

MODELE SYMULACYJNE TRÓJFAZOWYCH NAWROTNYCH PRZEKSZTAŁTNIKÓW TYRYSTOROWYCH

STRESZCZENIE

W artykule omówiono dwa rodzaje trójfazowych nawrotnych przekształtników tyrystorowych: pierwszy – układ z prądem obwodowy oraz drugi – układ z blokadą prądu obwodowego. Szczegółowej analizie poddano proces zmiany kierunku prądu w obwodzie obciążenia oraz zjawiska temu towarzyszące.

Słowa kluczowe: przekształtnik tyrystorowy, prąd obwodowy

THREE-PHASE BIDIRECTIONAL THYRISTOR CONVERTERS SIMULATION AND ANALYSIS

This paper presents two models of three-phase bidirectional thyristor converters. The first one is a bidirectional converter with a circulating current control and the second is with no-circulating current. It also describes the results of the simulation and analysis of phenomena in these circuits.

Keywords: thyristor converter, circulating current

1. WSTĘP

Przekształtniki tyrystorowe o komutacji sieciowej (rys. 1a) znajdują powszechne zastosowanie do zasilania górniczych maszyn wyciągowych, walcarek w hutnictwie, silników prądu stałego dużej mocy. Umożliwiają one płynną regulację prądu i napięcia. Napędy prądu stałego z przekształtnikami tyrystorowymi wykorzystane do zasilania twornika umożliwiają uzyskanie płynnej regulacji prędkości i innych wymaganych w układzie napędowym wielkości jak np. momentu obrotowego.

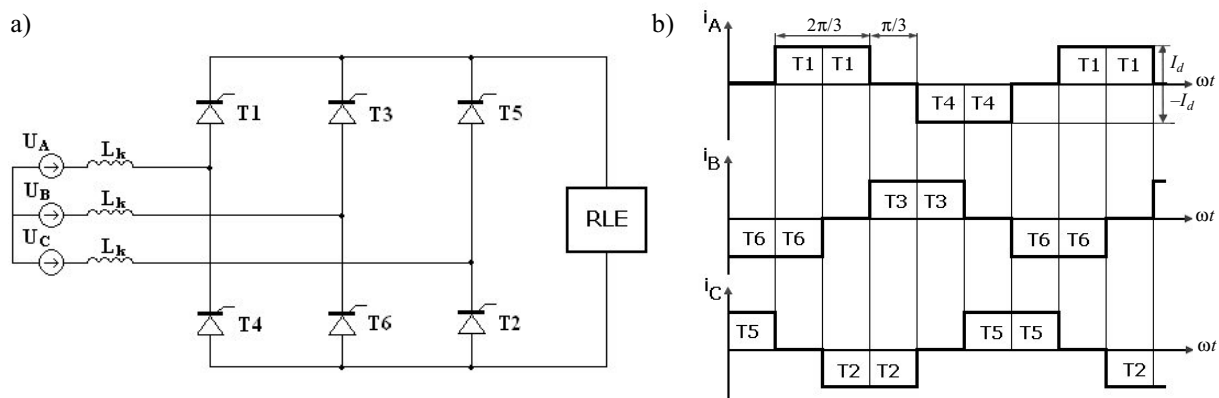
2. ZASADA DZIAŁANIA TRÓJFAZOWEGO TYRYSTOROWEGO PRZEKSZTAŁTNIKA MOSTKOWEGO

Trójfazowy tyrystorowy przekształtnik mostkowy przedstawiony na rysunku 1a stanowi połączenie dwóch prze-

kształtników gwiazdowych. Tyrystory o wspólnych katodach (T1, T3, T5) nazywane są grupą katodową, natomiast te o wspólnych anodach (T2, T4, T6) – grupą anodową.

Tyrystory załączane są impulsami bramkowymi, w parach (T1T2, T2T3, T3T4, T4T5, T5T6, T6T1). Prąd obciążenia płynie zawsze przez dwa tyrystory (parę), jeden z grupy katodowej i jeden z grupy anodowej. Do rozpoczęcia przewodzenia należy jednocześnie załączyć oba tyrystory tworzące 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. W ciągu każdego okresu napięcia trójfazowego źródła, napięcie wyjściowe składa się z sześciu jednakowych fragmentów (pulsów) o szerokości $\pi/3$, odpowiadających przewodzeniu jednej pary tyrystorów (rys. 1b).



