

Badanie zjawisk zachodzących w trójfazowych nawrotnych przekształtnikach tyrystorowych z wykorzystaniem modeli symulacyjnych

W artykule przedstawiono szczegółową analizę dwóch rodzajów trójfazowych nawrotnych przekształtników tyrystorowych – układu z prądem obwodowym oraz układu z blokadą prądu obwodowego – umożliwiającą wnikliwy ogląd zjawisk zachodzących w tego typu układach. Rezultatem są wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych w środowisku IsSpice na opracowanych w tym celu modelach.

1. WSTĘP

Przekształtniki tyrystorowe o komutacji sieciowej (rys. 1a) znajdują powszechne zastosowanie w zasilaniu górniczych maszyn wyciągowych, walcarek w hutnictwie oraz silników prądu stałego dużej mocy [1-3], umożliwiając płynną regulację prądu i napięcia. Napędy prądu stałego z przekształtnikami tyrystorowymi, wykorzystane do zasilania twornika, pozwalają uzyskać płynną regulację prędkości i innych wymaganych w układzie napędowym wielkości, jak np. momentu obrotowego [4].

Pojedynczy przekształtnik mostkowy dostarcza na wyjściu napięcie regulowane o dowolnym kierunku ($\alpha < \pi/2$ napięcie dodatnie, $\alpha > \pi/2$ napięcie ujemne). Jednakże z powodu jednokierunkowego przewodzenia tyrystorów nie ma możliwości zmiany kierunku przepływu prądu przez obciążenie (obrotów w przypadku zasilania silnika). Zmiana taka wiązałaby się z koniecznością przełączania zacisków obwodu twornika lub wzbudzenia maszyny. Rozwiązaniem tej niedogodności są nawrotne przekształtniki tyrystorowe. Analiza fizyczna stanów pracy tego typu układów mogłaby okazać się niemożliwa, a wręcz niebezpieczna ze względu na miejsce ich zainstalowania, dlatego badania symulacyjne na opracowanych w tym celu modelach umożliwiają całkowity

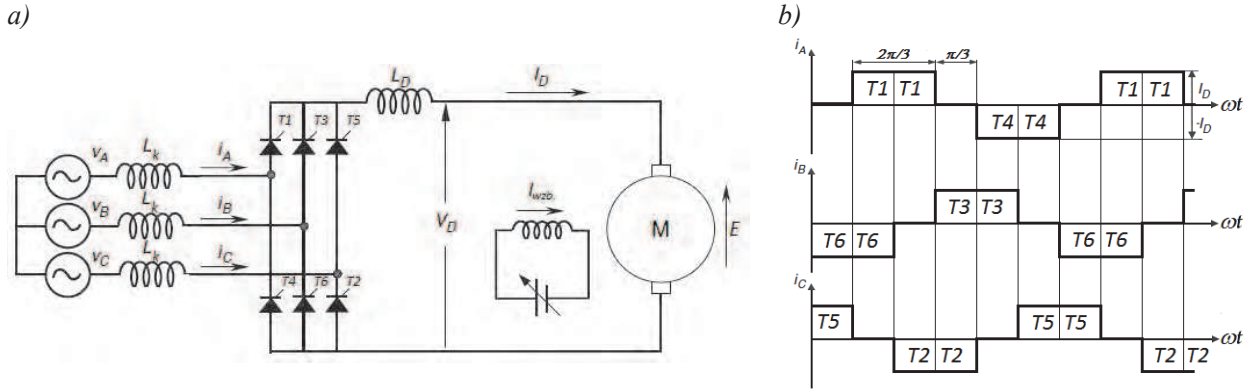
wgląd w naturę i skalę zjawisk występujących w tego rodzaju obiektach.

2. ZASADA DZIAŁANIA TRÓJFAZOWEGO PRZEKSZTAŁNIKA TYRYSTOROWEGO

Trójfazowy przekształtnik tyrystorowy przedstawiony na rysunku 1a tworzą dwa przekształtniki gwiazdowe. Tyrystory o wspólnych katodach (T1, T3, T5) nazywane są grupą katodową, natomiast te o wspólnych anodach (T2, T4, T6) – grupą anodową [5-7].

Tyrystory załączane są impulsami bramkowymi, przez co układają się w pary: T1-T2, T2-T3, T3-T4, T4-T5, T5-T6, T6-T1. Prąd obciążenia I_D płynie zawsze przez dwa tyrystory tworzące parę – jeden z grupy katodowej i jeden z anodowej. Do rozpoczęcia przewodzenia konieczne jest jednoczesne załączenie obu tyrystorów, składających się na parę.

Każdy z tyrystorów jest załączany dwukrotnie podczas okresu: po raz pierwszy, gdy ma zacząć przewodzić w nowej parze, i po raz drugi w odstępie $\pi/3$, gdy ma nadal przewodzić, a do pracy wprowadzany jest drugi tyrystor, tworzący z nim parę (rys. 1b). W ciągu każdego okresu napięcia trójfazowego źródła napięcie wyjściowe V_D składa się z sześciu jedna-

