ trójkąt–gwiazda, w którym liczba faz $m_2 = 6$ jest niesymetryczna, to znaczy, że kąty przesunięć fazowych wynoszą kolejno 30° , 90° , 30° itd. Wykorzystuje się tu naturalne przesunięcie napięć fazowych przy połączeniu uzwojeń w trójkąt i gwiazdę. Po wyprostowaniu otrzymuje się napięcie stałe 12-pulsowe.

Większą liczbę faz można uzyskać przez łączenie dwóch transformatorów z rozdzielonymi uzwojeniami pierwotnymi, jak na ryc. 2. Uzwojenia wtórne tworzą układ trójkąt–gwiazda. Łącząc ze sobą takie dwa transformatory, otrzymuje się układ 12-fazowy niesymetryczny, to znaczy, że przesunięcia fazowe między kolejnymi fazami wynoszą 15° , 15° , 15° , 75° itd. Po wyprostowaniu uzyskuje się napięcie stałe 24-pulsowe.



Ryc. 2. Transformator prostownikowy 12-fazowy 24-pulsowy

Fig. 2. 12-phase 24-pulse rectifier transformer

Istnieją także inne warianty otrzymania układu $m_2 = 12$, np. można dzielić uzwojenia wtórne transformatora.

Z transformatorami współpracują diodowe, niesterowane prostowniki o liczbie pulsów od 6 do 24.

W artykule przeanalizowano wpływ asymetrii napięcia zasilania na zawartość harmonicznych w napięciu wyprostowanym 12- i 24-pulsowym.

2. Model transformatora prostownikowego

Do przeprowadzenia symulacji komputerowych zastosowano klasyczny schemat zastępczy transformatora, przy czym, ze względu na wygodę obliczeń, parametry strony pierwotnej przeliczono na stronę wtórną.

Wartości poszczególnych elementów schematu zastępczego zostały zaczerpnięte z przeprowadzonych badań modelowego transformatora o mocy 3,3 kV·A [6]. Wynosiły one: $R'_1 = 0,25 \Omega$, $L_{s1}' = 0,3 \text{ mH}$, $R_{Fe} = 0,5 \text{ k}\Omega$, $L_m = 0,5 \text{ H}$, $L_{s2} = 0,3 \text{ mH}$, $R_2 = 0,25 \Omega$.

3. Założenia modelu symulacyjnego

Symulacje komputerowe wykonano, stosując program PSpice.

Model zespołu prostownikowego utworzony w tym programie składa się ze źródeł napięcia symulujących i połączonych, tak jak uzwojenia po stronie wtórnej transformatora. Kolejnym elementem układu symulacyjnego jest schemat zastępczy transformatora przyłączony do każdej zasilanej fazy, przy czym napięcia fazowe U'_1 kolejnych faz są przesunięte w fazie jak dla układu gwiazda–trójkąt 6-fazowego 12-pulsowego ryc. 1 lub jak na ryc. 2 (układ 12-fazowy 24-pulsowy).

Rdzeń transformatora jest symetryczny, a jego charakterystyka magnesowania jest liniowa. Źródło zasilania U'_1 jest bezimpedancyjne.

Transformator zasilą układ prostownikowy, który po stronie napięcia stałego obciążony jest odbiornikiem czysto rezystancyjnym, modelującym sieć trakcyjną.

