

Modulator prądu w tyrystorowych złożonych układach prostownikowych mocy

Streszczenie. W artykule zaprezentowano rozwiązania umożliwiające polepszenie jakości przekształcania energii w tyrystorowych złożonych układach prostownikowych. W pierwszej części opisano rozwiązanie bazujące na zastosowaniu w obwodzie stałoprądowym modulatora napięcia. Odznacza się ono jednak dość istotnymi wadami. Dlatego też przedstawiono inną metodę zmniejszenia niekorzystnego oddziaływania na sieć zasilającą tych układów poprzez wykorzystanie koncepcji wykorzystującej modulację prądu, stosowaną dotychczas w prostownikach diodowych. Zaprezentowano również wybrane wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych.

Abstract. The article presents solutions for improving the quality of energy conversion in thyristor complex rectifier systems. The first part describes a solution based on the use of a voltage modulator in the DC circuit. However, it has quite significant drawbacks. Therefore, another method of reducing the negative impact on the supply network of these systems was presented, using the concept of current modulation applied so far in diode rectifiers. Selected results of simulation tests are also presented. (**Current modulator in thyristor complex power rectifier systems**)

Słowa kluczowe: złożone układy prostownikowe, modulator napięcia, modulator prądu, THD.

Keywords: complex rectifier circuits, voltage modulator, current modulator, THD.

Wstęp

Niekorzystne oddziaływanie klasycznych układów prostownikowych zarówno diodowych, jak i tyrystorowych, można m.in. ograniczyć, wykorzystując przekształtniki o zwielokrotnionej liczbie pulsów (p), tzw. układy złożone. W praktyce najczęściej stosuje się układy 6-cio, 12-sto oraz rzadziej 18-sto pulsowe. W celu zwiększenia liczby pulsów łączy się szeregowo, bądź równolegle mostki prostownicze, których napięcia zasilające przesunięte są względem siebie o kąt wynoszący:

$$(1) \quad \delta = \frac{2\pi}{np_j}$$

gdzie: n – liczba połączonych prostowników składowych, p_j – liczba pulsów pojedynczego prostownika składowego.

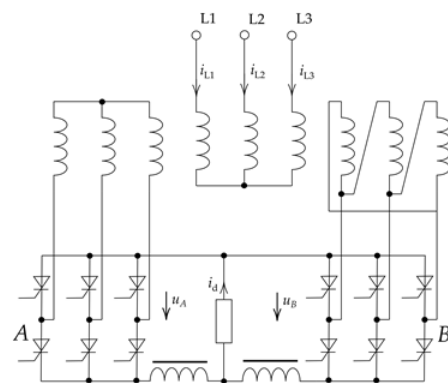
Przesunięcie to uzyskiwane jest poprzez zastosowanie transformatorów energetycznych o odpowiednio dobranej grupie połączeń. Wartości współczynników THD prądów sieciowych takich układów w przypadku idealnego źródła zasilającego i odbiornika o charakterze źródła prądowego (prąd odbiornika idealnie wygładzony) wynoszą odpowiednio: 31% (dla $p = 6$), 15% (dla $p = 12$) oraz 9.6% (dla $p = 18$) [1]. Zwiększenie indukcyjności sieci, np. poprzez stosowanie dodatkowych dławików lub transformatorów o zwiększonej indukcyjności rozproszenia, umożliwia dalsze zmniejszenie wartości współczynników THD prądów zasilających. Jednak powoduje to również m.in. wzrost niepożądanych komutacyjnych załamań napięcia zasilającego. Dlatego też poszukuje się innych sposobów w celu minimalizacji odkształceń prądów pobieranych z sieci energetycznej [2].

Jednym z takich rozwiązań jest wykorzystanie filtrów pasywnych. Wymaga to jednak stosowania dodatkowych elementów, często o znacznych gabarytach. Ponadto w niektórych systemach może to przyczynić się do powstawania niekorzystnych zjawisk, co wyklucza ich stosowanie. Można rozważyć również wykorzystanie aktywnych filtrów równoległych, zwanych także aktywnymi kompensatorami równoległymi. O ile pozwalają one dość skutecznie zredukować niepożądane wyższe harmoniczne prądów sieciowych oraz moc bierną pobieraną z sieci, to jednak charakteryzują się dość znacznym stopniem komplikacji, zwiększając tym samym wymagane nakłady inwestycyjne.

W niniejszym artykule zaproponowano inny sposób na poprawę jakości przekształcania energii w układach prostownikowych, a mianowicie wykorzystanie modulacji w obwodzie stałoprądowym. Rozwiązanie to możliwe jest do zastosowania w przypadku prostownikowych układów złożonych o połączeniu równoległym [3, 4]. Bardzo atrakcyjne wydaje się zwłaszcza rozwiązanie bazujące na tzw. modulatorze prądu. Uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają, że koncepcja ta nie tylko jest skuteczna w przypadku prostowników diodowych, ale również (po pewnych modyfikacjach) prostowników tyrystorowych, co jest głównym tematem artykułu.

