

## **Analiza pracy w dziedzinie częstotliwościowej trójfazowego dławika sprzężonego zastosowanego w wybranych układach wielopulsowych przekształtników diodowych**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę pracy w dziedzinie częstotliwościowej trójfazowego dławika sprzężonego CTR, zastosowanego w układzie dwunastopulsowego i osiemnastopulsowego przekształtnika diodowego. Dzięki zastosowaniu zestawów sieciowych trójfazowych dławików sprzężonych, prezentowane przekształtniki pozwalają, niewielkim kosztem, znacznie zredukować niepożądane wyższe harmoniczne w przebiegu prądu sieciowego. W końcowej części artykułu przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przekształtnika osiemnastopulsowego o mocy 20kVA.

**Abstract.** The article presents the frequency domain analysis of the work of three-phase coupled reactor (CTR) applicated in twelve-pulse and eighteen-pulse diode converters. In consideration of using sets of coupled three-phase power network reactors, the presented converters makes it possible, by low costs, to considerably reduce undesired higher harmonics in the power network current. The laboratory tests results of 20kVA eighteen-pulse diode converter are presented at the end of the article (**A Frequency Domain Analysis of the Work of Three-Phase Coupled Reactor Applicated in Selected Multipulse Diode Converter Systems**).

**Słowa kluczowe:** sieciowe trójfazowe dławiki sprzężone, autonomiczna sieć zasilająca, wielopulsowe przekształtniki sieciowe, kondycjonowanie mocy.

**Keywords:** Coupled three-phase power network reactors, local power network, multi-pulse power network converters, power conditioning.

### Wstęp

Przekształtnik dwunastopulsowy, będący głównym przedmiotem artykułu jest układem charakteryzującym się stosunkowo niskim poziomem zawartości wyższych harmonicznych prądu, generowanych do sieci zasilającej (6÷7%) [3, 5]. Główny zakres zastosowań układu dotyczy zasilania odbiorników wymagających stałego napięcia, w tym także obwodów pośredniczących w złożonych przemiennikach częstotliwości [2]. Wielopulsowy charakter pracy układu decyduje o redukcji głównie 5 i 7 harmonicznej prądu pobieranego z sieci. Koszt układu jest relatywnie niski, ponieważ nie jest wymagany transformator sieciowy, a moce zastosowanych układów magnetycznych stanowią mniej niż 20% mocy po stronie prądu stałego. Prostota struktury układu stanowi o dużej jego niezawodności. Do innych korzystnych właściwości rozpatrywanego układu należy zaliczyć: wysoką sprawność energetyczną, niski pobór mocy biernej przesunięcia i odkształcenia, dobre właściwości dynamiczne oraz wysoką przeciążalność.

### Analiza pracy układu i opis matematyczny

Napięcia wejściowe typowego trójfazowego prostownika sześciopulsowego, pokazanego na rysunku 1, odniesione do punktu C obwodu napięcia stałego, można przedstawić, przy założeniu symetrii czasowej, w postaci następujących zależności:

$$(1) \quad u_{GRC}(\omega_1 t) = u_{GRC}(\omega_1 t)$$

$$(2) \quad u_{GSC}(\omega_1 t) = u_{GRC}(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3})$$

$$(3) \quad u_{GTC}(\omega_1 t) = u_{GRC}(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3})$$

Napięcia opisane równaniami (1÷3) można przedstawić w postaci szeregu Fouriera. Równanie opisujące przykładowo napięcie  $u_{GRC}$  przyjmie postać:

$$(4) \quad u_{GRC} = \sum_n u_{nmax} \cos(n\omega_1 t + \alpha_n)$$

dla  $n = 2i+1, i = 0, 1, 2, 3, \dots$ , gdzie  $\omega_1$  - pulsacja napięcia linii zasilającej.

Analogicznie utworzyć można równania dotyczące pozostałych dwóch napięć. Powyższe trzy wejściowe napięcia przemiennie przekształtnika, tworzą system trójfazowy, który można z kolei opisać za pomocą składowych symetrycznych, przy czym:

1. składowe zgodne tworzone są przez harmoniczne o rzędach:

$$(5) \quad n = 3(2i - 1) = 6i + 1, \text{ gdzie } i = 0, 1, 2, 3, \dots$$

2. składowe przeciwne, tworzone przez harmoniczne o rzędach:

$$(6) \quad n = 3(2i - 1) = 6i - 1, \text{ gdzie } i = 1, 2, 3, \dots$$

3. składowe zerowe tworzone są przez harmoniczne o rzędach:

$$(7) \quad n = 3(2i - 1) = 6i - 3 \text{ gdzie } i = 1, 2, 3, \dots$$

Między punktami C - obwodu prądu stałego i 0 - sieci zasilającej nie ma połączenia, zatem można założyć brak składowych zerowych prądu wejściowego przekształtnika. Zatem składowe zerowe (7) wejściowego napięcia przemiennego przekształtnika odkładają się na bardzo dużej impedancji między punktami C i 0. Można, zatem uznać, że również napięcia wejściowe przekształtnika, odniesione do punktu 0 (fazowe napięcia linii zasilającej) utworzone są tylko przez harmoniczne o rzędach określonych równaniami (5) i (6). Fakt ten ujmuje przykładowa zależność:

$$(8) \quad u_{GRO} = \sum_n u_{nmax} \cos(n\omega_1 t + \alpha_n)$$

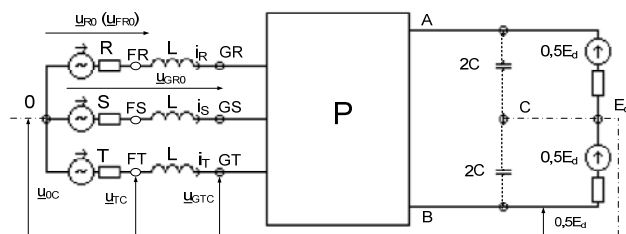
gdzie  $n = |6i \pm 1|, i = 0, 1, 2, 3, \dots$