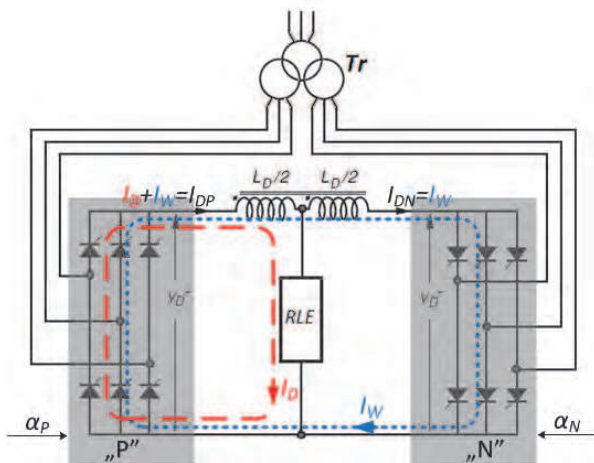


Rys. 1. a) Trójfazowy tyrystorowy przekształtnik mostkowy zasilający maszynę obcowzbudną; L_k – indukcyjność komutacyjna; b) Przebiegi prądów fazowych źródła zasilającego przekształtnik (opracowanie własne na podstawie [6-7])

kowych fragmentów (pulsów) o szerokości $\pi/3$, odpowiadających przewodzeniu jednej pary tyrystorów.

2.1. Przekształtniki z prądem obwodowym

Przepływ prądu obciążenia w obu kierunkach jest możliwy, jeśli do zasilania odbiornika zastosujemy dwa prostowniki mostkowe połączone w konfiguracji przedstawionej na rysunku 2. Przekształtnik wymuszający prąd I_D w kierunku zaznaczonym na rysunku nazwiemy dodatnim „P”, a w kierunku przeciwnym – „N”.



Rys. 2. Struktura przekształtnika dwukierunkowego zasilającego odbiornik o charakterze RLE (opracowanie własne na podstawie [5])

Rysunek 2. obrazuje sytuację, podczas której energię do obciążenia dostarcza przekształtnik P (pracujący jako prostownik), wymuszając przepływ prądu I_D . Przez ten mostek może również przepływać prąd I_W , nie płynący przez obciążenie, a płynący przez obydwa przekształtniki.

Prąd I_W nazywany jest prądem wyrównawczym (obwodowym). Na rysunku 2. zilustrowano drogę

jego przepływu (może on płynąć wyłącznie w jednym kierunku, od przekształtnika P do N). Zamyka się ona przez obwód o bardzo małej rezystancji, w którym napięcie stałe, już o niewielkiej wartości, wymusza prąd o bardzo dużej wartości. Bezpośrednie połączenie zacisków obu przekształtników spowodowałoby, teoretycznie rzecz biorąc, przepływ nieskończenie wielkich prądów obwodowych [5]. W układach tego typu stosowane są dławiki sprzężone, posiadające jeden wspólny rdzeń, na skutek czego droga prądu obwodowego zamyka się przez obwód o czterokrotnie większej indukcyjności niż prąd obciążenia I_D , ponieważ płynie przez dwukrotnie większą liczbę zwojów.

W celu ograniczenia zaistniałego zjawiska suma średnich napięć wyjściowych obu mostków musi spełniać nierówność:

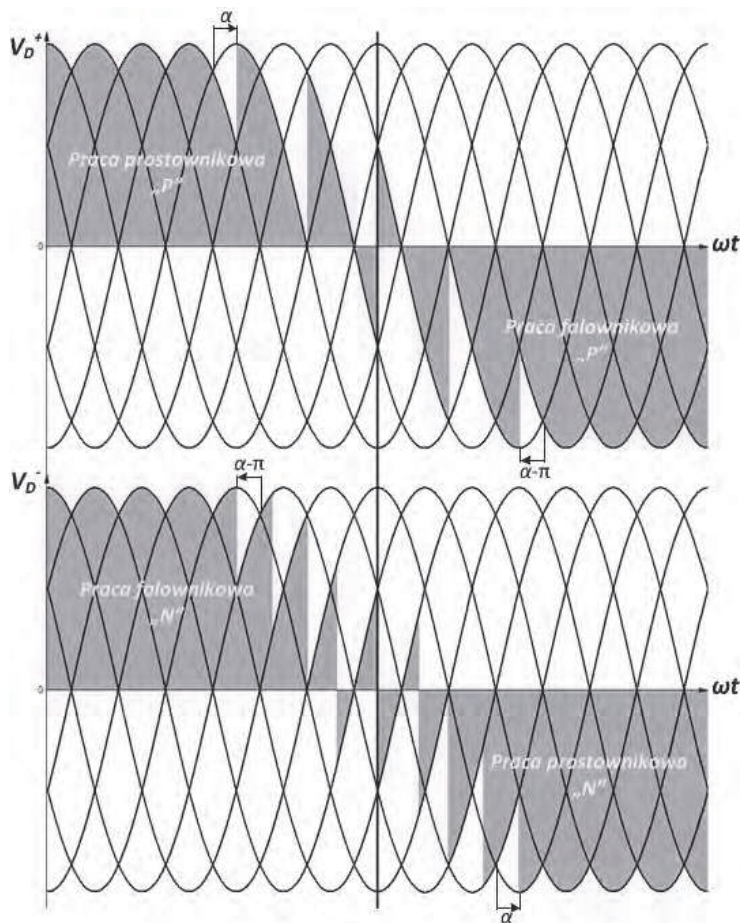
$$V_D^+ + V_D^- \leq 0 \quad (1)$$

Oznacza to zadawanie kątów opóźnienia zapłonu α , tak aby spełniały one zależność:

$$\alpha_P + \alpha_N \geq \pi \quad (2)$$

W konsekwencji średnie wartości napięć wyjściowych obu przekształtników będą sobie równe, lecz będą miały przeciwny kierunek oddziaływania w obwodzie. Jeden z przekształtników będzie pracował jako prostownik z określoną wartością napięcia wyjściowego, a drugi jako falownik z dokładnie taką samą wartością średnią napięcia wyjściowego, lecz o przeciwnym zwrocie.