Modulator napięcia w prostowniku tyrystorowym

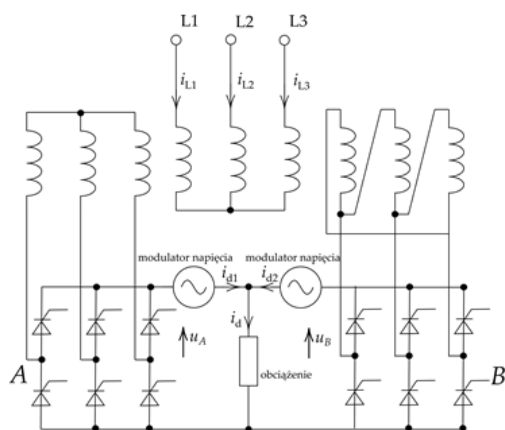
Schemat klasycznego złożonego prostownika tyrystorowego 12-pulsowego o połączeniu równoległym składowych mostków zaprezentowano na rys. 1



Rys. 1. Schemat ideowy 12-pulsowego prostownika tyrystorowego o połączeniu równoległym

W tym przypadku konieczne jest stosowanie dławików wyrównawczych, które rozprzegają składowe mostki prostownicze. Odkłada się na nich napięcie wyrównawcze o częstotliwości równej sześciokrotnej częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia sieciowego. W celu wyeliminowania ryzyka nasycenia dławików konieczne jest spełnienie warunku symetrii napięć wyjściowych składowych prostowników (równość ich wartości średnich). Układ ten jest powszechnie wykorzystywany od lat m.in. w systemach trakcyjnych [5, 6].

W celu poprawy jakości sygnałów prądowych pobieranych z sieci można zastosować dodatkowo modulator napięcia po stronie stałoprądowej [6]. Schemat ideowy takiego rozwiązania został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Schemat ideowy prostownika tyrystorowego z modulatorem napięcia po stronie stałoprądowej

Prądy wyjściowe opisane są odpowiednio następującymi zależnościami:

$$(2) \quad i_{d1}(t) = \frac{I_d}{2} \pm \Delta i_d(t)$$

$$(3) \quad i_{d2}(t) = \frac{I_d}{2} \mp \Delta i_d(t)$$

gdzie: I_d – wartość średnia prądu odbiornika, $\Delta i_d(t)$ – przyrost składowej modulującej prądu.

Poprzez odpowiednio zwiększanie, bądź zmniejszanie obu prądów wyjściowych mostków o składową modulującą możliwe jest kształtowanie ich prądów zasilających, a w konsekwencji również oddziaływanie na kształt wypadkowych prądów sieci w poszczególnych fazach.

Zastosowanie tego rozwiązania nie jest możliwe w przypadku połączenia szeregowego układów prostownikowych. Tylko bowiem połączenie równoległe zapewnia stałość prądu obciążenia mimo modulacji ich prądów wyjściowych:

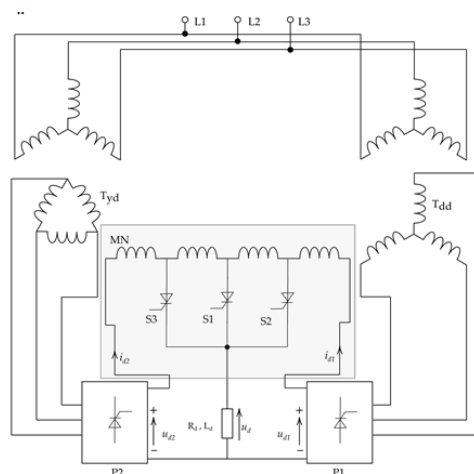
$$(4) \quad i_d(t) = i_{d1}(t) + i_{d2}(t)$$

W układzie prostownikowym o połączeniu równoległym dwóch mostków składowa modulująca prąd wyjściowy pojedynczych układów jest równa prądowi magnesującemu dławików wyrównawczych i nie przekracza około 4% prądu wyjściowego. Zastosowanie modulatora napięcia po stronie stałoprądowej umożliwia znaczący wzrost tej składowej. Na rys. 3 zaprezentowano schemat części silnopiędowej złożonego prostownika tyrystorowego z modulatorem napięcia po stronie stałoprądowej. Składowe prostowniki w układzie mostkowym (3T-3T) zasilane są z napięć fazowych przesuniętych odpowiednio względem siebie o kąt $\pi/6$. Przesunięcie to zrealizowano za pomocą dwóch transformatorów o grupach połączeń odpowiednio gwiazda-gwiazda oraz gwiazda-trójkąt. Modulator napięcia w obwodzie prądu stałego składa się z: dławika wyrównawczego, nazywanego też transformatorem międzyfazowym z trzema odczepami oraz zaworów (klasycznych tyrystorów SCR): S1, S2, S3.