Zatem przekształtnik sieciowy, który:

1. jest zasilany z symetrycznej linii trójfazowej o napięciach określonych wg wzorów (1÷3)

2. kształtuje wejściowe napięcie przemiennie w linii zasilającej, zawierające wyłącznie składowe zgodne i przeciwne, tworzone przez harmoniczne o rzędach:

**VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

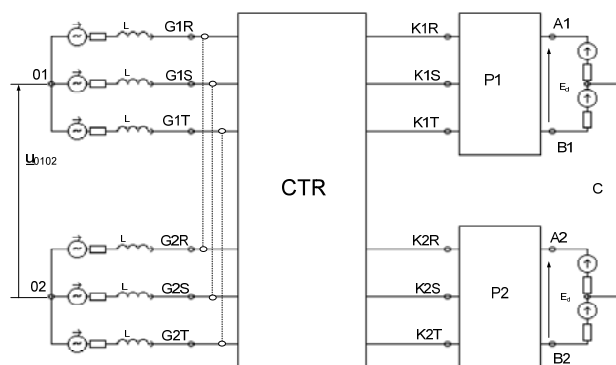


Rys. 1. Schemat układu przekształtnika sześciopulsowego (*P*) współpracującego z symetryczną trójfazową linią zasilającą

$$(9) \quad n = |mi \pm 1|, \text{ dla } i = 0, 1, 2, 3, 4, \dots,$$

można rozpatrywać, jako przekształtnik *m*-pulsowy, generujący *m*-schodkową falę napięcia fazowego na zaciskach przemiennoprądowych (napięcie oznaczone jako  $\vec{u}_{GR0}$  na rysunku 1). Rozdzielając umyślnie linię zasilającą na dwie jednakowe linie składowe, można zastosować koncepcję U. Meiera [1], dotyczącą trójfazowego dławika sprzężonego (*CTR*), który umożliwia takie sprzężenie dwóch sześciopulsowych prostowników pracujących z przesunięciem fazowym  $\pi/6$ , że obydwie linie składowe będą połączone równoległe do zacisków wejściowych układu *CTR*, na których panuje napięcie trójfazowe dwunastopulsowe. Schemat takiego układu pokazany jest na rysunku 2. *CTR* w idealnym przypadku dla harmonicznym prądu o rzędach:

$$(10) \quad n = |12i \pm 1|, \text{ dla } i = 0, 1, 2, 3, \dots,$$



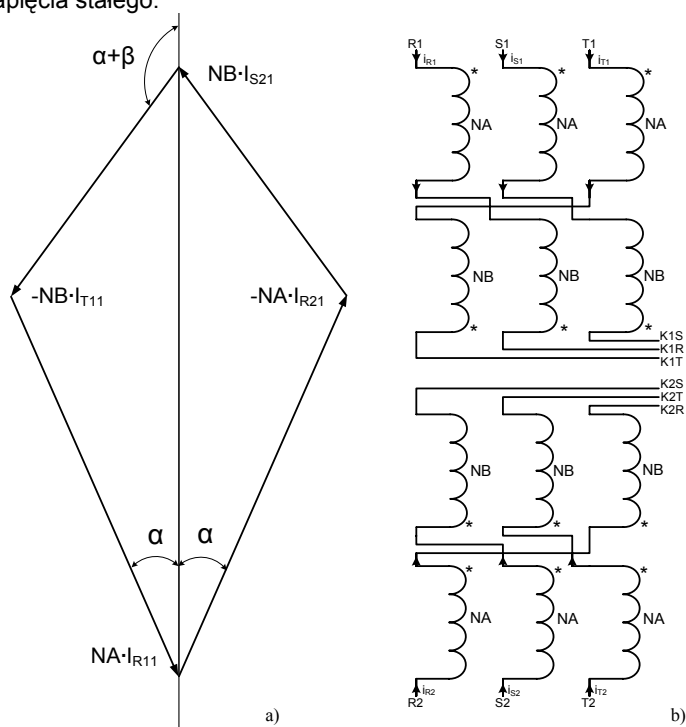
Rys. 2. Schemat układu dwóch prostowników sprzężonych magnetycznie za pomocą systemu *CTR*

przedstawia impedancję praktycznie równą zero. Natomiast dla harmonicznym prądu o rzędach:

$$(11) \quad n = (12i - 6) \pm 1, \text{ dla } i = 1, 2, 3, \dots$$

idealny *CTR* przedstawia nieskończenie dużą impedancję. Właściwości takie uzyskuje się z bardzo dobrym rezultatem dla układu trójkolumnowego rdzenia bez szczelin

powietrznych, wyposażonego na każdej kolumnie w dwa uzwojenia dwusekcyjne. Ponieważ między obydwoma trójfazowymi systemami składowymi *CTR* nie ma połączenia galwanicznego, obydwa prostowniki składowe mogą pracować na wspólny odbiornik napięcia stałego.