Rys. 1. Trójfazowy tyrystorowy przekształtnik mostkowy. RLE – obciążenie, L_k – indukcyjność komutacyjna (a), przebiegi prądów fazowych źródła zasilającego przekształtnik, zakresy przewodzenia poszczególnych tyrystorów (b)

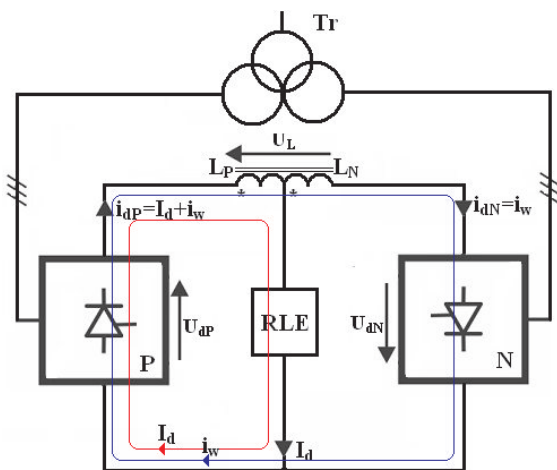
* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

3. TRÓJFAZOWE DWUKIERUNKOWE PRZEKSZTAŁNIKI TYRYSTOROWE

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 tyristorów nie ma możliwości zmiany kierunku przepływu prądu przez obciążenie (obrotów w przypadku zasilania silnika). Wiąże się z koniecznością przełączania zacisków obwodu twornika lub wzbudzenia maszyny.

3.1. Przekształtniki z prądem obwodowym

Przepływ prądu obciążenia w obu kierunkach jest możliwy, jeśli do zasilania odbiornika zastosujemy dwa prostowniki mostkowe połączone w konfiguracji jak na rysunku 2. Przekształtnik wymuszający prąd I_d w kierunku zaznaczonym na rysunku nazywamy „dodatnim” (P), a w kierunku przeciwnym „ujemnym” (N).



Rys. 2. Struktura przekształtnika dwukierunkowego, zasilającego odbiornik o charakterze RLE

Rysunek 2 przedstawia sytuację, podczas której do obciążenia energię dostarcza przekształtnik P (pracujący jako prostownik). Wymusza on przepływ prądu I_d . Przez ten mostek może również przepływać prąd i_w , niepłynący przez obciążenie, a płynący przez oba z przekształtników.

Prąd i_w nazywany jest prądem wyrównawczym (obwodowym). Na rysunku 2 przedstawiono drogę jego przepływu (może on płynąć wyłącznie w jednym kierunku, od przekształtnika dodatniego do ujemnego). Zamyka się on przez obwód o bardzo małej rezystancji i napięcie stałe, już o niewielkiej wartości wymusza w nim prąd obwodowy o bardzo dużej wartości. Bezpośrednie połączenie zacisków obu przekształtników spowodowałoby przepływ, teoretycznie biorąc, nieskończenie wielkich prądów obwodowych. W układach takich stosuje się dławiki sprzężone. Mają one jeden wspólny rdzeń. Prąd obwodowy płynie przez oba jego uzwojenia, a indukcyjność dla tego prądu jest cztery

razy większa (ponieważ płynie przez dwukrotnie większą liczbę zwojów), niż dla prądu obciążenia I_d .

Aby zapobiec takiej sytuacji, suma średnich napięć wyjściowych obu mostków w kierunku przewodzenia musi spełniać nierówność:

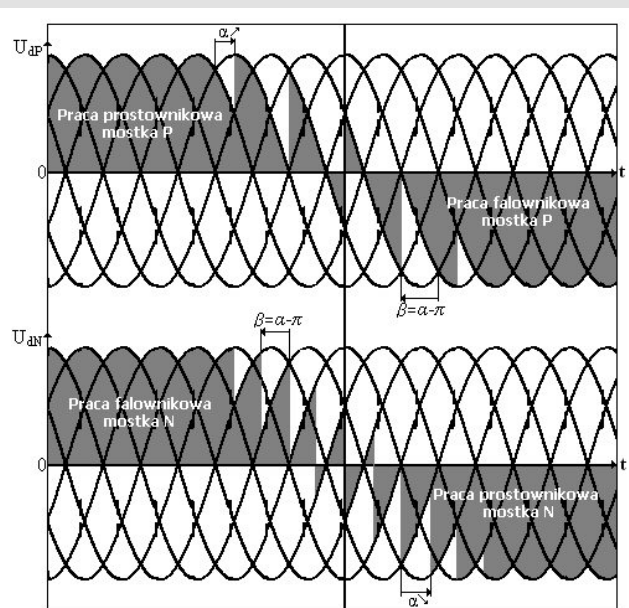
$$U_{dP} + U_{dN} \leq 0 \quad (I)$$

Oznacza to zadawanie kątów α , tak aby była spełniona zależność:

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

Dzięki temu średnie wartości napięć wyjściowych obu przekształtników będą sobie równe, lecz o przeciwnym kierunku 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 obciążenia (następuje zmiana wartości średniej napięcia od $+U_{d0}$ do wartości $-U_{d0}$).