Przy założeniu symetrii przepływów dla transformatora międzyfazowego przy załączonym tyrystorze S3 otrzymujemy równanie:

$$(5) \quad \left(\frac{Z_D}{2} + Z_x\right) i_{d1}(t) = \left(\frac{Z_D}{2} - Z_x\right) i_{d2}(t)$$

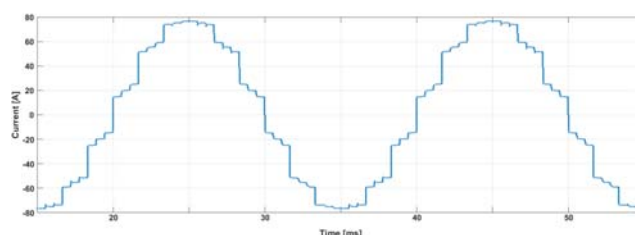
gdzie: $i_{d1}(t)$, $i_{d2}(t)$ – prądy wyjściowe prostowników składowych, Z_D – całkowita liczba zwojów transformatora międzyfazowego, Z_x – liczba zwojów między odczepami 1-2 lub 1-3 transformatora międzyfazowego.



Rys. 3. Część silnopiędowa prostownika tyrystorowego z modulatorem napięcia

Opis układu sterowania tyrystorami S1, S2 oraz S3 został pominięty jako, że prezentowany układ nie jest głównym tematem niniejszego artykułu [7, 8]. Należy jednak mieć na uwadze, że ich kąty wysterowania (załączenia) zależne są od kątów załączenia tyrystorów składowych mostków prostowniczych.

W wyniku zastosowania prezentowanego rozwiązania możliwe jest polepszenie jakości przekształcanej energii. Dominującymi harmonicznymi w prądzie sieci poza podstawową są harmoniczne rzędu 35 oraz 37. Można zatem wnioskować, że układ ma charakter prostownika 36-pulsowego. W wyniku zwielokrotnienia liczby pulsów nie tylko poprawie ulega kształt prądów sieciowych (rys. 4), ale uzyskuje się również napięcie wyprostowane o większym stopniu wygładzenia.



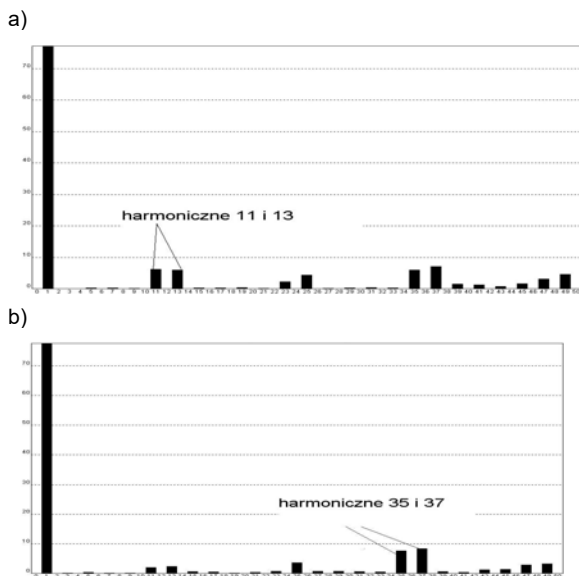
Rys. 4. Wypadkowy prąd sieci jednej z faz dla prostownika tyrystorowego z modulatorem napięcia w obwodzie DC

Niestety harmoniczne charakterystyczne dla klasycznego układu 12-pulsowego nadal są zauważalne, choć ich amplitudy zostały znacząco zredukowane. Wyniki porównawcze badań symulacyjnych (dla układu bez oraz z modulatorem napięcia) zaprezentowano na rys. 5.

Prezentowany układ złożonego równoległego prostownika tyrystorowego z modulatorem napięcia niestety charakteryzuje się również istotnymi wadami, a mianowicie:

- moc układu modulatora napięcia jest porównywalna mocą obciążenia,
- ze względu na przenoszoną moc kluczowe półprzewodnikowe zastosowane do budowy modulatora poddane są dużym obciążeniom cieplnym (co pogarsza sprawność systemu),

- konieczność stosowania specjalnie wykonanego dławika wyrównawczego zwanego transformatorem międzyfazowym,
- stosunkowo nieznaczna poprawa jakości prądów pobieranych z sieci w porównaniu z klasycznym układem 12-pulsowym,
- modulacja napięcia powoduje wzrost liczby komutacyjnych załamań napięcia sieciowego, co może powodować niewłaściwą pracę innych odbiorników podłączonych do tego samego węzła sieci energetycznej, a w skrajnym przypadku prowadzić nawet do ich uszkodzenia.



Rys. 5. Analiza widmowa prądu sieciowego dla kąta załączenia 90°: a) układ bez modulatora (THD=15,7%), b) układ z modulatorem napięcia (THD=9%)

Z powodu wyżej przedstawionych wad niniejszego rozwiązania autorzy postanowili zaadoptować wykorzystywane w ramach wcześniej prowadzonych prac koncepcję bazującą na modulatorze prądu (MP). Dotychczas stosowano ją w układach prostowników diodowych [8]. Jak wykazały jednak dalsze badania rozwiązanie to można rozszerzyć również na układy tyrystorowe po pewnych modyfikacjach układu sterowania, co opisano w dalszej części artykułu.