Rys. 3. Wektor przestrzenny przepływów (a) związanych z pierwszą harmoniczną prądów uzwojeń *CTR* oraz układ tych uzwojeń (b)

Dla przebiegu napięć wejściowych odpowiednich faz obydwu prostowników składowych, obowiązuje wówczas równanie:

$$(12) \quad u_{G1RC}(\omega_1 t - \frac{\pi}{12}) = u_{G2RC}(\omega_1 t + \frac{\pi}{12})$$

Jako jego rozwiązanie, uzyskuje się selektywny rozdział napięć w postaci następujących szeregów:

1. dla napięcia wejściowego układu *CTR*:

$$(13) \quad u_{G1R01} = \sum_n u_{n\max} \cos \left[ n \left( \omega_1 t + \frac{\pi}{12} \right) + \alpha_n \right]$$

gdzie  $n = |2i \pm 1|$ , dla  $i = 0, 1, 2, 3, \dots$

2. dla napięcia pomiędzy zaciskami wejściowymi i wyjściowymi *CTR* (rys.2):

$$(14) \quad u_{G1RK1R} = \sum_n u_{n\max} \cos \left[ n \left( \omega_1 t + \frac{\pi}{12} \right) + \alpha_n \right]$$

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

gdzie  $n = (12i - 6) \pm 1$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$

3. dla napięcia między środkowymi punktami - linii zasilającej i obwodu napięcia stałego:

$$(15) \quad u_{01C} = \sum_n u_{n\max} \cos \left[ n \left( \omega_1 t + \frac{\pi}{12} \right) + \alpha_n \right]$$

gdzie  $n = 6i - 3$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$

Dla drugiego systemu składowego obowiązują równania analogiczne. Na rysunku 3a zilustrowano wykres wskazowy dotyczący pierwszej harmonicznej przepływów uzwojeń *CTR*, a na rysunku 3b pokazano jeden ze sposobów połączenia dwunastu uzwojeń tego układu. Aby uzyskać opisane właściwości *CTR*, stosunek liczby zwojów *NB/NA* (gdzie *NA* jest liczbą zwojów uzwojenia wejściowego a *NB* liczbą zwojów uzwojenia wyjściowego) należy dobrać tak, aby suma wszystkich przepływów dla harmonicznej podstawowej była równa zero. Wykorzystując wykresy wskazowe, można wyprowadzić następujące zależności:

$$(16) \quad \frac{NB}{NA} = \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

W przypadku, gdy  $2\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 120^\circ$ , uzyskuje się:

$$(17) \quad \frac{NB}{NA} = 0,366.$$

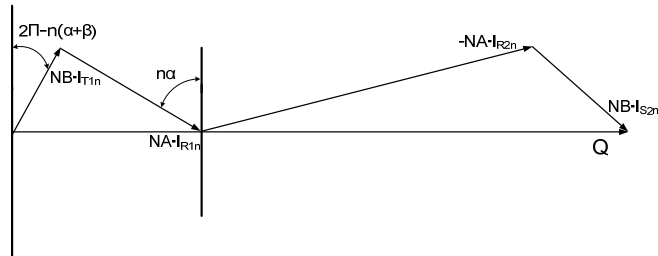
Na rysunku 4 pokazano wektor przestrzenny przepływu piątej harmonicznej ( $n = 5$ ) dla *CTR* z układem uzwojeń wg rysunku 3b. Wykresy wskazowe przepływów dla wyższych harmonicznych, wynikają z wykresów obowiązujących dla harmonicznej podstawowej, jeżeli kąt między wektorami przepływów pomnoży się przez rząd  $n$ . Dla harmonicznych o rządach  $n = 12i \pm 1$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ , otrzymuje się:

$$(18) \quad 2\alpha_n = \frac{\pi}{6}(12i \pm 1) = 2\pi i \pm \frac{\pi}{6} = 2\pi i \pm 2\alpha_1$$

$$(19) \quad \beta_n = \frac{2\pi}{3}(12i \pm 1) = 8\pi i \pm \frac{2\pi}{3} = 8\pi i \pm \beta_1$$

Dla wszystkich harmonicznych o rządach,  $n = |12i \pm 1|$ ,  $i = 0, 1, 2, 3, \dots$  otrzymuje się wykresy wskazowe o jednakowej postaci - z zerowym przepływem wypadkowym. Ponieważ wskutek nieskończenie dużej impedancji między punktami 01, 02 i C nie mogą płynąć prądy składowej zerowej, nie jest konieczne badanie zależności przepływów dla harmonicznych o rządach  $n = 6i - 3$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  przy konfiguracji wg rysunku 2. Dla pozostałych harmonicznych o rządach  $n = (12i - 6) \pm 1$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  uzyskuje się następujące wartości kątów między wektorami przepływów:

$$(20) \quad 2\alpha_n = \frac{\pi}{6}(12i - 6 \pm 1) = \pi(2i - 1) \pm 2\alpha_1$$