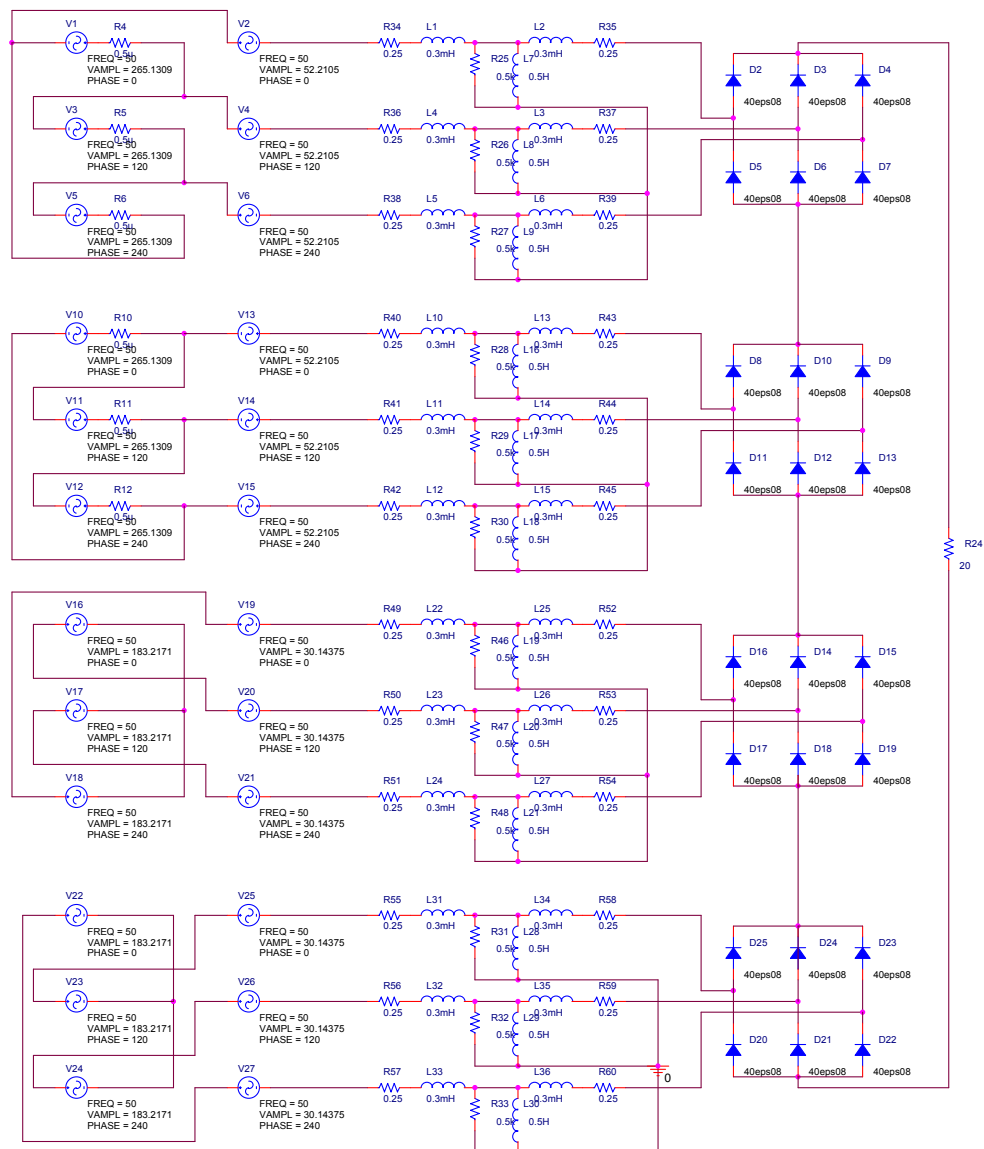
4. Badania symulacyjne układów transformatorów

Badania symulacyjne układu transformatora 6-fazowego 12-pulsowego przeprowadzono przy szeregowym połączeniu dwóch mostków prostownikowych.

Układ zespołu prostownikowego 24-pulsowego jest połączeniem szeregowym czterech zespołów prostownikowych 6-pulsowych. Układ został obciążony takim samym prądem jak układ 12-pulsowy.