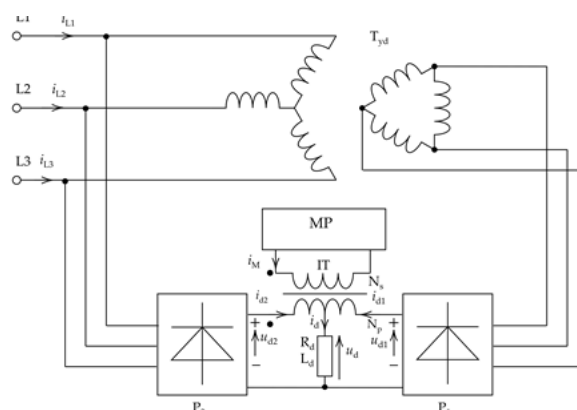
Modulator prądu w prostowniku diodowym

Rys. 6 przedstawia schemat ideowy układu złożonego prostownika diodowego z modulatorem prądu MP w obwodzie stałoprądowym. Diodowe mostki prostownicze (P_1) i (P_2) zasilane są z transformatorów energetycznych o połączeniach gwiazda-gwiazda oraz gwiazda-trójkąt w celu zapewnienia przesunięcia fazowego napięć zasilających o kąt $\pi/6$, analogicznie, jak w przypadku wcześniej opisywanych układów. Należy jednak zaznaczyć, że stosowanie transformatora o grupie połączeń gwiazda-gwiazda nie zawsze jest wymagane. W celu uzyskania odpowiedniego kąta przesunięcia fazowego napięć zasilających składowe mostki możliwe jest zastosowanie transformatora o połączeniu gwiazda-trójkąt. Drugi mostek może być zasilany bezpośrednio z sieci, jeśli warunki pracy systemu na to pozwalają. Wariant ten przedstawiono na rys. 6. Należy w tym przypadku zwrócić uwagę na konieczność zastosowania dodatkowych dławików w obwodzie zasilającym prostownika P_2 w celu minimalizacji niesymetrii wynikającej z parametrów zastosowanego transformatora zasilającego prostownik P_1 . Przyczynia się to nie tylko do

obniżenia kosztów, ale również i polepszenia sprawności energetycznej układu. Po stronie stałoprądowej mostki połączone są za pomocą szerokopasmowego transformatora impulsowego (IT) z dodatkowym uzwojeniem, w którego obwód – po stronie pierwotnej – włączony jest energetyczny modulator prądu będący sterowanym źródłem prądowym. Za pośrednictwem transformatora impulsowego IT przemienny prąd modulatora jest odpowiednio dodawany (ze znakiem „+” lub „-”) do prądów wyjściowych każdego z prostowników składowych. Jeżeli transformator impulsowy jest nienasycony to równanie przepływu ma następującą postać:

$$(6) \quad N_p (i_{d2}(t) - i_{d1}(t)) = N_s i_M(t)$$

gdzie: N_s , N_p – liczba zwojów transformatora trójzwojeniowego IT odpowiednio po stronie pierwotnej i wtórnej, $i_M(t)$ – prąd modulatora.



Rys. 6. Schemat ideowy obwodu silnopiętowego układu prostownika diodowego z modulatorem prądu

Zakładając równość wartości średnich prądów wyjściowych prostowników ($I_{d1} = I_{d2}$) oraz wiedząc, że prąd odbiornika I_d jest ich sumą, można wyprowadzić zależności opisane równaniami (7) oraz (8).

$$(7) \quad i_{d1}(t) = \frac{1}{2} \left(I_d - \frac{N_s}{N_p} i_M(t) \right)$$

$$(8) \quad i_{d2}(t) = \frac{1}{2} \left(I_d + \frac{N_s}{N_p} i_M(t) \right)$$

Jak z nich wynika poprzez zastosowanie modulatora prądu możliwe jest kształtowanie prądów wyjściowych składowych prostowników, a w konsekwencji również ich prądów wyjściowych oraz wypadkowego prądu sieciowych w poszczególnych fazach. Szczegółowo rozwiązanie to zostało zaprezentowane w ramach wcześniejszych publikacji [3, 9, 10, 11].