Przykładowe przebiegi napięć obu przekształtników podczas realizacji omawianego sterowania przedstawiono na rysunku 3. Obrazuje on proces, w wyniku którego zmiana wysterowania obu mostków doprowadza do zmiany kierunku prądu w obwodzie



Rys. 3. Przykładowe przebiegi napięć wyjściowych przekształtników P i N w trakcie realizacji procesu nawrotu (opracowanie własne na podstawie [8])

obciążenia. Kolorem szarym zaznaczono, jak zmiana kąta wysterowania α wpływa na zmianę wartości napięć wyjściowych przekształtników (zmiana wartości średniej napięcia od V_d^+ do wartości V_d^-) i stopniową zmianę charakteru ich pracy.

Pomimo że wartości średnich napięć obu przekształtników są sobie równe, ich wartości chwilowe różnią się od siebie, co powoduje przepływ prądu wyrównawczego. Potrzeba zastosowania dławika ograniczającego wynika z braku możliwości oddziaływania na wartość i fazę składowych zmiennych występujących w napięciu wyjściowym [9]. Włączenie pomiędzy zaciski wyjściowe przekształtników dławika spowoduje odłożenie się na nim napięcia obwodowego tętnień, ograniczając zarazem amplitudę prądu obwodowego.

W praktyce zamiast sterowania realizującego zależność (2) stosowane są układy kontrolujące, w zamkniętym układzie regulacji, wartość średnią prądu obwodowego i utrzymujące ją na poziomie 5÷10% maksymalnej wartości prądu obciążenia [5, 9]. Układ reaguje na sygnały prądowego sprzężenia zwrotnego, otrzymywane z przekształtników, i przez odpowiednie sterowanie kątami wysterowania

wytwarza zadaną wartość prądu obwodowego. Umożliwia to pełną kontrolę tego prądu, której zależą:

- praca obu przekształtników stale realizowana z prądami ciągłymi (prąd wyrównawczy na granicy prądów ciągłych);
- możliwość spowodowania zmiany kierunku prądu obciążenia w dowolnej chwili, w sposób naturalny i płynny;
- zapewniona kosinusoidalna zależność średniego napięcia wyprostowanego od kąta opóźnienia zapłonu α , bez względu na charakter prądu obciążenia.

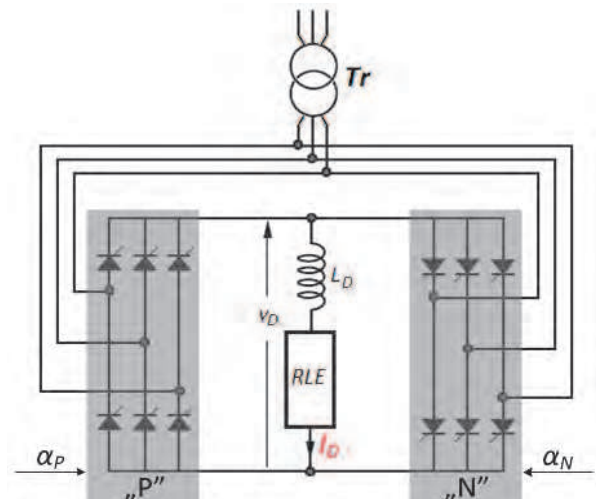
Przepływ prądu wyrównawczego oddziałuje korzystnie na szybkość nawrotu. Powoduje jednak zwiększenie obciążenia biernego wnoszonego przez przekształtniki. Prąd mostka zasilającego aktualnie obciążenie jest powiększony o składową stałą prądu wyrównawczego. Dodatkowe obciążenie biernie wywołuje także przekształtnik pracujący jako falownik (przez który przepływa jedynie prąd wyrównawczy). Przepływ prądu wyrównawczego stanowi zatem również dodatkowe źródło strat mocy czynnej w tyrystorach mostków oraz uzwojeniach transformatora.

2.2. Przekształtnik bez prądu obwodowego

W układach dwukierunkowych istnieje możliwość całkowitej likwidacji prądu wyrównawczego dzięki automatycznemu blokowaniu impulsów załączających przekształtnik, który wówczas nie przewodzi prądu obciążenia [5, 10]. Schemat takiego przekształtnika przedstawiono na rysunku 4. Ze względu na możliwość wystąpienia nieciągłości prądu obciążenia istnieją trudności w osiągnięciu płynnego przejścia prądu obciążenia z prostownika P na N bądź odwrotnie. Układ sterowania musi wygenerować taki kąt wysterowania tyrystorów, przy którym średnia wartość napięcia przekształtnika rozpoczynającego pracę będzie taka sama, jak średnie napięcie przekształtnika kończącego pracę. Narzuca to konieczność przemyślanego wyboru układu sterowania dla uzyskania wymaganych właściwości eksploatacyjnych.