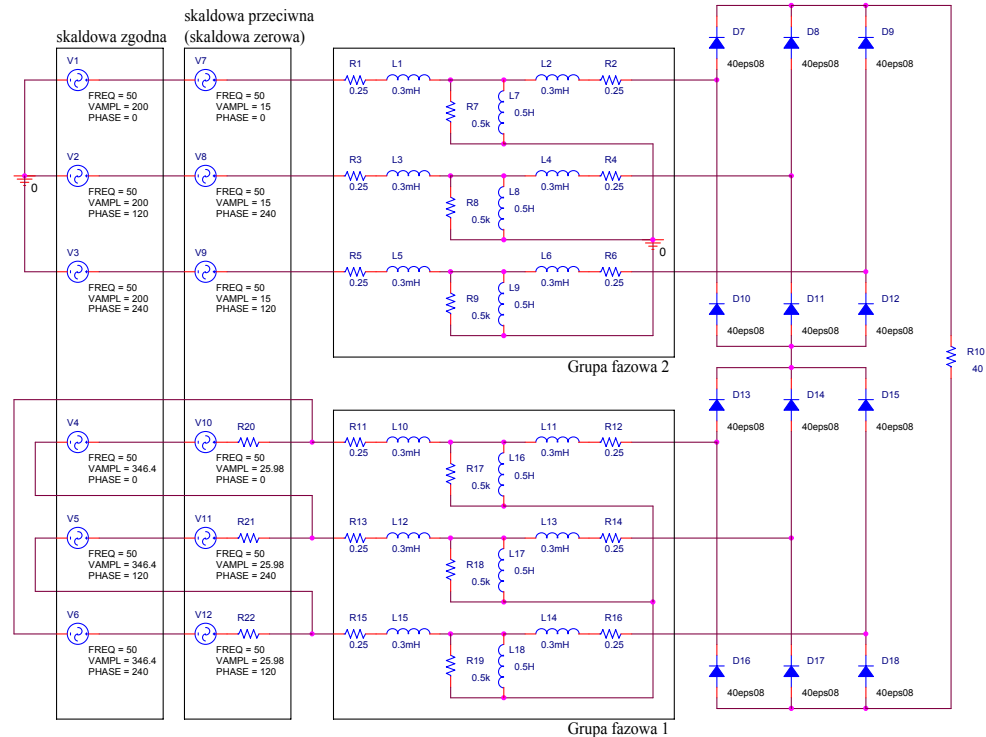
Wpływ niesymetrycznego zasilania zespołu prostownikowego przebadano, opierając się na rozkładzie źródeł zasilania na szeregowo połączone źródła napięcia składowych: zgodnej, przeciwnej i zerowej, zgodnie z metodą składowych symetrycznych.

Zawartość składowej kolejności przeciwnej i zerowej w niesymetrycznym napięciu zasilania została zamodelowana jak na ryc. 3 i 4. Układy były obciążone odbiornikami rezystancyjnymi o wartościach $R_0 = 40 \Omega$ (dla układu 12-pulsowego) i $R_0 = 90 \Omega$ (dla układu 24-pulsowego).



Ryc. 3. Schemat symulacyjny układu zespołu prostownikowego 12-fazowego 24-pulsowego

Fig. 3. Simulation scheme for 12-phase 24-pulse transformer-rectifier set



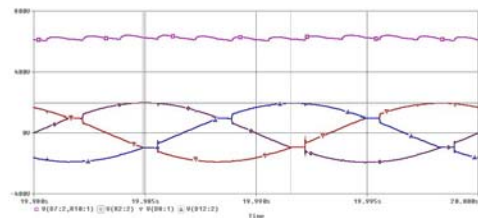
Ryc. 4. Schemat symulacyjny do badania wpływu asymetrii zasilania zespołu prostownikowego 12-pulsowego

Fig. 4. Simulation scheme used to investigate supply asymmetry impact on 12-pulse rectifier operation

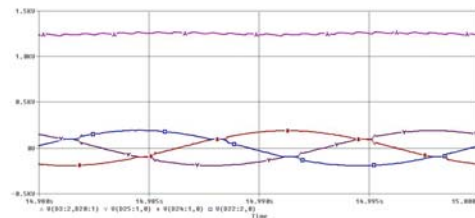
5. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych dla asymetrycznego napięcia zasilania

Przebiegi napięć i prądów dla składowej kolejności przeciwnej wynoszącej 1% składowej zgodnej napięcia zasilania podano na ryc. 5 i 6.

a)

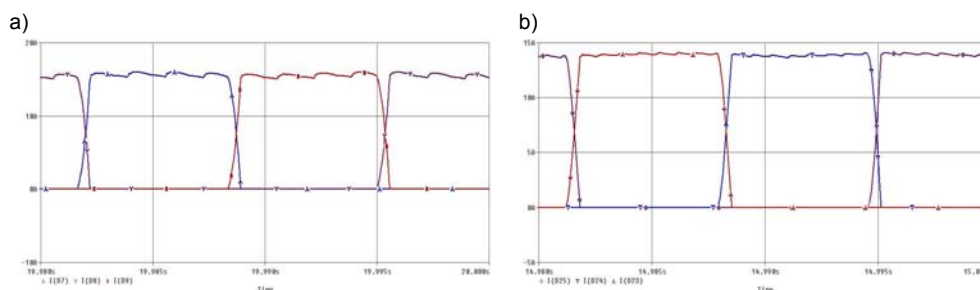


b)