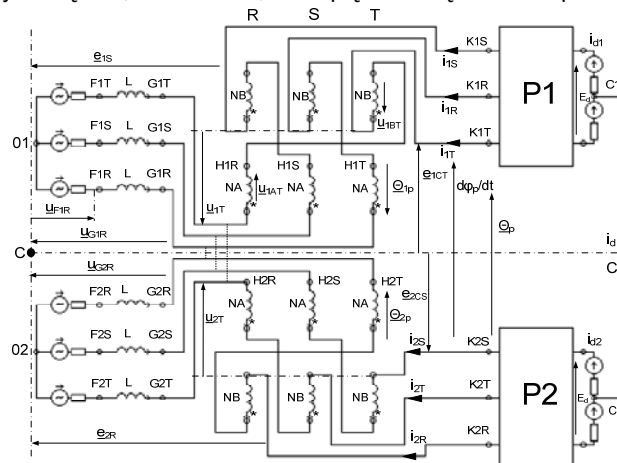
Rys. 4. Wektor przestrzenny przepływu piątej harmonicznej ( $n=5$ ) dla *CTR* z układem uzwojeń według rysunku 3b

$$(21) \quad \beta_n = \frac{2\pi}{3}(12i - 6 \pm 1) = 4\pi(2i - 1) \pm \beta_1$$

gdzie:

$$(22) \quad n = (12i - 6) \pm 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Wykresy wskazowe harmonicznych przepływów o rzędach określonych zależnością (22) mają postać analogiczną jak na rysunku 4. Podczas, gdy dla harmonicznych rzędów  $n = |12i \pm 1|$ ,  $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ , składowe przepływy kolumny rdzenia wynikające z prądów wejściowych jednego prostownika, znoszą odpowiadające dokładnie składowe przepływy od prądów wejściowych drugiego prostownika, to składowe przepływy (o rzędach określonych równaniem (22)) kolumny rdzenia od prądów wejściowych obu prostowników sumują się algebraicznie, dając przepływ całkowity  $\Theta$ . Dla składowych zgodnych i przeciwnych utworzonych z harmonicznych o rzędach  $n = (12i - 6) \pm 1$ , *CTR* przedstawia w idealnym przypadku nieskończenie dużą impedancję. Zatem w napięciach wejściowych układu *CTR* od strony linii zasilającej nie będą występować harmoniczne tych rzędów, co oznacza, że napięcia te są dwunastopulsowe.



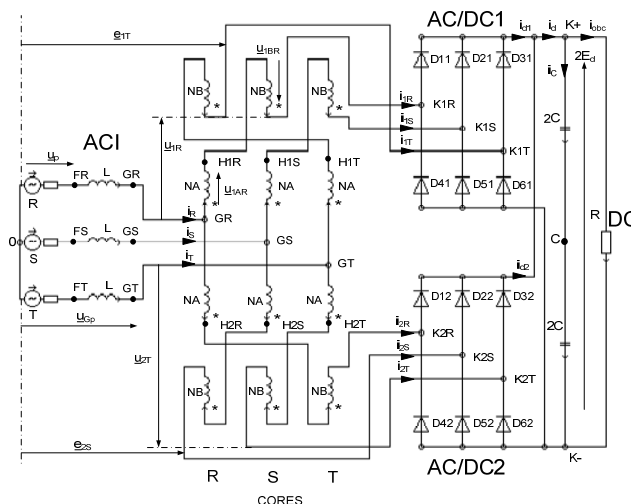
Rys. 5. Schemat układu dwóch prostowników składowych sprzężonych magnetycznie poprzez *CTR* i zasilanych z dwóch symetrycznych linii trójfazowych

Na podstawie schematu z rysunku 2 oraz wariantu konfiguracji uzwojeń z rysunku 3b, można stworzyć, pokazany na rysunku 5, nowy schemat układu z *CTR*, bardzo dogodny

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

do kontynuacji opisu zasady jego działania. Trójfazowy dławik sprzężony *CTR* można teraz podzielić na dwa systemy zasilające ( $q = 1, 2$ ) z trzema przewodami fazowymi ( $p = R, S, T$ ). Każdy przewód fazowy zawiera dwa uzwojenia (*A, B*) o liczbie zwojów *NA* i *NB*, przy czym obydwie uzwojenia umieszczone są na różnych kolumnach rdzenia. W celu poszerzenia ogólności rozważań przyjmuje się, że *CTR* współpracuje z dwiema symetrycznymi trójfazowymi umyślnymi liniami zasilającymi, których każdą fazę można przedstawić w postaci schematu zastępczego, zawierającego indukcyjność sieciową *L* i źródło napięcia sinusoidalnego  $\vec{u}_{qp}$ .