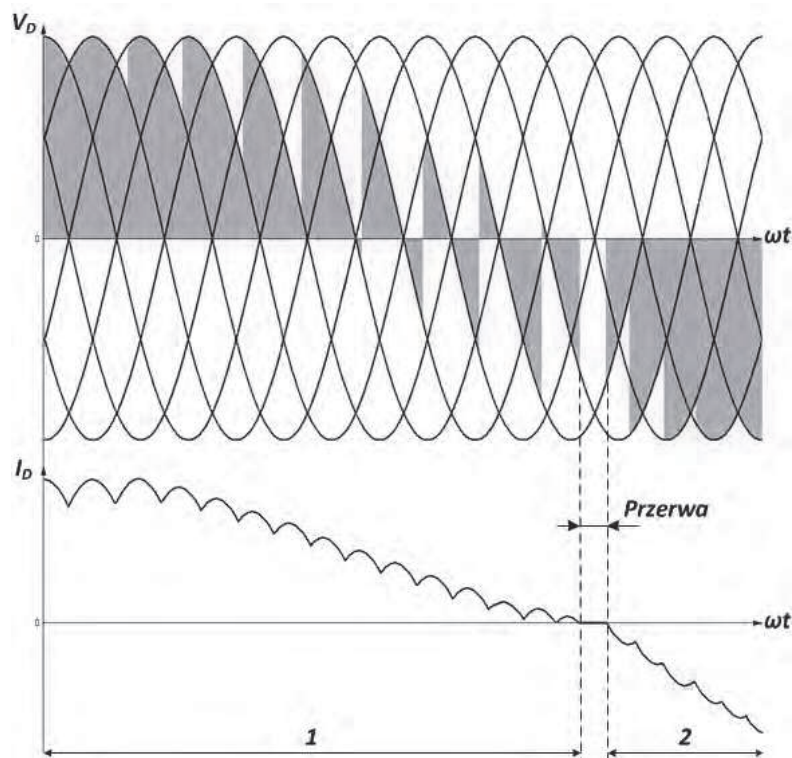
Podczas pracy przekształtnika załączane są tyrystory tylko jednego mostka. Impulsy bramkowe (załączające) drugiego mostka wywołującego przepływ prądu wyrównawczego są zablokowane. Oznacza to w praktyce indywidualną pracę każdego z przekształtników, co wyklucza możliwość zaistnienia zwarć międzyfazowych (mostki można już zasilac z wspólnego transformatora).

Zmiana kierunku prądu obciążenia wymaga doprowadzenia prądu aktualnie przewodzącego prze-

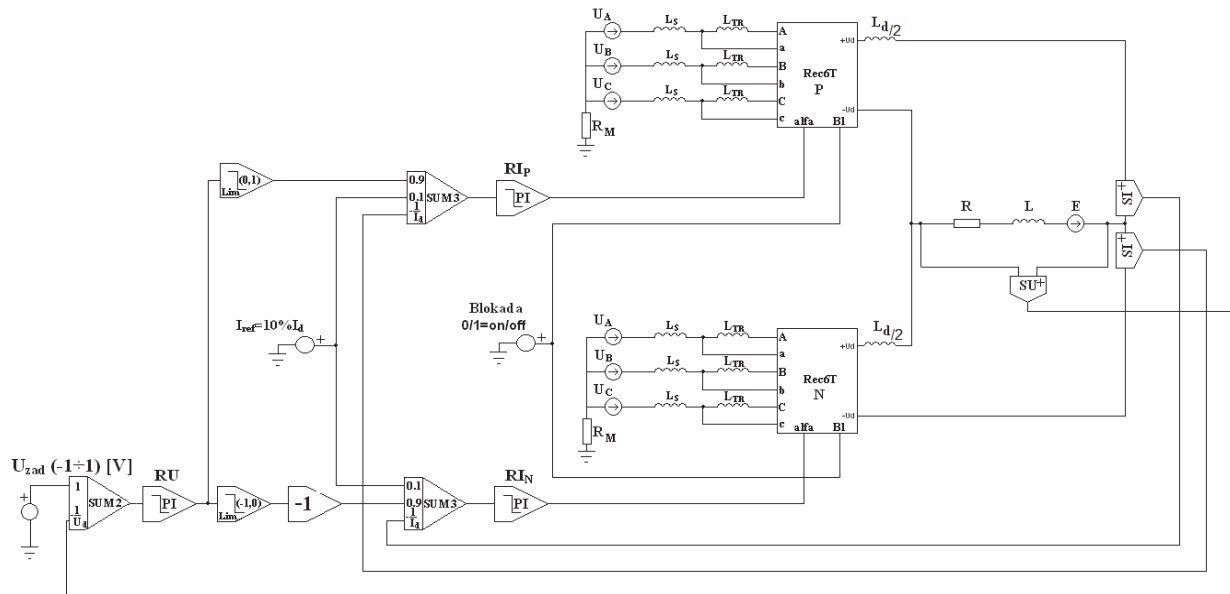


Rys. 4. Schemat dwukierunkowego przekształtnika bez prądu obwodowego (opracowanie własne na podstawie [3-5])

kształtnika do zera, zablokowania jego impulsów załączających, a po upływie czasu większego od t_q (czas wyłączenia zastosowanych tyrystorów) – odblokowania drugiego mostka. Sterowanie takie powoduje, iż przy zmianie kierunku prądu pojawia się przerwa pomiędzy wyłączeniem jednego z mostków, a załączeniem drugiego (ok. 20÷40 ms). W praktyce zwiększa to czas zmiany kierunku prądu obciążenia, co przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przykładowe przebiegi napięcia i prądu wyjściowego przekształtnika podwójnego przy zmianie sterowania od pracy (opracowanie własne na podstawie [8])



Rys. 6. Dwukierunkowy przekształtnik z prądem wyrównawczym wraz z układem sterowania, zrealizowany w celu symulacji: RU – regulator napięcia, RI_P , RI_N – regulator prądu mostka dodatniego (P) i ujemnego (N), L_S – indukcyjność sieci, L_{TR} – indukcyjność transformatora (opracowanie własne na podstawie [5, 11, 12])