Rys. 3. Przebiegi czasowe napięć wyjściowych przekształtników P i N podczas realizacji procesu nawrot. Objaśnienia w tekście

Kolorem szarym oznaczono, jak zmiana kąta wysterowania α (z zachowaniem zależności (II)) wpływa na zmianę wartości napięć wyjściowych przekształtników i stopniową zmianę charakteru ich pracy.

Mimo zachowania równości wartości średnich napięć obu przekształtników (odpowiednich relacji pomiędzy kątami sterowania obu mostków), wartości chwilowe tych na-

pięć różnią się od siebie, co powoduje przepływ prądu wyrównawczego.

Potrzeba zastosowana dławika ograniczającego wynika z braku możliwości oddziaływania na wartość i fazę składowych zmiennych występujących w napięciu wyjściowym. Włączenie pomiędzy zaciski wyjściowe przekształtników dławika spowoduje odłożenie się na nim napięcia obwodowego tętnień, ograniczając zarazem amplitudę prądu obwodowego.

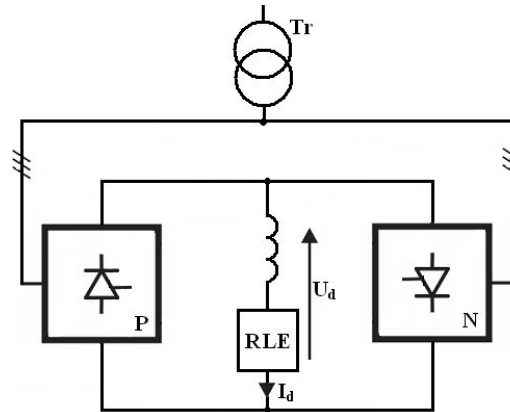
W praktyce zamiast sterowania realizującego zależność (II) stosuje się układy kontrolujące, w zamkniętym układzie regulacji, wartość średnią prądu obwodowego. Na poziomie 5÷10% maksymalnej wartości prądu obciążenia. Układ reaguje na sygnały prądowego sprzężenia zwrotnego, otrzymywane z przekształtników i przez odpowiednie sterowanie kątami wysterowania wytwarza zadaną wartość prądu obwodowego. Dzięki takiemu sterowaniu, mamy możliwość pełnej kontroli prądu obwodowego, która powoduje iż:

- oba przekształtniki pracują zawsze z prądami ciągłymi, a prąd wyrównawczy jest na granicy prądu ciągłego;
- zmiana kierunku prądu obciążenia może nastąpić w każdej chwili, w sposób naturalny i płynny;
- zapewniona kosinusoidalna zależność średniego napięcia wyprostowanego od kąta opóźnienia zapłonu α niezależnie do charakteru prądu obciążenia.

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

3.2. Przekształtnik bez prądu obwodowego

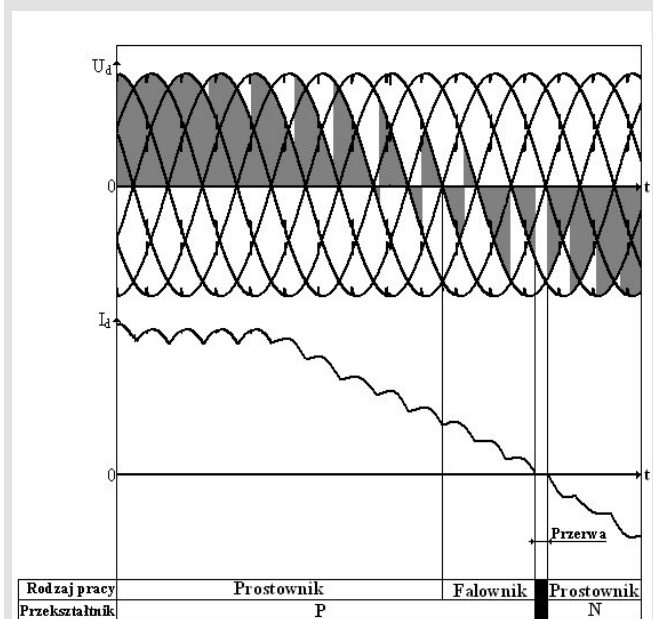
W układach dwukierunkowych można całkowicie zlikwidować prąd wyrównawczy, dzięki automatycznemu blokowaniu impulsów załączających tego przekształtnika, który aktualnie nie przewodzi prądu obciążenia. Schemat takiego przekształtnika przedstawiono na rysunku 4. Ze względu na możliwość nieciągłości prądu obciążenia, istnieją trudności w osiągnięciu płynnego przejścia prądu obciążenia z prostownika P na N bądź odwrotnie. Układ sterowania musi wygenerować taki kąt wysterowania tyristorów, 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.