W celu uzyskania sinusoidalnego prądu sieci danej fazy modulator prądu powinien generować sygnał wyrażony zależnością (10).

$$(9) \quad i_{MPref1}(t) = \frac{I_d}{2N} \frac{2\sqrt{3} I_d \sin(\omega_g t) - (i_{A1}(t) + \sqrt{3}i_{A2}(t))}{i_{A1}(t) - \sqrt{3}i_{A2}(t)}$$

gdzie: i_{MPref1} - prąd referencyjny modulatora prądu, i_{A1} , i_{A2} - prądy fazowe uzwojeń wtórnych transformatorów energetycznych o grupach połączeń odpowiednio: gwiazda

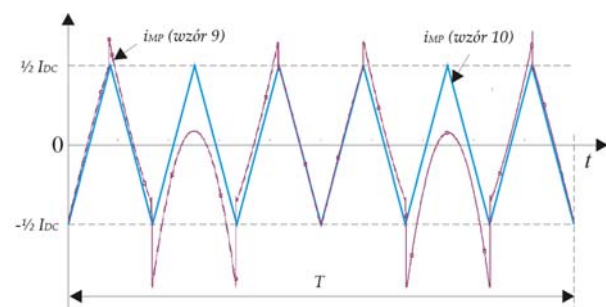
i trójkąt (jeśli takowy został użyty), N - przekładnia transformatora impulsowego IT.

Należy jednak zaznaczyć, że zastosowanie prądu referencyjnego dla modulatora prądu określone wzorem (9) umożliwia uzyskanie prądu sieci sinusoidalnego tylko dla jednej z faz (teoretyczna wartość współczynnika THD wynosi w tym przypadku 0%). Przy konieczności poprawy jakości prądów zasilających trzech faz wymagane jest zapewnienie sygnału modulatora prądu charakteryzującego się jednakowym przesunięciem fazowym względem podstawowych harmonicznych napięć sieciowych poszczególnych faz. Uzyskanie takiego efektu w rozpatrywanym rozwiązaniu jest jednak niemożliwe, ze względu na jednoczesne oddziaływanie na kształtowane prądy wejściowe prostowników diodowych P_1 i P_2 (a zatem i wypadkowe prądy sieciowe) tego samego sygnału generowanego przez modulator MP. W związku z tym zastąpiono sygnał referencyjny modulatora prądu opisany zależnością (9) sygnałem trójkątnym o częstotliwości równej 6-krotnej wartości częstotliwości podstawowej harmonicznej napięć sieciowych opisany wzorem (10).

(10)

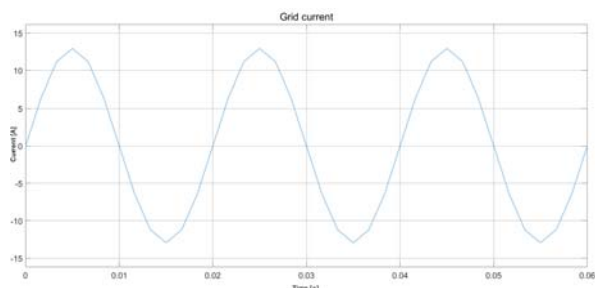
$$i_{MPref2} = \frac{4 I_d}{\pi N} \left[\frac{\sin(1 \cdot 6\omega t)}{1^2} - \frac{\sin(3 \cdot 6\omega t)}{3^2} + \frac{\sin(5 \cdot 6\omega t)}{5^2} - \dots \right]$$

Na rys. 7 zaprezentowano sygnały referencyjne modulatora prądu opisane odpowiednio wzorami (9) oraz (10).

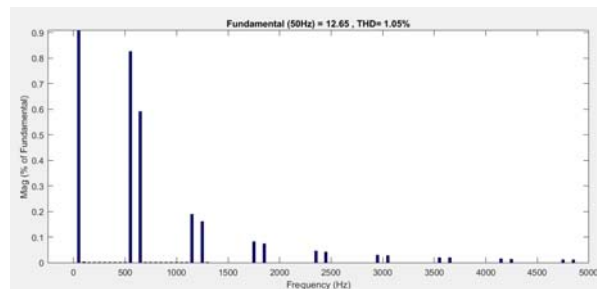


Rys. 7. Sygnały referencyjne dla modulatora prądu

Na podkreślenie zasługuje fakt, że teoretyczna wartość współczynnika THD prądów sieci w tym przypadku nie przekracza 1-2%, co potwierdzone zostało zarówno badaniami symulacyjnymi, jak i eksperymentalnymi [11-13]. Przykładowy przebieg prądu sieci prostownika diodowego z modulatorem prądu oraz jego analizę widmową zaprezentowano na rys. 8 i 9.



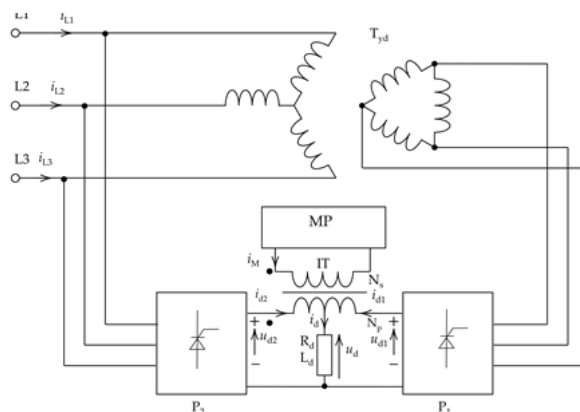
Rys. 8. Wypadkowy prąd sieci jednej z faz dla prostownika diodowego z modulatorem prądu w obwodzie DC