Dławik *CTR* zasilają dwa trójfazowe prostowniki mostkowe o napięciach wejściowych tworzących dwa symetryczne systemy napięciowe trójfazowe ( $\vec{e}_{1Cp}, \vec{e}_{2Cp}$ ) względnie ( $\vec{e}_{1p}, \vec{e}_{2p}$ ) (rys.2). Jeżeli połączymy na rysunku 1 punkty 01 i 02,  $F1p$  i  $F2p$  oraz  $G1p$  i  $G2p$  ( $01= 02= 0$ ;  $F1p= F2p= Fp$ ;  $G1p= G2p= Gp$ ), to obydwie umyślane systemy zasilające zredukują się do jednej linii zasilającej ( $\vec{u}_{F1p} = \vec{u}_{F2p} = \vec{u}_{Fp} = \vec{u}_p$ ). Na rysunku 6 przedstawiono pełny schemat ideowy 12-pulsowego prostownika niesterowanego z trójfazowym dławikiem sprzężonym, który otrzymuje się po dokonaniu powyżej podanych przekształceń układu z rysunku 5.



Rys. 6. Schemat ideowy prostownika dwunastopulsowego z układem *CTR*

Powstały w ten sposób przekształtnik, zasilany jest z sieci trójfazowej o napięciu fazowym  $\vec{u}_p$  ( $p = R, S, T$ ). W jego obwodzie wejściowym znajdują się dławiki sieciowe *L* i trójfazowy dławik sprzężony *CTR*, który sprzęga dwa symetryczne systemy trójfazowe. Po stronie stałoprądowej występują dwa jednakowe sprzętowo układy, obciążone jedną impedancją (*AC/DC1* i *AC/DC2*). Zaciski wyjściowe dławika *CTR* są połączone z gałęziami fazowymi dwóch diodowych, trójfazowych układów mostkowych o równolegle połączonych zaciskach wyjściowych, do których jest podłączony kondensator filtrujący o pojemności *C*. Dławik *CTR* wykonany jest w postaci trzech oddzielnych rdzeni jednofazowych bez szczeliny powietrznej, na których nawinięto po trzy wzajemnie

sprężone uzwojenia. Zadaniem zespołu dławików składających się na  $CTR$ , jest wytworzenie trzech napięć przemiennych  $\vec{u}_{Gp}$ , których przebiegi czasowe przyjmują kształt sinusoidalny przy pracy jałowej i kształt dwunastoschodkowy na okres  $T_1$  napięcia linii zasilającej przy obciążeniach znamionowych. Warunkiem uzyskania dwunastoschodkowych przebiegów czasowych napięć  $\vec{u}_{Gp}$  jest, aby wszystkie diody przewodziły prąd przez pół okresu napięcia linii zasilającej. Symetria dwunastoschodkowych napięć  $\vec{u}_{Gp}$  wynika bezpośrednio z kąta przesunięcia fazowego między stanami przewodzenia odpowiednich zaworów obu mostków, równego  $2\pi/12$ . Dławiki sieciowe  $L$  redukują dodatkowo do żądanej wartości, harmoniczne wyższych rzędów prądów  $\vec{i}_p$ , wywołane odpowiednimi harmonicznymi dwunastoschodkowych przebiegów czasowych napięć trójfazowych  $\vec{u}_p$  [3].

Stosując opisaną powyżej analizę zasady działania przekształtnika dwunastopulsowego z systemem trójfazowych dławików sprężonych, do układu przekształtnika osiemnastopulsowego [7] oraz uwzględniając możliwości modyfikacji (wariant  $\lambda$ , [5]) układu przekształtnika dwunastopulsowego (rys. 6), zaprojektowano i zbudowano model laboratoryjny przekształtnika osiemnastopulsowego o mocy 20kVA. Skrócony opis zasady działania, schemat oraz wyniki badań laboratoryjnych tego układu przedstawiono poniżej.

#### Zasada działania prostownika osiemnastopulsowego

Na rysunku 7 przedstawiono schemat ideowy osiemnastopulsowego prostownika diodowego o pracy równoległej trzech przekształtników trójfazowych mostkowych, pracującego przy obciążeniu pojemnościowym. W szereg ze źródłem zasilającym ( $L_w$  – reaktancja źródła), są włączone dławiki o indukcyjności  $L$ , których zadaniem jest zmniejszenie amplitudy wyższych harmonicznymi prądów pobieranych z sieci przez osiemnastopulsowy prostownik. Równoległą pracą trzech trójfazowych prostowników mostkowych, których napięcia wejściowe są wzajemnie przesunięte w fazie o kąt  $20^\circ$ , realizuje się poprzez zastosowanie dwóch trójfazowych dławików sprężonych: dzielnika prądu  $CDT$  (Current Dividing Transformer) i układu  $CTR\lambda$ , realizującego przesunięcie fazowe wynoszące  $40^\circ$  dla dwóch trójfazowych systemów napięciowych. Podstawowym założeniem przyjętej koncepcji układowej przekształtnika jest utworzenie trzech wektorów przestrzennych napięć trójfazowych przesuniętych wzajemnie o kąt  $20^\circ$ , o sinusoidalnym przebiegu przy pracy jałowej i osiemnastoschodkowym przebiegu przy znamionowym obciążeniu (napięcia  $\vec{u}_{Gp}$ ). Napięcia  $\vec{u}_{Gp}$  mierzone między zaciskami  $Gp$  i punktem neutralnym 0 można interpretować, jako wielkości powstałe w wyniku cyklicznego załączania poprzez diody trzech mostków, napięcia stałego  $2E_d$ . Osiemnastopulsowy przebieg czasowy napięć  $\vec{u}_{Gp}$  uzyskuje się tylko wtedy, gdy kąt przewodzenia diod w poszczególnych prostownikach jest równy  $\pi$ , oraz gdy przedziały przewodzenia (18 przedziałów) są symetrycznie rozłożone w okresie napięcia zasilania. W tym przypadku, każdy z trójfazowych prostowników mostkowych generuje na zaciskach prądu przemiennego system napięciowy o przebiegu sześcioschodkowym. Napięcia fazowe mierzone na zaciskach  $D_1$  (względem punktu neutralnego 0) wyprzedzają o  $20^\circ$  odpowiednie napięcia fazowe mierzone na zaciskach  $D_2$ . Z kolei napięcia fazowe mierzone na zaciskach  $D_3$  są opóźnione w fazie o  $20^\circ$  względem odpowiednich napięć fazowych mierzonych na zaciskach  $D_2$ . Zatem układ  $CTR\lambda$  realizuje  $40^\circ$  przesunięcie fazowe pomiędzy dwoma systemami przypisanych mu napięć wyjściowych.