Rys. 4. Schemat dwukierunkowego przekształtnika bez prądu obwodowego

Podczas pracy tyristory tylko jednego mostka są załączone. Impulsy bramkowe (załączające) drugiego mostka wywołującego przepływ prądu wyrównawczego są zablokowane. Oznacza to indywidualną pracę każdego z przekształtników. Wyklucza to możliwość zwarć międzyfazowych, mostki można więc zasiląć z wspólnego transformatora.

Zmiana kierunku prądu obciążenia wymaga doprowadzenia prądu aktualnie przewodzącego przekształtnika do zera, zablokowania jego impulsów załączających, a po upływie czasu większego od t_q (czas wyłączania zastosowanych tyristorów) odblokowania drugiego mostka. Sterowanie takie powoduje, iż przy zmianie kierunku prądu pojawia się przerwa pomiędzy wyłączeniem jednego z mostków a załączeniem drugiego. 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 P jako prostownik, do pracy N jako prostownik. Obciążenie RL

4. OGÓLNA STRUKTURA UKŁADÓW STEROWANIA I REGULACJI TYRYSTOROWYCH PRZEKSZTAŁNIKÓW TRÓJFAZOWYCH

W zrealizowanych układach sterowania przekształtnikami nawrotnymi zastosowano szeregową strukturę regulacji, która składa się z kaskadowo połączonych regulatorów *PI* napięcia i prądu. 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).

4.1. Układ sterowania przekształtnikiem nawrotnym z prądem obwodowym

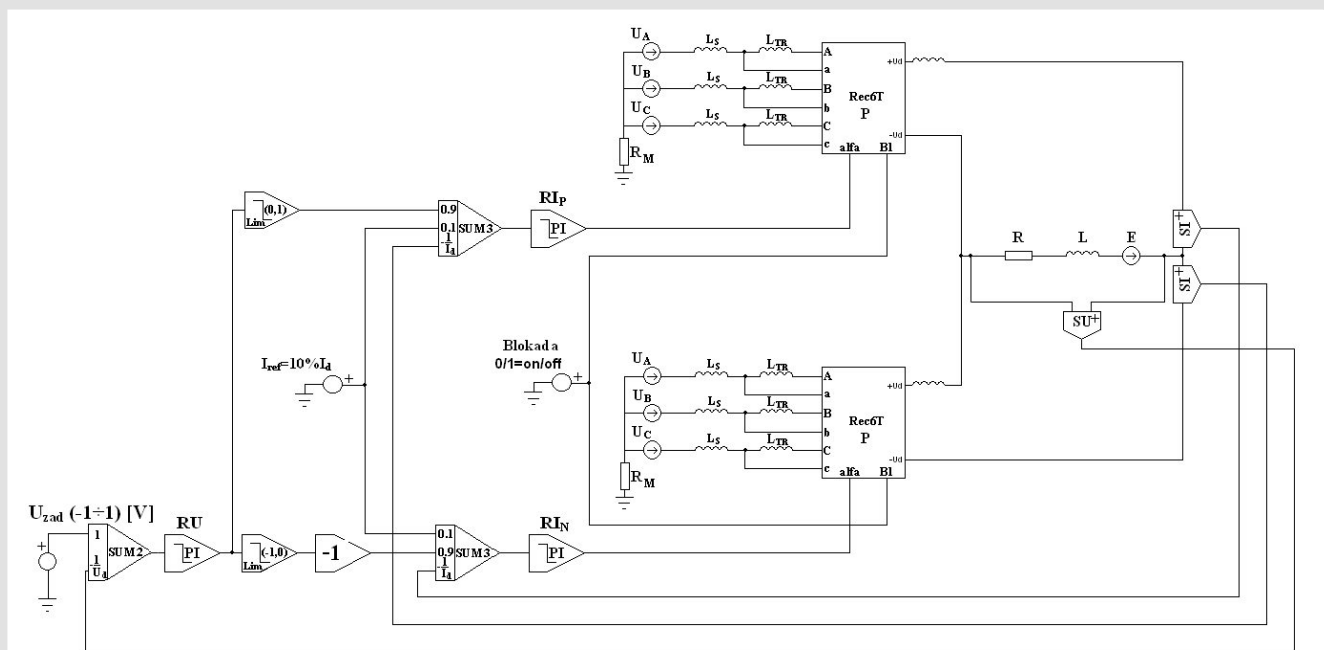
Na rysunku 6 przedstawiono wykonany w środowisku IsSpice model układu regulacji i sterowania dwukierunkowego przekształtnika tyrystorowego z prądem wyrównawczym. Każdy z mostków ma oddzielny regulator prądu (RI_p , RI_N). Na wejście którego podawany jest sygnał proporcjonalny do zadanej wartości prądu wyrównawczego

($I_{ref} = 10\%I_{dmax}$), 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 $LIM(0,1)$ – przepuszczanie sygnałów dodatnich, lub $LIM(-1,0)$ – sygnały ujemne, na wejście odpowiedniego z regulatorów. 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*). Jest on wykorzystywany podczas rozruchu dla sprawdzenia stanu zasilanego przekształtnika.