Rys. 9. Analiza widmowa wypadkowego prądu sieci dla prostownika diodowego z modulatorem prądu (THD=1,05%)

Modulator prądu w prostowniku tyrystorowym

Ponieważ koncepcja wykorzystania modulatora prądu w prostowniku diodowym dała bardzo dobre rezultaty, jeśli chodzi o poprawę jakości przekształcanej energii, postanowiono ją zaadoptować do złożonych równoległych prostowników tyrystorowych. W trakcie prowadzonych badań założono, że prąd odbiornika jest idealnie wygładzony. Schemat ideowy części energetycznej układu zaprezentowano na rys. 10.



Rys. 10. Schemat ideowy obwodu silnoprądowego układu prostownika tyrystorowego z modulatorem prądu MP

Część silnoprądowa układu jest analogiczna, jak w przypadku prostownika diodowego z wyjątkiem faktu zastąpienia składowych prostowników diodowych układami tyrystorowymi - zastosowano klasyczne tyrystory SCR.

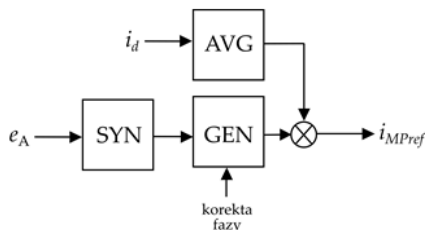
Podobnie, jak w przypadku opisywanego prostownika diodowego rozważyć można dwa przypadki oddziaływania modulatora na wypadkowe prądy sieci. Dla pierwszego z nich istnieje możliwość uzyskania sinusoidalnego prądu zasilającego tylko dla wybranej fazy (teoretyczna wartość współczynnika THD wynosi 0%). W tym przypadku jednak prądy pozostałych faz będą odznaczać się większym odkształceniem (mniejszym jednak niż w przypadku klasycznego układu 12-pulsowego pozbawionego modulatora prądu).

Korzystniejszym jednak wariantem jest poprawa kształtu prądów wszystkich faz źródła zasilającego (wartość teoretyczna współczynnika THD prądów sieciowych wynosi około 1% - analogicznie, jak w przypadku prostowników diodowych). Wzór na sygnał referencyjny dla modulatora prądu w tym przypadku opisany jest zależnością:

$$(11) \quad i_{MPref}(t) = i_{MPref2}(t - w)$$

gdzie: i_{MPref2} - sygnał opisany wzorem (10), w - kąt przesunięcia fazowego zależny od kąta wysterowania tyrystorów składowych mostków prostowniczych.

W przypadku złożonego prostownika tyrystorowego należy uwzględnić dodatkowo w opisie sygnału referencyjnego kąt przesunięcia fazowego (w), który jest równy kątowi załączenia (α_z) tyrystorów SCR. Analizując przebiegi prądów wejściowych (przy założeniu, że odbiornik ma charakter źródła prądowego wymuszając tym samym wygładzony prąd wyjściowy o stałej wartości) zauważyć możemy, że ich kształt jest niezmienny w funkcji kąta załączenia i identyczny, jak w przypadku prostowników diodowych. Różnica natomiast polega na pojawieniu się dodatkowego przesunięcia fazowego zależnego od aktualnego wysterowania kluczy obu mostków. Uproszczony układ wyznaczania sygnału referencyjnego dla modulatora prądu zaprezentowano na rys. 11.



Rys. 11. Schemat blokowy układu wyznaczania sygnału referencyjnego modulatora prądu

Układ ten składa się z następujących bloków:

- układu synchronizacji z podstawową harmoniczną napięcia sieci jednej z faz (SYN),
- generatora sygnału trójkątnego (GEN) o częstotliwości równej 6-krotnej wartości częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia sieci i jednostkowej amplitudzie,
- układu wyznaczania wartości średniej prądu odbiornika (AVG),
- węzła mnożącego.

W pierwszej kolejności następuje synchronizacja sygnału trójkątnego z podstawową harmoniczną napięcia sieci w celu określenia wstępnego przesunięcia fazowego sygnału. Następnie następuje korekta fazy, która zależna jest od kąta wysterowania tyrystorów SCR układów mostkowych. W końcowym etapie ustalana jest wartość amplitudy sygnału, która jest zdefiniowana przez wartość średnią prądu obciążenia oraz przekładnię transformatora impulsowego IT wg wzoru:

$$(12) \quad I_{MMPref} = \frac{I_d}{2N}$$

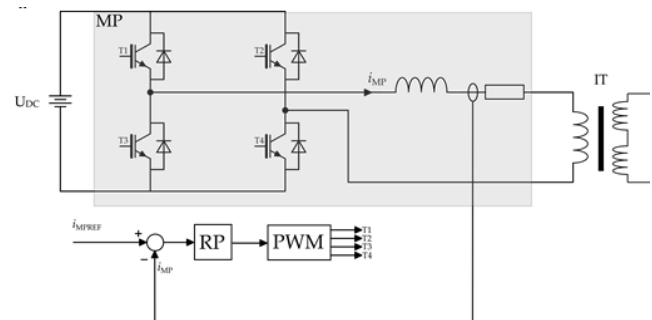
gdzie: I_{MMPref} – amplituda sygnału referencyjnego modulatora prądu MP, I_d – wartość średnia prądu odbiornika, N – przekładnia transformatora impulsowego.