3. STRUKTURA UKŁADÓW STEROWANIA I REGULACJI PRZEKSZTAŁTNIKÓW TYRYSTOROWYCH

W zrealizowanych układach sterowania przekształtnikami nawrotnymi zastosowano szeregową strukturę regulacji, która składa się z kaskadowo połączonych regulatorów PI napięcia i prądu [2, 11]. Sprzężenie prądowe zapewnia ograniczenie i kontrolę prądu odbiornika (rzadziej jego stabilizację). Regulator w jego strukturze ma budowę proporcjonalno całkującą (PI), co eliminuje statyczny błąd regulacji. Drugie z zastosowanych sprzężeń zwrotnych jest sprzężeniem napięciowym, którego zadaniem jest stabilizacja napięcia obciążenia (lub – w przypadku zastosowania układu do zasilania silnika prądu stałego – stabilizacja jego prędkości obrotowej).

4. UKŁAD STEROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKIEM NAWROTNYM Z PRĄDEM OBWODOWYM

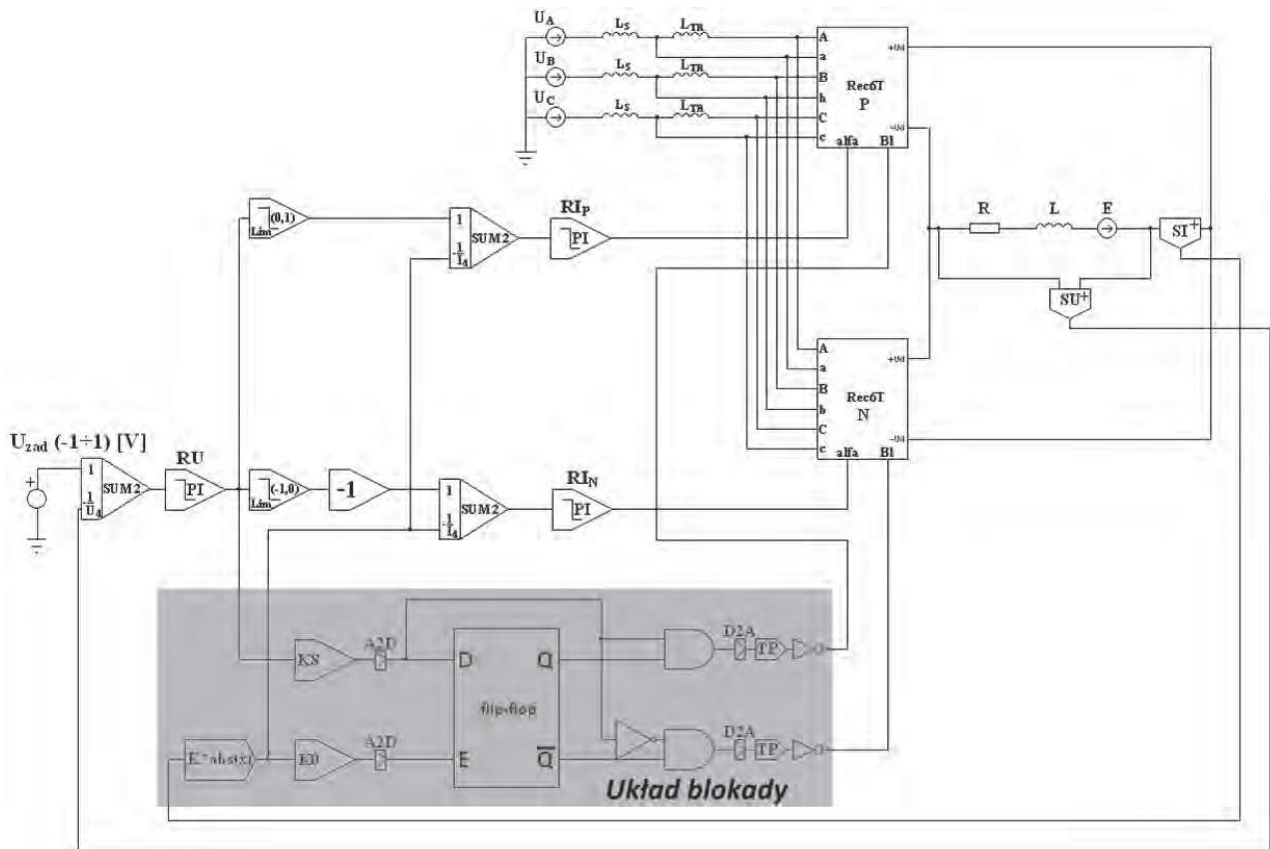
Na rysunku 6. przedstawiono wykonany w środowisku IsSpice (ICAP4) model układu regulacji i sterowania dwukierunkowego przekształtnika tyrystorowego z prądem obwodowym. Każdy z mostków posiada oddzielny regulator prądu (RI_P , RI_N), na którego wejście podawany jest sygnał proporcjonalny do zadanej wartości prądu obwodowego ($I_{ref} = 10\% I_{Dmax}$)

oraz zadana przez regulator napięcia (RU) tylko dodatnia wartość prądu obciążenia. W zależności od znaku sygnału wyjściowego regulatora napięcia jest on wprowadzany przez człon jednokierunkowy $LIM(0,1)$, dla sygnałów dodatnich, lub $LIM(-1,0)$, dla sygnałów ujemnych, na wejście odpowiedniego regulatora. Mostek, któremu odpowiada zadany kierunek prądu, ma w efekcie zadany prąd, będący sumą prądu obciążenia i prądu wyrównawczego, a drugi z mostków – jedynie prąd wyrównawczy. Układ sterowania posiada dodatkowo układ blokady BI , wykorzystywany podczas rozruchu dla sprawdzenia stanu zasilanego przekształtnika.