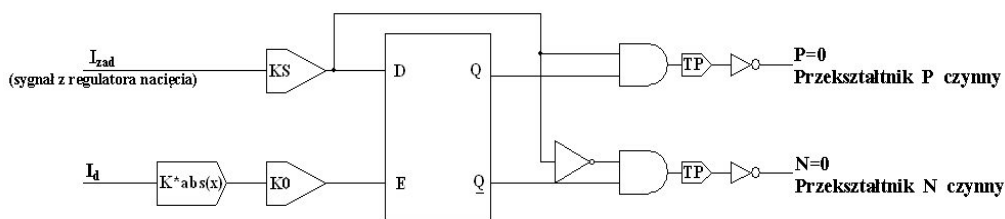
4.2. Układ starowania przekształtnikiem z blokadą prądu obwodowego

Na rysunku 8 przedstawiono zrealizowany w celu symulacji układ sterowania i regulacji nawrotnym przekształtnikiem tyrystorowym z blokadą prądu wyrównawczego.

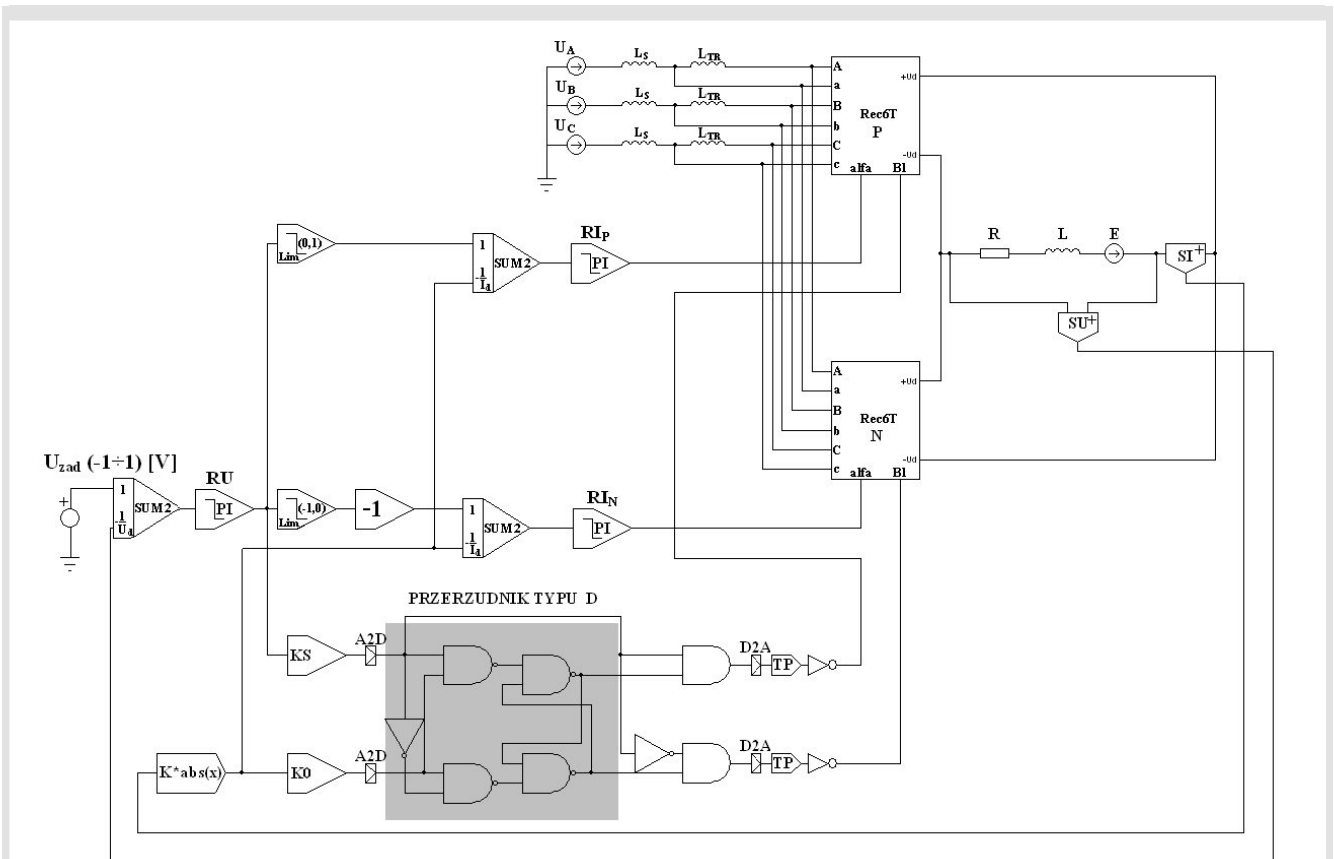
Jeżeli zostanie zadana różna od zera wartość napięcia wyjściowego, to na wyjściu regulatora napięcia *RU* pojawi się sygnał różny od zera, o biegunowości zależnej od znaku błędu. Znak tego sygnału decyduje o kierunku prądu w obciążeniu (wyborze przekształtnika, który rozpocznie pracę). Proces ten odbywa się to za pomocą układu przedstawionego na rysunku 7.