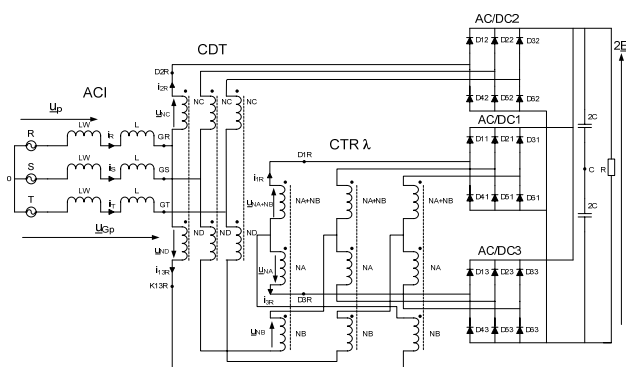


## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Układy elektromagnetyczne  $CDT$  i  $CTR\lambda$  umożliwiają uzyskanie wymaganego podziału prądu pobieranego ze źródła zasilania na poszczególne prostowniki mostkowe. Trzy systemy prądów trójfazowych, które zasilają poszczególne prostowniki, charakteryzuje jednakowa wartość skuteczna prądów fazowych i w przybliżeniu sinusoidalny przebieg tych prądów. Analogicznie jak w przypadku napięć, prądy systemu  $AC/DC1$  ( $i_{1p}$ ) wyprzedzają o  $20^\circ$  prądy systemu  $AC/DC2$  ( $i_{2p}$ ), natomiast prądy systemu  $AC/DC3$  ( $i_{3p}$ ) są w fazie opóźnione o kąt  $20^\circ$  względem systemu  $AC/DC2$ . Efektem działania trójfazowych dławików sprzężonych jest przekształcenie trójfazowego napięcia źródła zasilania w napięcie dziewięciofazowe. Dławiki składają się z trzech oddzielnych rdzeni magnetycznych, na których nawinięte są odpowiednie uzwojenia. Dobór liczby zwojów i ich połączeń wynika z wymaganego przesunięcia fazowego napięć (układ  $CTR\lambda$ ) i wymaganego wstępnego podziału prądu (układ  $CDT$ ).

### Wyniki badań laboratoryjnych

Przeprowadzono badania laboratoryjne układu w wersji przedstawionej na rysunku 7, przy przyjęciu danych, przedstawionych w tabeli 1.

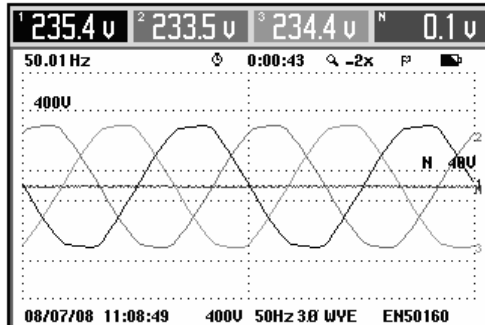


Rys. 7. Schemat ideowy osiemnastopulsowego prostownika niesterowanego z układem  $CDT$  i  $CTR\lambda$

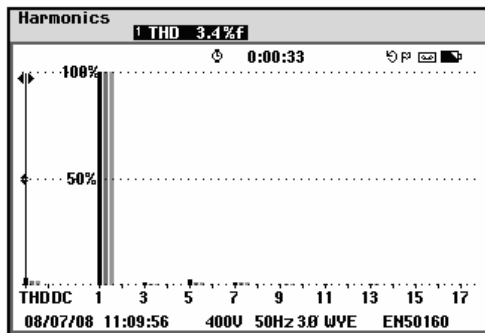
Tabela 1. Parametry laboratoryjnego modelu przekształtnika osiemnastopulsowego

Moc prądu stałego $P_d$	20kW
Znamionowe skuteczne napięcie międzyfazowe $U_o$	400V
Procentowe napięcie zwarcia dławika sieciowego $u_z$	10%
Maksymalna wartość indukcji w rdzeniach $B_m$	1,5T
Liczby zwojów $NA, NB, NC, ND$	87, 47, 84, 46
Indukcyjność dławika sieciowego $L$	2,2mH
Pojemność kondensatora $C$	10mF
Rezystancja obciążenia $R_d$	10,2Ω

Wybrane wyniki badań laboratoryjnych są przedstawione na rysunkach od 8 do 15. Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Energoelektroniki Akademii Morskiej w Gdyni. Niestety, źródło zasilania charakteryzowały częste zakłócenia, które prowadziły do chwilowych odkształceń napięcia sieci zasilającej (rys.8, 9).