Część silnoprądowa, jak i sterująca modulatora prądu jest analogiczna, jak w przypadku prostownika diodowego. Bazuje na mostku tranzystorowym z dolnoprzepustowym filtrem indukcyjnym. Układ ten pracuje w regulacji nadążnej prądu, stanowiąc tym samym sterowane energoelektroniczne źródło prądowe, które w przypadku omawianego układu pełni funkcję modulatora prądu. Aby było możliwe niezależne kształtowanie jego prądu wyjściowego należy zaznaczyć, że napięcie w obwodzie zasilającym U_{DC} musi mieć wartość wyższą niż amplituda napięcia po stronie pierwotnej transformatora impulsowego IT. Schemat ideowy przedstawiono na rys. 12. Bloki (RP) oraz (PWM) oznaczają odpowiednio: regulator prądu oraz modulator szerokości impulsów.

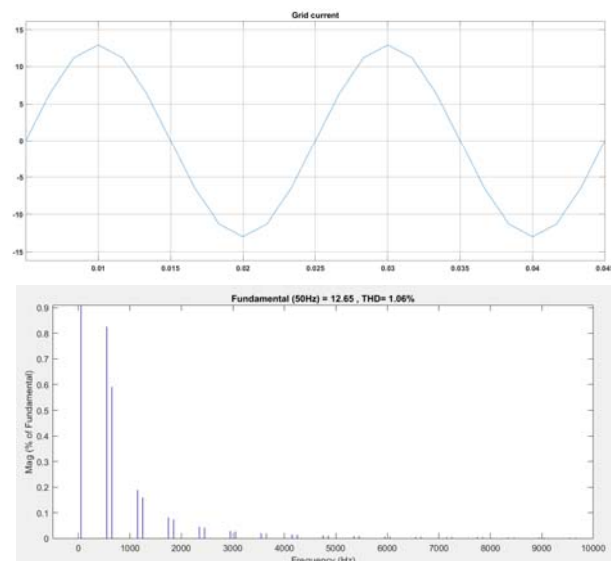
Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły skuteczność modulacji prądów po stronie stałoprądowej również w przypadku prostowników tyrystorowych. Na rysunkach 13

oraz 14 przedstawiono przebiegi prądu sieci dla wybranej fazy oraz jego analizę widmową odpowiednio dla:

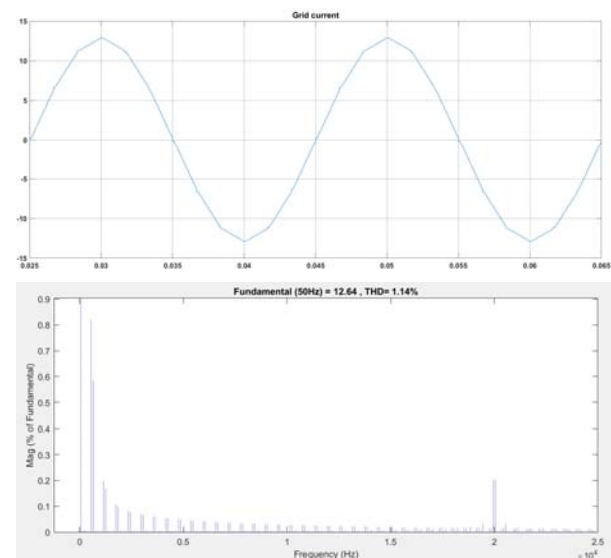
- modulatora prądu bazującego na idealnym źródle prądowym,
- modulatora prądu bazującego na energoelektronicznie sterowanym źródle prądowym (o schemacie jak na rys. 12).



Rys. 12. Schemat ideowy sterowanego energoelektronicznego źródła prądowego pełniącego funkcję modulatora prądu



Rys. 13. Przebieg prądu sieciowego i jego analiza widmowa dla modulatora prądu bazującym na idealnym źródle prądowym dla $\alpha_z = 90$ (THD = 1,06 %)



Rys. 14. Przebieg prądu sieciowego i jego analiza widmowa dla modulatora prądu bazującym na mostku tranzystorowym $\alpha_z=90^\circ$ (THD=1,14%)

W drugim przypadku w widnie sygnału pojawiają się wyższe harmoniczne wynikające z częstotliwości pracy kluczy tranzystorowych. Są one jednak silnie tłumione przez indukcyjny filtr dolnoprzepustowy. Na ich filtrację wpływ ma również indukcyjność po stronie sieci. Ponadto należy również mieć na uwadze, że struktura, jak i parametry regulatora prądu użytego w torze sterowania modulatora prądu MP (rys. 12) także będą decydowały o jakości odwzorowania w sygnale wyjściowym sygnалу referencyjnego, co przełoży się pośrednio na jakość prądów sieciowych.