Rys. 6. Schemat dwukierunkowego przekształtnika z prądem wyrównawczym, wraz z układem sterowania *RU* – regulator napięcia, RI_p , RI_N – regulator prądu mostka dodatniego (*P*) i ujemnego (*N*), L_S – indukcyjność sieci, L_{TR} – indukcyjność transformatora



Rys. 7. Schemat blokowy układu blokady wyzwalania impulsów załączających przekształtników



Rys. 8. Schemat dwukierunkowego przekształtnika z blokadą prądu wyrównawczego z układem sterowania: 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)

Układu blokady musi spełniać następujące warunki:

- impulsy wyzwalające tyrystory powinny wprowadzać w stan przewodzenia tylko ten przekształtnik, który dostarcza prądu obciążenia, przekształtnik chwilowo nieczynny 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 bliskiej zeru;
- odblokowanie wchodzącej do pracy sekcji może nastąpić dopiero wtedy, gdy tyrystory sekcji przeciwnej znajdują się w stanie zaporowym.

Detektor zera $K0$ wytwarza 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 dostarczamy sygnał proporcjonalny do zadanego kierunku prądu. Dla zadanego dodatniego kierunku prądu, komparator znaku KS zadaje na wejście D sygnał logiczny o wartości 1 (dla prądu w kierunku przeciwnym 0).

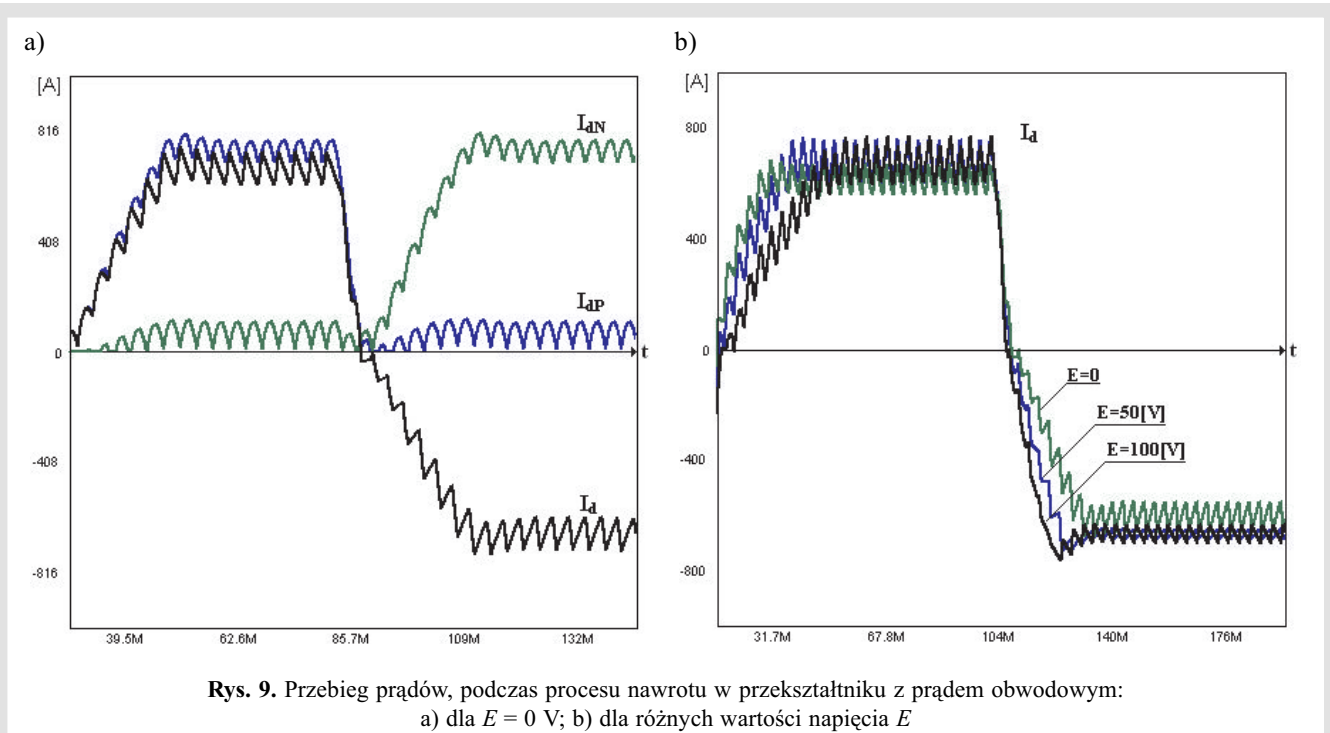
Zbocze narastające sygnału z wyjścia Q (analogicznie dla \bar{Q}), powodujące odblokowanie odpowiedniego z most-

ków 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 prace, a drugi zostaje zablokowany.