Ryc. 5. Przebieg średniego napięcia wyprostowanego U_d i napięć fazowych dla: a) układu 12-pulsowego, b) układu 24-pulsowego

Fig. 5. Courses of rectified voltage and phase voltages for: a) 12-pulse system, b) 24-pulse system



Ryc. 6. Przebiegi prądów na diodach D1, D2, D3 dla: a) układu 12-pulsowego, b) układu 24-pulsowego

Fig. 6. Current courses for D1, D2 and D3 diodes in: a) 12-pulse system, b) 24-pulse system

Dokonano charakterystyki pulsacji napięcia wyprostowanego, przy czym jako pulsację napięcia wyprostowanego U_d definiuje się stosunek różnicy napięć maksymalnego i minimalnego do wartości średniej

$$\delta U_d = \frac{\Delta U_d}{U_d} \cdot 100\% = \frac{U_{d(\max)} - U_{d(\min)}}{U_d} \cdot 100\% \quad (2)$$

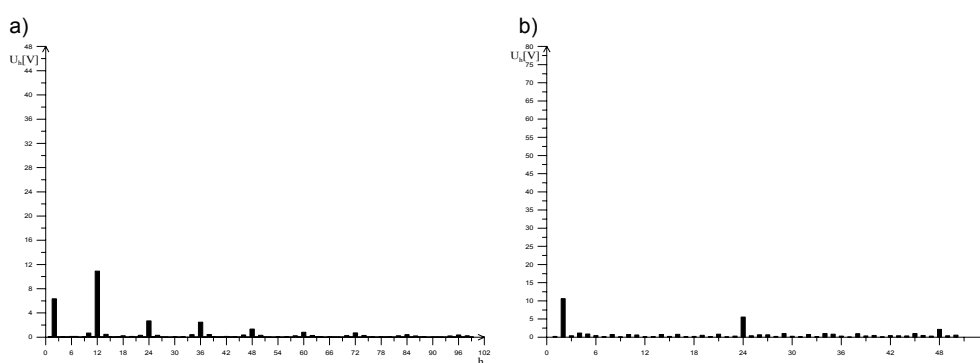
Wyniki zestawiono w tabelicy 1.

Tabela 1

Zestawienie wyników symulacji

Zawartość składowej kolejności przeciwnej	0%	1%	2,5%	5%	7,5%
δU_d [%] dla układu 12-pulsowego	4,21	5,90	8,63	13,34	17,99
δU_d [%] dla układu 24-pulsowego	1,56	3,28	5,78	10,18	14,43

Analiza harmoniczna napięcia wyprostowanego pozwoliła określić zawartość wyższych harmonicznych, które przestawiono na ryc. 7.

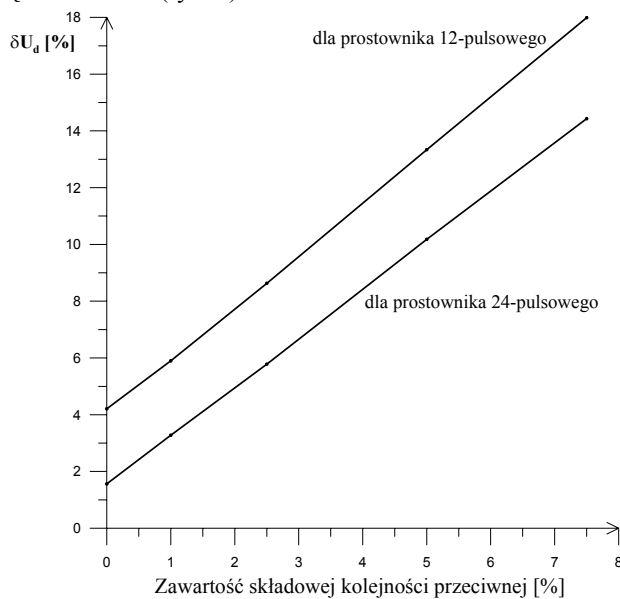


Ryc. 7. Wyższe harmoniczne napięcia w napięciu wyprostowanym przy 1-procentowej zawartości składowej przeciwnej w napięciu zasilania dla: a) układu 12-pulsowego, b) układu 24-pulsowego

Fig. 7. Harmonics spectrum of rectified voltage, 1 percent negative-sequence component in supply voltage: a) 12-pulse system, b) 24-pulse system

6. Omówienie wyników symulacji

Składowa przeciwna napięcia zasilania generuje w napięciu wyprostowanym U_d dodatkową pulsację o podwójnej częstotliwości sieci zasilającej. Amplituda tej pulsacji zależy od zawartości składowej przeciwniej w napięciu zasilania. Dodatkowa pulsacja wpływa na obniżenie efektywności prostowania napięcia przemiennego, na co wskazuje analiza harmoniczna pulsacji napięcia wyprostowanego w funkcji zawartości składowej kolejności przeciwniej w napięciu zasilania (ryc. 8).