5. UKŁAD STAROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKIEM Z BLOKADĄ PRĄDU OBWODOWEGO

Na rysunku 7. przedstawiono opracowany w celu symulacji układ sterowania i regulacji nawrotnym przekształtnikiem tyrystorowym z blokadą prądu wyrównawczego.

Jeżeli zostanie zadana różna od zera wartość napięcia wyjściowego, to na wyjściu regulatora napięcia RU pojawi się sygnał różny od zera, o biegunowości zależnej od znaku błędu. Znak sygnału decyduje o kierunku prądu w obwodzie obciążenia (wyborze przekształtnika, który rozpocznie pracę). Proces ten odbywa się za pomocą układu blokady, oznaczonego na rysunku 7. kolorem szarym. Układ musi spełniać następujące warunki:



Rys. 7. Dwukierunkowy przekształtnik z blokadą prądu wyrównawczego z układem sterowania, opracowany w celu symulacji:

RU – regulator napięcia, RI_P , RI_N – regulator prądu mostka dodatniego (P) i ujemnego (N),
 $A2D(D2A)$ – bloki konwersji sygnału (analogowej na cyfrową, cyfrowej na analogową)
 (opracowanie własne na podstawie [5, 11, 12])

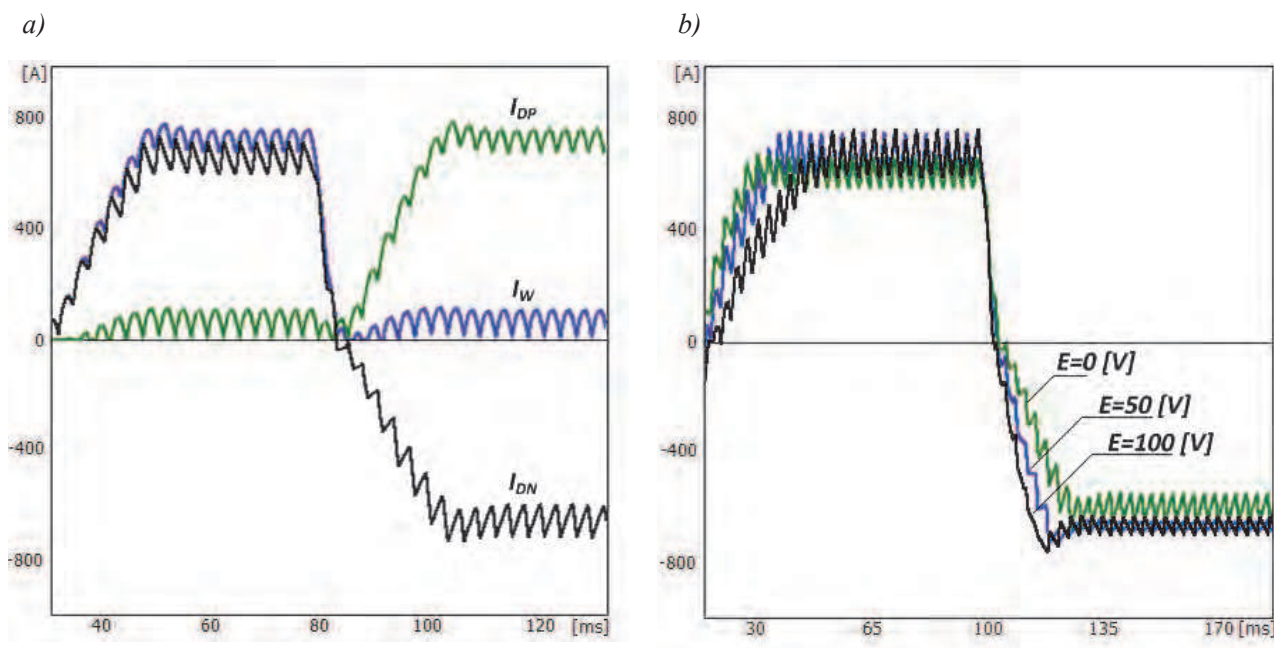
- impulsy wyzwalające tyrystory powinny wprowadzać w stan przewodzenia tylko ten przekształtnik, który aktualnie dostarcza prąd do obciążenia, drugi z przekształtników powinien być zablokowany;
- przy zmianie znaku sygnału regulatora prędkości musi nastąpić przełączenie układu regulacji z jednej sekcji na drugą;
- zablokowanie impulsów wyzwalających tyrystory w sekcji może nastąpić dopiero po zmniejszeniu prądu tej sekcji do wartości zerowej (bliskiej zeru);
- odblokowanie wchodzącej do pracy sekcji może nastąpić dopiero wtedy, gdy tyrystory sekcji przeciwnej znajdują się w stanie zaporowym.

Zasada działania układu blokady opiera się na detektorze zera $K0$, wytwarzającym na wyjściu sygnał logiczny 0 , gdy tylko wartość bezwzględna prądu I_D jest różna od zera. Przerzutnik w tym czasie nie przenosi sygnału z wejścia D na wyjście Q . Jest to możliwe dopiero wtedy, gdy prąd w obwodzie obciążenia zmaleje do wartości uznanej przez detektor zera $K0$ za wartość zerową. Na wejściu E pojawia się wtedy wartość 1 . Na wejście D podawany jest

sygnał proporcjonalny do zadanego kierunku prądu: dla prądu w kierunku dodatnim (P) – sygnał o wartości 1 , w kierunku przeciwnym (N) – o wartości 0 . Zbocze narastające sygnału z wyjścia Q (analogicznie dla \bar{Q}), powodujące odblokowanie odpowiedniego z mostków, zostaje opóźnione w członie TP o czas t_p . Stan niski, informujący o konieczności zablokowania odpowiedniego z mostków, przenoszony jest bez opóźnienia. W wyniku tego jeden z przekształtników rozpocznie pracę, a drugi zostanie zablokowany.