Podsumowanie

W artykule dokonano przeglądu wybranych rozwiązań umożliwiających poprawę jakości przekształcania energii prostownikowych układów mocy. Zaprezentowano koncepcję bazującą na modulatorze napięcia, jak i prądu w obwodach wyjściowych analizowanych układów. Jednak ze względu na wady pierwszego z nich zrezygnowano z jego stosowania w ramach dalszych etapów badań.

Wykazano, że zastosowanie modulacji prądu można w stosunkowo łatwy sposób zaadoptować z prostowników diodowych do tyrystorowych. Część silnoprądowa modulatora jest w obu przypadkach identyczna, zmiany dotyczą tylko sposobu wyznaczania sygnału referencyjnego i_{MPref} w związku z koniecznością korekty fazy zależnej od kątaysterowania tyrystorów SCR składowych mostków prostowniczych.

Istotną zaletą układu jest stosunkowo mała moc samego modulatora prądu MP w stosunku do mocy obciążenia - wynosi ona około 2,35% mocy odbiornika [9,10] oraz łatwość implementacji w już pracujących układach. Należy jednak mieć na uwadze, że w przypadku układów tyrystorowych prezentowane rozwiązanie umożliwia znaczące ograniczenie niepożądanych harmonicznych prądu sieci, nie rozwiązuje jednak problemu związanego z poborem mocy biernej (zależnej od kątaysterowania tyrystorów mostków prostowniczych).

W ramach dalszych prac badawczych planowane jest m.in. przeprowadzenie badań eksperymentalnych skuteczności poprawy jakości sygnałów prądowych sieci w układach tyrystorowych poprzez zastosowanie koncepcji modulacji prądów. Ponadto przewiduje się dalszą minimalizację niepożądanych harmonicznych w wyniku zastosowania dodatkowego źródła prądowego wspomagającego działanie modulatora MP.

Autorzy: dr inż. Michał Krystkowiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Michal.Krystkowiak@put.poznan.pl; mgr inż. Dominik Matecki, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Dominik.Matecki@put.poznan.pl;

LITERATURA

- [1] Barlik R., Tunia H., Teoria przekształtników, Warszawa, WPW (1992)
- [2] Pawlaczyk L., Firago B., Analiza oddziaływania układu napędowego prądu przemiennego na sieć w przypadku niesymetrii obwodu zasilającego, *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, (2009), nr 3, 32-38
- [3] Kapłon A., Rolek J., Tunia H., The method for reducing harmonics in input currents of rectifier using a modulation in interphase transformer, *IEEE ECCE Asia Downunder*, (2013), pp. 117-121
- [4] Mysiak P., Strzelecki R., Klytta M., 36-pulse rectifier with a system of coupled three-phase reactors, *International Conference-Workshop Compatibility And Power Electronics*, (2013), pp. 75-79
- [5] Hill R.J., Electric railway traction. Part 3 Traction power supplies, *Power Eng. J.* (1994)
- [6] Popescu M., Bitoleanu A., A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems, *Energies*, 12 (2019), No. 6: 1092
- [7] Corti F., Hassan Shehata A., Laudani A., Cardelli E., Design and Comparison of the Performance of 12-Pulse Rectifiers for Aerospace Applications, *Energies*, 14 (2021), No. 19: 6312
- [8] Supronowicz H., Strzelecki R., Filtracja harmonicznych w sieciach zasilających prądu przemiennego, Toruń, Wydawnictwo Adam Marszałek (1998)
- [9] Supronowicz H., Strzelecki R., Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy, Warszawa, OWPW (2000)
- [9] Pajchrowski T., Krystkowiak M., Matecki D., Modulation Variants in DC Circuits of Power Rectifier Systems with Improved Quality of Energy Conversion—Part I, *Energies*, 14 (2021), No. 7: 1876
- [10] Gwóźdź M., Krystkowiak M., Jędrzycka C., Gulczyński, A., Matecki D., Generator with modulated magnetic flux for wind Turbines, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, 65 (2017), 469–478
- [11] M. Krystkowiak, Ł. Ciepliński, M. Gwóźdź, Methods of Current Modulation in Diode Rectifiers, *Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, (2019), 1-5
- [12] Krystkowiak M., Gwóźdź M., Three-phase diode rectifier with current modulator in DC circuit based on multi-channel converter, *Arch. Electr. Eng.*, 66(2017)
- [13] Gwóźdź, M., Krystkowiak, M., Ciepliński, Ł., Strzelecki, R., A Wind Energy Conversion System Based on a Generator with Modulated Magnetic Flux, *Energies*, 13 (2020), No. 12: 3285