Ryc. 8. Charakterystyki pulsacji napięcia wyprostowanego w funkcji zawartości składowej kolejności przeciwniej w napięciu zasilania

Fig. 8. Pulsations of rectified voltage vs. negative-sequence component supply voltage input

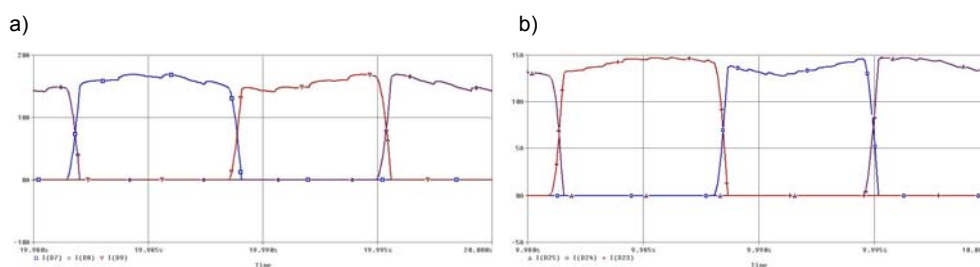
Składowa kolejności przeciwniej nie wpływa znacząco na wartość średniego napięcia wyprostowanego U_d – tabl. 2.

Tablica 2

Średnia wartość napięcia wyprostowanego w funkcji zawartości składowej kolejności przeciwniej napięcia zasilającego

Zawartość składowej kolejności przeciwniej	U_d [V] dla prostownika 12-pulsowego	U_d [V] dla prostownika 24-pulsowego
0%	622,1	1251,6
1%	622,3	1250,9
2,5%	622,4	1250,3
5%	622,7	1251,3
7,5%	623,3	1251,5

Kolejnym negatywnym skutkiem istniejącej asymetrii jest obniżenie dopuszczalnej mocy obwodu stałoprądowego. Przy symetrycznym zasilaniu prądy we wszystkich fazach układu zasilającego urządzenie prostownikowe są jednakowe i mają jednakowy czas trwania (przepływu). W układzie niesymetrycznie zasilanym prądy te różnią się między sobą kształtem oraz czasem trwania. Ilustruje to ryc. 9 dla dużej, 7,5-procentowej asymetrii napięcia zasilającego.

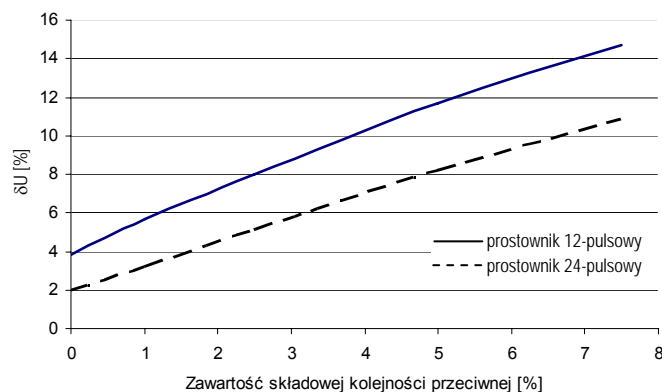


Ryc. 9. Przebiegi prądów na diodach D1, D2, D3 dla: a) układu 12-pulsowego, b) układu 24-pulsowego, przy składowej kolejności przeciwnej wynoszącej 7,5% składowej zgodnej napięcia zasilania

Fig. 9. Current courses for D1, D2 and D3 diodes in: a) 12-pulse system, b) 24-pulse system, with supply voltage negative-sequence component equal to 7,5% of positive-sequence component

Składowa kolejności przeciwnej nie wpływa znacząco na wartość średniego napięcia wyprostowanego U_d .