6. REZULTATY SYMULACJI PRZEKSZTAŁTNIKA Z PRĄDEM OBWODOWYM

W trakcie badań symulacyjnych wykorzystano układ przedstawiony na rysunku 6. Zarejestrowano przebiegi prądów obu przekształtników (I_{DP} , I_{DN}) oraz prądu obciążenia (I_D) w trakcie zmiany jego kierunku, dla różnych wartości źródła napięcia E , występującego w obwodzie prądu stałego.



Rys. 8. Przebieg prądów podczas procesu nawrotu w przekształtniku z prądem obwodowym:
a) dla $E=0[V]$; b) dla różnych wartości napięcia E (opracowanie własne)

Na rysunku 8a przedstawiono proces nawrotu. Gdy tylko prąd obciążenia jest dodatni, musi on płynąć od przekształtnika dodatniego P , wtedy prąd przekształtnika ujemnego N jest prądem obwodowym. Prądy w każdej chwili spełniają równość $I_{DP}=I_D+I_{DN}$. Prąd przekształtnika rozpoczynającego przewodzenie już na początku jego pracy ma charakter ciągły, co stanowi główną zaletę układu.

Rysunek 8b przedstawia charakterystykę zbiorczą prądów I_D dla różnych wartości napięcia E w obwodzie obciążenia. Odpowiada to pracy układu zasilającego silnik prądu stałego, który w uproszczeniu zamodelowano jako szeregowe połączenie elementów RLE . Nawrót, przy niezmienionym zwrocie E , odpowiada sytuacji, w której układ przechodzi z pracy silnikowej do pracy generatorowej, a energia jest oddawana do sieci. Przy pracy z prądem dodatnim wzrost napięcia E zwiększa czas, po którym prąd w obwodzie obciążenia osiąga wartość ustaloną. Zmniejszeniu natomiast ulega czas, po którym prąd osiąga kierunek przeciwny.

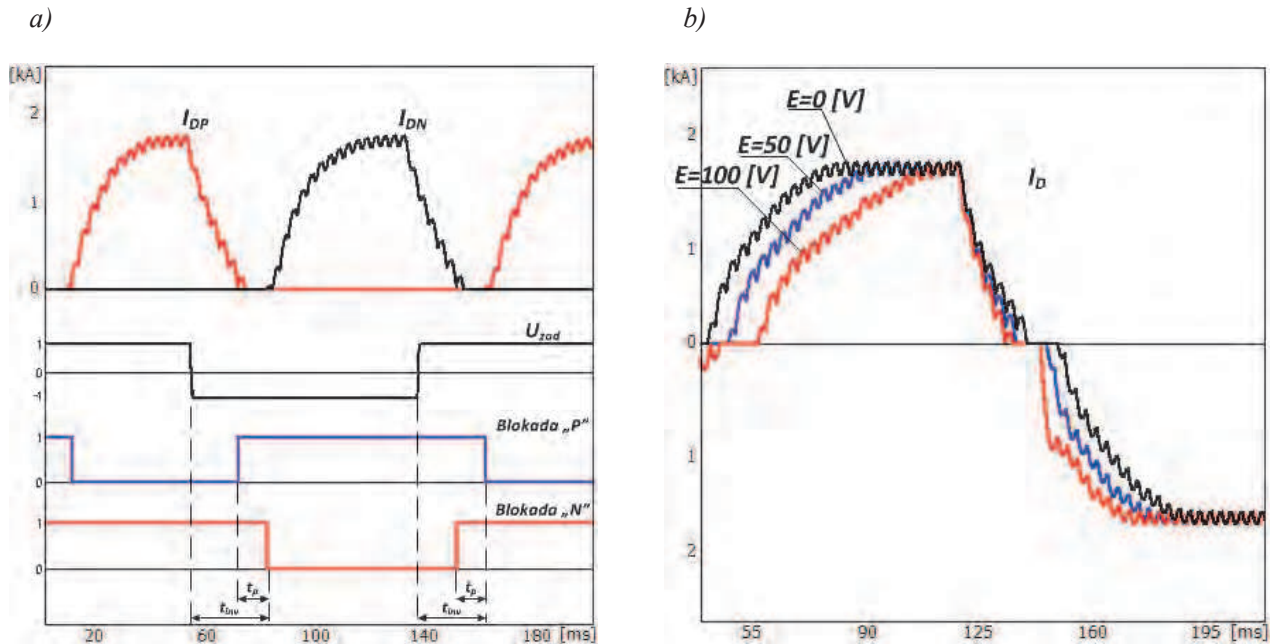
Prąd wyrównawczy, płynący pomiędzy mostkami, jest na granicy prądów ciągłych (utrzymywany samostannie przez napięcie $V_D^++V_D^-$, jakie występuje pomiędzy zaciskami wyjściowymi przekształtników), o wartości średniej różnej od zera, nawet przy braku zewnętrznego prądu obciążenia. Jego przebieg i wartość nie zależy od prądu obciążenia, a jedynie od aktualnej wartości kątów wysterowania obu przekształtników (największą wartość osiąga dla $\alpha_P=\alpha_N=\pi/2$).