5. REZULTATY SYMULACJI PRZEKSZTAŁNIKA Z PRĄDEM OBWODOWYM

W trakcie badań symulacyjnych wykorzystywano układ przedstawiony na rysunku 7. Zarejestrowano przebiegi prądów obu przekształtników (I_{dP} , I_{dN}) oraz prądu obciążenia (I_d) podczas procesu zmiany kierunku prądu. Dla różnych wartości źródła napięcia E , występującego w obwodzie prądu stałego.

Na rysunku 9a przedstawiono proces nawrotu. Gdy tylko prąd obciążenia jest dodatni, musi on płynąć od przekształtnika dodatniego P – wtedy prąd przekształtnika ujemnego N – jest prądem obwodowym. Na odwrót, jeżeli prąd obciążenia jest ujemny, wtedy prąd przekształtnika dodatniego 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. Podczas procesu nawrotu nie ulega zmianie kierunek napięcia E w obwodzie obciążenia.

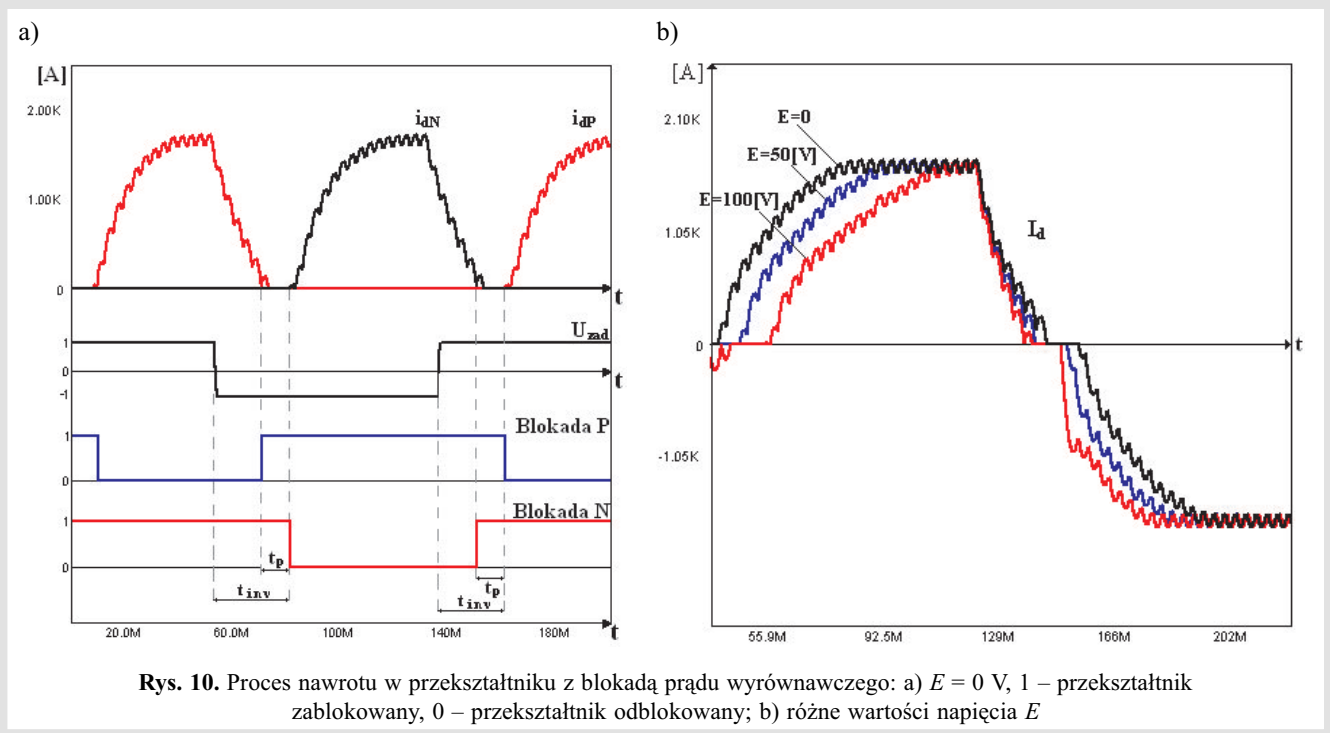


Rysunek 9b przedstawia charakterystykę zbiorczą prądów I_d dla różnych wartości napięcia E w obwodzie obciążenia. Odpowiada to pracy układu, gdy zasila on silnik prądu stałego – obciążenie RLE. Nawrót, przy niezmienionym zwrocie E , odpowiada sytuacji, w której układ przechodzi z pracy silnikowej do pracy generatorowej, a energia oddawana jest z obciążenia 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 samoistnie