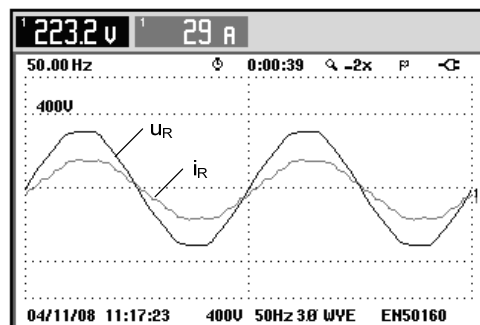
Rys. 8. Oscylogramy napięć fazowych sieci laboratoryjnej



Rys. 9. Analiza spektralna napięć fazowych sieci laboratoryjnej

Przebiegi czasowe napięć i prądów, podane na rysunkach od 10 do 15, są zgodne z przyjętymi powyżej oraz w [7] założeniami i przebiegami pokazanymi również w [7], a uzyskanymi w wyniku symulacji.

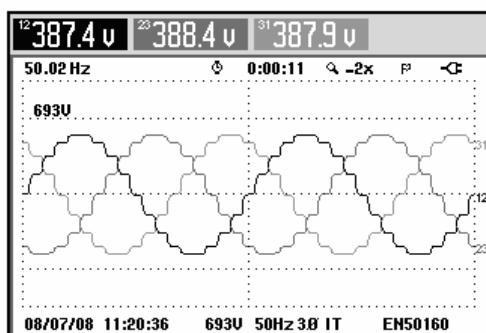
Prąd pobierany ze źródła zasilania ma przebieg czasowy odbiegający tylko nieznacznie od przebiegu sinusoidalnego (rys.10). Przyjęte 10% napięcie zwarcia powoduje, że przebieg czasowy prądu jest przesunięty w fazie względem napięcia źródłowego, o około  $8^\circ$  ( $\cos \varphi_1 \approx 0,99$ ).



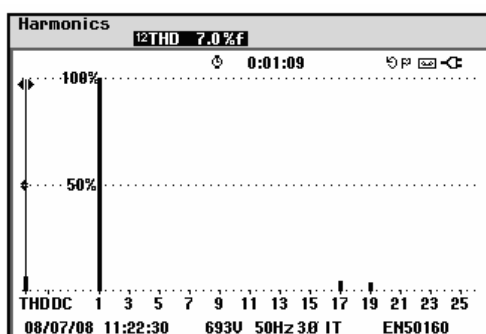
Rys. 10. Oscylogramy napięcia sieci zasilającej  $u_R$  oraz prądu sieci  $i_R$  z widocznym niewielkim wzajemnym przesunięciem fazowym

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

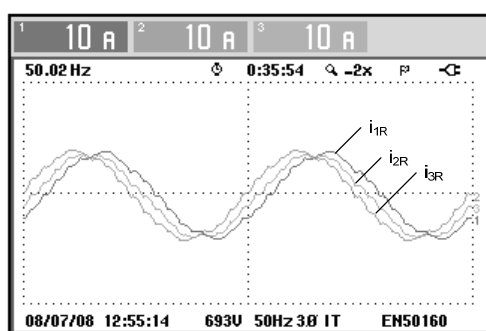
Napięcie na zaciskach wyjściowych układu *CDT*, mierzone względem punktu neutralnego sieci zasilającej, ma przebieg osiemnastoschodkowy (rys.11, 12).



Rys. 11. Oscylogramy międzyfazowych napięć osiemnastoschodkowych  $u_{Gp}$

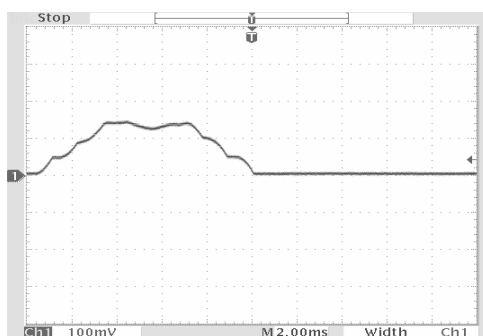


Rys. 12. Analiza spektralna napięcia osiemnastoschodkowego fazy *R*



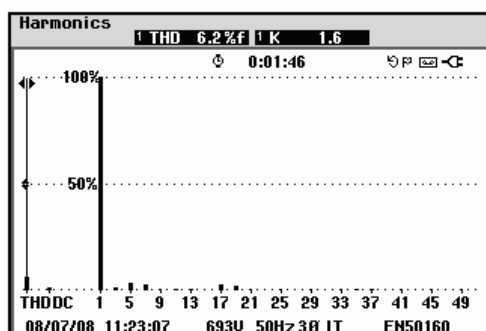
Rys. 13. Oscylogramy prądów  $i_{1R}$ ,  $i_{2R}$ ,  $i_{3R}$  zasilających składowe prostowniki diodowe z widocznym wzajemnym przesunięciem fazowym

Prądy dopływające do prostowników AC/DC1, AC/DC2 i AC/DC3, są wzajemnie przesunięte w fazie o kąt  $20^\circ$  - prąd  $i_{1R}$  wyprzedza w fazie prąd  $i_{3R}$  o  $40^\circ$  i prąd  $i_{2R}$  o  $20^\circ$  (rys.13). Kąty przewodzenia diod w prostownikach są zbliżone do  $180^\circ$  (rys.14).