Widma amplitudowe dla asymetrii jednoprocentowej wskazują, że amplituda drugiej harmonicznej jest proporcjonalna do współczynnika asymetrii zasilania i wartość tej harmonicznej jest dominująca. Wzrost zawartości składowej kolejności przeciwnej powoduje wzrost amplitud innych harmonicznych napięcia wyprostowanego. Na podstawie wyników zamieszczonych w tabl. 2 wykreślono charakterystykę z ryc. 10.



Ryc. 10. Charakterystyka zawartości wyższych harmonicznych w zależności od zawartości składowej przeciwnej w napięciu zasilania

Fig. 10. Higher harmonics content vs. negative-sequence component of supply voltage

W tabelicy 3 zamieszczono czasy przewodzenia diod mostków prostownikowych dla różnych wielkości asymetrii napięcia zasilającego.

Tabela 3

Czasy przewodzenia diod mostków prostownikowych dla różnych wielkości asymetrii napięcia zasilającego

Zawartość składowej kolejności przeciwnej	1%			2,5%			5%			7,5%		
Czasy przewodzenia diod	t_{D1} [ms]	t_{D2} [ms]	t_{D3} [ms]	t_{D1} [ms]	t_{D2} [ms]	t_{D3} [ms]	t_{D1} [ms]	t_{D2} [ms]	t_{D3} [ms]	t_{D1} [ms]	t_{D2} [ms]	t_{D3} [ms]
Układ 6-fazowy 12-pulsowy	7,3	7,2	7,2	7,4	7,2	7,2	7,5	7,1	7,1	7,6	7,0	7,0
Układ 12-fazowy 24-pulsowy	7,3	7,3	7,3	7,4	7,2	7,2	7,6	7,1	7,1	7,7	7,1	7,1

Nierównomierność czasów trwania prądów na poszczególnych diodach oznacza, że część diod w układzie jest niedociążona.

7. Wnioski

Oddziaływanie składowej kolejności przeciwnej napięcia zasilania ma negatywny wpływ na warunki pracy urządzeń prostownikowych. Asymetria ta powoduje:

- wzrost pulsacji napięcia wyprostowanego,
- obniżenie dopuszczalnej mocy układu stałoprądowego ze względu na ograniczenie składowej skutecznej prądu w uzwojeniach transformatora.

Literatura

- [1] Podoski J., Kacprzak J., Mysłek J., *Zasady trakcji elektrycznej*, WKiŁ, Warszawa 1980.
- [2] Mizia W., *Transformatory*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996.
- [3] Król A., Moczko J., *P Spice – Symulacja i optymalizacja układów elektronicznych*, Wydawnictwo Nakom, Poznań 2000.
- [4] Rojek A., *Nowe i najnowsze rozwiązania urządzeń w układzie zasilania trakcji elektrycznej w Polsce*, Technika Transportu Szynowego nr 7–8/2003, Łódź, 64–69.
- [5] Glinka T., Grzenik R., Kulesz B., Mołoń Z., Sobotka J., *Transformatory prostownikowe podstacji trakcyjnych*, Proc. 5th International Conference: „Modern Electric Traction in Regional and Urban Transport”, Gdańsk 2001.
- [6] *Badania transformatora prostownikowego 12-fazowego 24-pulsowego*, Raport wykonany przez Politechnikę Śląską dla firmy ALSTOM T&D Transformers sp. z o.o., Gliwice 2001.

- [7] Baranowski K., Welo A., *Symulacja układów elektronicznych PSpice: Pakiet Design Center*, Wydawnictwo MIKOM, Warszawa 1996.
- [8] PN-EN 60076-1:2001. Transformatory. Wymagania ogólne.
- [9] PN-EN 60076-1:2001/A1:2002(U). Transformatory, Wymagania ogólne. [Zmiana A1].
- [10] PN-EN 60076-1:2001/A12:2002(U). Transformatory, Wymagania ogólne. [Zmiana A2].
- [11] PN-EN 61378-1:2000. Transformatory przekształtnikowe. Transformatory do zastosowań przemysłowych.
- [12] PN-IEC 146-1-3:1996. Przekształtniki półprzewodnikowe. Wymagania ogólne i przekształtniki o komutacji sieciowej. Transformatory i dławiki.
- [13] Szkała D., *Współpraca transformatora z prostownikiem na podstacjach trakcyjnych*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 2004.
- [14] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci (DzU z 2005 r. Nr 2, poz. 6).