przez napięcie $U_{dP} + U_{dN}$, jakie występuje pomiędzy zaciskami wyjściowymi przekształtników), o wartości średniej różnej od zera, nawet przy braku zewnętrznego prądu obciążenia. Jego przebieg i wartość nie zależą od prądu obciążenia, a jedynie od aktualnej wartości kątów wysterowania obu przekształtników (największą wartość osiąga dla $\alpha_P = \alpha_N = \pi/2$).

W każdej chwili przewodzą wszystkie (z trzech) fazy. Wymusza to zastosowanie dwóch galwanicznie separowanych źródeł zasilania (lub transformatora z dwoma uzwojeniami wtórnymi). Brak tej separacji prowadziłby do dwufazowych zwarc źródeł.



6. REZULTATY SYMULACJI PRZEKSZTAŁNIKA Z BLOKADĄ PRĄDU OBWODOWEGO

Symulację układu z blokadą prądu obwodowego przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 8. Rysunek 10a 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, gdy osiągnie on wartość uznana przez komparator zera 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 10b 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).

7. PODSUMOWANIE

W artykule dokładnej analizie poddano modele przekształtników podwójnych z prądem obwodowym i z blokadą tego prądu. Opisano i przeanalizowano wszelkie zjawiska towarzyszące pracy tych układów, z szczególną uwagą poświęconą na zachowanie się prądu podczas zmiany jego kierunku.

Przeznaczeniem zaprojektowanych układów jest między innymi zasilanie silników obcowzbudnych prądu stałego, w których zmiana kierunku prądu twornika wymusza zmianę kierunku obrotów. Możliwości regulacyjne układów sprawiają, iż można dokonać zarówno pełnej kontroli i ograniczania prądu, jak i płynnej regulacji i stabilizacji napięcia wyjściowego (prędkości obrotowej).

Przewagą przekształtnika z prądem obwodowym jest zdecydowanie bardzo szybki proces kierunku prądu. Znajdują one zastosowanie w układach, w których opóźnienie wnoszone przez przekształtnik może mieć znaczenie (cyklokonwetry).

Przekształtnik bez prądu wyrównawczego jest rozwiązaniem tańszym. Do zasilania wystarczy już tylko transformator z jednym uzwojeniem wtórnym oraz jeden dławik wyglądający w obwodzie prądu stałego. Uproszczenia te pociągają jednak za sobą zwiększenie czasu zmiany kierunku prądu obciążenia. Nie odgrywa to znaczącej roli w przypadku zastosowań przekształtników nawrotnych w napędzie prądu stałego, ale dyskwalifikuje je to w układach, gdzie liczy się dynamika nawrotu prądu.

Obecnie napędy przekształtnikowe coraz częściej wypierają klasyczne układy napędowe, stanowią rozwiązanie o wiele tańsze oraz o zdecydowanie większej sprawności. Przykładem powszechnego stosowania przekształtników nawrotnych mogą być napędy maszyn wyciągowych oraz walcarek w hutnictwie.

Literatura

- [1] Barlik R., Nowak M., Smirnow A., Tunia H.: *Układy energoelektroniczne: obliczanie, modelowanie, projektowanie*. Warszawa, WNT 1982
- [2] Ciepela A.: *Automatyka przekształtnikowego napędu prądu stałego*. Kraków, Wydawnictwo AGH 1992
- [3] Czajkowski A.: *Napęd tyrystorowy prądu stałego*. Warszawa, WNT 1974
- [4] Manitus J., Biszyga K., Grzybowski W., Kardaszewicz J., Wąsowicz Z., Zygmunt H.: *Hutnicze napędy elektryczne, tom II*. Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 1972
- [5] Pelly B.: *Tyrystorowe przekształtniki i cyklokonwertery*. Warszawa, WNT 1976
- [6] Piróg S.: *Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*. Kraków, Wydawnictwo AGH 2006
- [7] Szklarski L., Zarudzki J.: *Elektryczne maszyny wyciągowe*. Kraków, Wydawnictwo AGH 1987
- [8] Tunia H., Kaźmierowski M.: *Automatyka napędu przekształtnikowego*. Warszawa, PWN 1987

Wpłynęło: 11.05.2011

Kacper SOWA



Urodził się 25 sierpnia 1985 roku w Nowym Sączu. Studia wyższe ukończył w roku 2010 na Wydziale Elektrotechniki Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Po ukończeniu studiów rozpoczął studia doktoranckie.

e-mail: sowa@agh.edu.pl