7. REZULTATY SYMULACJI PRZEKSZTAŁTNIKA Z BLOKADĄ PRĄDU OBWODOWEGO

Symulacji układu z blokadą prądu obwodowego dokonano w układzie przedstawionym na rysunku 7. Rysunek 9a przedstawia proces zmiany kierunku prądu wraz z oznaczonymi czasami opóźnienia załączenia t_p oraz t_{inv} (czas pomiędzy zadaniem prądu w kierunku przeciwnym, a pojawieniem się tego prądu).

Po zadaniu prądu w kierunku dodatnim następuje odblokowanie przekształtnika P (blokada P zostaje zwolniona stanem niskim), w wyniku czego mostek P przechodzi z pracy falownikowej do prostownikowej. W tym czasie mostek N jest zablokowany stanem wysokim (blokada N). W chwili, gdy zostaje zadany prąd w kierunku przeciwnym, prąd przekształtnika I_{DP} zaczyna maleć, natomiast gdy osiągnie wartość uznaną przez komparator $K0$ za zerową, następuje zablokowanie mostka P , a po upływie czasu t_p – odblokowanie mostka N . Proces zmiany kierunku prądu jest zdecydowanie dłuższy, niż w przypadku przekształtnika z prądem obwodowym, co stanowi główną wadę układu.

Rysunek 9b przedstawia charakterystykę zbiorczą prądów I_d dla różnych wartości napięcia E w obwodzie obciążenia. W związku ze stałym zwrotem napięcia E w obciążeniu dla prądów ujemnych mamy do czynienia z pracą generatorową – przekazywaniem energii z obciążenia do sieci (napięcie obciążenia większe od napięcia przekształtnika).



Rys. 9. Realizacja nawrotu w przekształtniku z blokadą prądu wyrównawczego:
 a) dla $E=0[V]$; 1 – przekształtnik zablokowany, 0 – przekształtnik odblokowany;
 b) dla różnych wartości napięcia E (opracowanie własne)

8. PODSUMOWANIE

W artykule dokładnej analizie poddano modele przekształtników dwukierunkowych z prądem obwodowym oraz blokadą tego prądu. Opisano i przeanalizowano wszelkie zjawiska towarzyszące pracy tych układów, szczególną uwagę poświęcono zachowaniu się prądu podczas zmiany jego kierunku.

Przeznaczeniem zaprojektowanych układów jest m.in. zasilanie silników obcowzbudnych prądu stałego (stosowanych np. w napędach maszyn wyciągowych, walcarek w hutnictwie), gdzie zmiana kierunku prądu twornika wymusza zmianę kierunku obrotów. Zdolności regulacyjne układów sprawiają, iż istnieje możliwość zarówno pełnej kontroli i ograniczania prądu, jak i płynnej regulacji i stabilizacji napięcia wyjściowego (prędkości obrotowej).

Zaletą przekształtników z prądem obwodowym jest niewątpliwie szybki proces zmiany kierunku prądu, w związku z czym znajdują one zastosowanie w układach, w których opóźnienie wnoszone przez przekształtnik może mieć znaczenie (cyklokonwertory). Przekształtnik bez prądu wyrównawczego jest rozwiązaniem zdecydowanie tańszym. Do zasilania wystarczy już tylko transformator z jednym uzwojeniem wtórnym oraz jeden dławik wygładzający w obwodzie prądu stałego. Uproszczenia te pociągają jednak za sobą zwiększenie czasu, po którym prąd I_D zmienia kierunek. Nie odgrywa to znaczącej roli w przypadku zastosowań przekształtników nawrot-

nych w napędzie prądu stałego, ale dyskwalifikuje je w układach, gdzie liczy się dynamika nawrotu.

Obecnie napędy przekształtnikowe coraz częściej wypierają klasyczne układy napędowe, stanowią rozwiązanie o wiele tańsze oraz o zdecydowanie większej sprawności.

Literatura

1. Czajkowski A.: *Napęd tyrystorowy prądu stałego*. WNT, Warszawa 1974.
2. Manitiusz J., Bisztyga K., Grzybowski W. i in.: *Hutnicze napędy elektryczne*. T. 2, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1972.
3. Szklarski L., Zarudzi J.: *Elektryczne maszyny wyciągowe*. Wydawnictwo AGH, Kraków 1987.
4. Tunia H., Kaźmierowski M.: *Automatyka napędu przekształtnikowego*. PWN, Warszawa 1987.
5. Piróg S.: *Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*. Wydawnictwo AGH, Kraków 2006.
6. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P.: *Power Electronics – Converters, Applications and Design* (3rd edition). John Wiley & Sons, 2003.
7. Wu B.: *High-Power Converters and AC Drives*. Wiley-IEEE Press, 2006.
8. Tunia H., Winiarski B.: *Energoelektronika*. WNT, Warszawa 1994.
9. Ciepela A.: *Automatyka przekształtnikowego napędu prądu stałego*. Wydawnictwo AGH, Kraków 1992.
10. Singh M. D., Khanchandani K. B.: *Power electronics*, Tata McGraw-Hill, 2007.
11. Barlik R., Nowak M., Smirnow A., Tunia H.: *Układy energoelektryczne: obliczanie, modelowanie, projektowanie*. WNT, Warszawa 1982.
12. Dobrowolski A.: *Pod maską SPICE'A: metody i algorytmy analizy układów elektronicznych*. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2004.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.