Rys. 14. Oscylogram prądu diody D12 przekształtnika AC/DC2, z widocznym czasem przewodzenia zbliżonym do  $180^\circ$

W przebiegu czasowym prądu pobieranego ze źródła zasilania, praktycznie nie występują harmoniczne 11 i 13, a harmoniczne 17 i 19 są silnie tłumione (rys.15). Współczynnik THD jest równy w przybliżeniu 6.2%.



Rys. 15. Analiza spektralna prądu linii zasilającej rozpatrywany przekształtnik osiemnastopulsowy

Wyniki badań eksperymentalnych, upoważniają do stwierdzenia, że układ działa poprawnie, a uzyskane przebiegi czasowe są w dostatecznym stopniu zbliżone do wyników teoretycznych [7].

### Wnioski

Przedstawiona powyżej analiza oraz wyniki badań laboratoryjnych a także zaprezentowane w [3, 4, 6, 7] wyniki badań symulacyjnych, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- połączenie równoległe dwóch lub trzech prostowników mostkowych trójfazowych w układzie z trójfazowym dławikiem sprzężonym, wykazuje istotne zalety w stosunku do rozwiązań klasycznych (układy z transformatorem o dwóch lub więcej uzwojeniach wtórnych i dławikiem kojarzącym): mała moc gabarytowa dławika, bezpośrednie zasilanie z sieci przemysłowej niskiego napięcia

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

- przy znamionowym obciążeniu prądy pobierane ze źródła zasilania zawierają tylko harmoniczne rzędu  $12k \pm 1$ , ( $k=1,2,3,\dots$ ), które są częściowo tłumione przez dławiki włączone w obwód źródła zasilania
- główna korzyść ze stosowania dławika sprzężonego, polega w sposób widoczny na zmniejszeniu udziału prądów wyższych harmonicznym w systemie AC
- przebiegi charakterystycznych napięć i prądów badanego układu laboratoryjnego, potwierdzają prawidłowość jego działania i zasad projektowania
- prezentowane układy charakteryzują się wysoką sprawnością i zbliżonym do jedności współczynnikiem mocy
- z uwagi na małe moce elementów magnetycznych, koszt budowy prezentowanego modelu laboratoryjnego można uznać za stosunkowo niski
- na uwagę zasługuje prostota i wysoka niezawodność rozpatrywanych układów
- zakres zastosowań wydaje się być szeroki. Interesująca jest potencjalna możliwość zastosowania w układach zasilanych napięciem o podwyższonej częstotliwości.

### LITERATURA

- [1] Humphrey A. J., Mokrytzki B. Inverter paralleling reactors. International Power Conference, Baltimore, Mai, 1972; *IEEE New York* 1972, p.244-246.
- [2] Miyairi S. New method for reducing harmonics involved in input and output of rectifier with interphase transformer. *IEEE Trans. on Ind. Applic.* 1986.
- [3] Mysiak P. The DC-output multipulse converter in the low voltage power network supply conditions (in Polish). *The doctors thesis dissertation*, Warsaw Technical University, Warsaw 1996.
- [4] Mysiak P. The three-phase coupling reactors system supplying multi-pulse DC-output current converter - the design method and simulation tests results (in Polish), *Conf. Proc. SENE*, Łódź, 2001.
- [5] Mysiak P. A 24-pulse diode rectifier with coupled three-phase reactor. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 30, No. 7, pp. 1189-1204 (2007), ISSN 0253-3839, National Taiwan University of Science and Technology.
- [6] Mysiak P. A multi-pulse diode rectifier with a coupled three-phase reactor – the design method and results of the simulation and laboratory tests. *Proc. of the IX<sup>th</sup> International Conference Problems of Present-day Electrotechnics-2006*, Institute of Electrodynamics of Ukrainian National Academy of Science, Kijów 2006, ISSN 0204-3599.
- [7] Mysiak P. Eighteen-pulse diode rectifier with three-phase coupled reactors. *Archives of Electrical Engineering*, Vol. L, No 1, Warsaw, 2001.
- [8] Tunia H., Barlik R., Mysiak P. The parallel connection of two three-phase diode rectifiers with three-phase coupling reactors system. (in Polish) *Electrical Power Quality and Utilisation Journal*, Volume IV, Book II, AGH University of Science and Technology, Cracow, 1998.
- [9] Tunia H., Barlik R., Mysiak P. The three-phase coupled reactors system for current higher harmonics reducing in the three-phase load supplying from voltage source inverters. (in Polish) *Electrical Power Quality and Utilisation Journal*, Volume IV, Book I, AGH University of Science and Technology, Cracow, 1998.

**Autor:** dr inż. Piotr Mysiak, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: [mysiak@am.gdynia.pl](mailto:mysiak@am.gdynia.pl).

