

Michał Knapczyk, Krzysztof Pieńkowski
Politechnika Wroclawska, Wrocław

ANALIZA NIELINIOWYCH METOD STEROWANIA PRZEKSZTAŁTNIKIEM SIECIOWYM AC/DC

ANALYSIS OF NONLINEAR CONTROL STRATEGIES FOR AC/DC LINE-SIDE CONVERTER

Abstract: The paper presents a comparative study of nonlinear control techniques for AC/DC line-side converter. Virtual Flux Based Direct Power Control for AC/DC converter has been modified by adding nonlinear DC-link controllers. In particular, design methods of robust control has been presented and used to design robust controllers: sliding-mode controller, fuzzy-logic controller and sliding-mode fuzzy controller. The sliding-mode method uses the concept of a sliding line which divides the state space into two semi-planes and defines the distance to the sliding line. Since the system trajectory reaches the sliding line, it cannot leave it. This is achieved despite parameters fluctuation and disturbances, being the main characteristic of robustness. Fuzzy logic controllers are designed by using the phase plane determined by error e and change of error \dot{e} . The phase plane is next parted into two semi-planes by means of sliding line. This makes diagonal form of fuzzy logic control similar to sliding-mode with boundary layers. The goal of the control systems presented in the paper is to maintain the output dc-link voltage at the required level, while line currents should be ideally sinusoidal and in phase with respective phase voltages to satisfy the unity power factor (UPF) condition.

1. Wstęp

Do zasilania tradycyjnych napędów przekształtnikowych prądu przemiennego stosuje się prostowniki diodowe lub tyrystorowe, które pobierają z sieci zasilającej prąd odkształcony, stając się źródłem wyższych harmonicznych. Przekształtniki te, będące odbiornikami nieliniowymi pobierającymi prąd odkształcony, powodują pobór mocy biernej i wzrost strat w liniach przesyłowych.

Zredukowanie zawartości wyższych harmonicznych w prądach sieci zasilającej do wartości kilku procent pozwala uniknąć większości z wyżej wymienionych problemów.

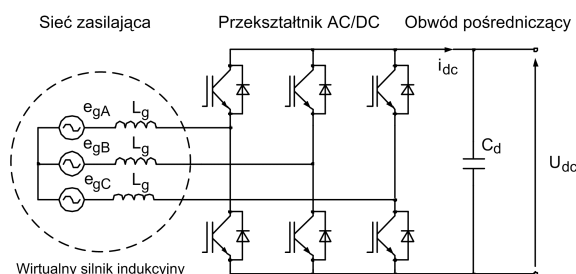
W Europie obowiązują obecnie przepisy regulujące problem jakości energii (IEC 61000-3-1/IEC 61000-3-4), które narzucają wymagania nowoczesnym urządzeniom energoelektronicznym, zasilanym z sieci prądu przemiennego. Urządzenia te powinny pobierać prąd o kształcie zbliżonym do sinusoidy, przy jednoczesnym zapewnieniu jednostkowego współczynnika mocy we wszystkich stanach pracy.

Do urządzeń spełniających powyższe warunki należą przekształtniki sieciowe AC/DC, nazywane także prostownikami PWM. Przekształtniki sieciowe AC/DC są układami energoelektronicznymi, które charakteryzuje duża nieliniowość i dyskretny charakter pracy. Stwarza to

duże trudności w doborze parametrów układów sterowania i określaniu nastaw regulatorów. Z tych względów podejmowane są badania nad możliwością zastosowania do sterowania tymi przekształtnikami nieliniowych metod sterowania opartych na metodach ruchu ślizgowego i logiki rozmytej. Artykuł przedstawia wybrane układy sterowania nieliniowego przekształtnikami AC/DC oraz wyniki badań symulacyjnych tych układów.

2. Metody sterowania przekształtnikiem sieciowym AC/DC

Przekształtniki sieciowe AC/DC z wyjściem napięciowym posiadają strukturę układu falownika napięcia (rys.1).



Rys.1. Przekształtnik sieciowy AC/DC

Ponadto istnieje możliwość sterowania tego rodzaju przekształtnikami z zastosowaniem metod wykorzystywanych do regulacji częstotliwo-

ściowej silników indukcyjnych. Dla zapewnienia takiej możliwości obwody złożone z napięć źródłowych sieci i dławików sieciowych są rozpatrywane jako obwody wirtualnego silnika indukcyjnego, zasilanego przez przekształtnik AC/DC.

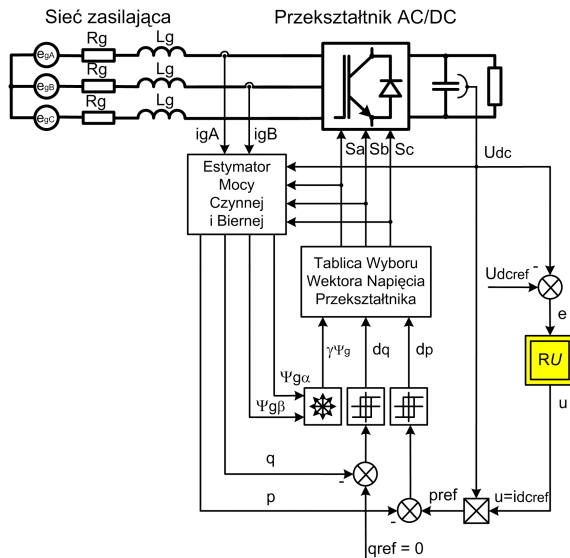
Wyróżnić można następujące metody sterowania prostownikami PWM [1, 3, 4]:

- metoda sterowania z orientacją wektora prądu sieci względem wektora napięcia sieci (VOC- Voltage Oriented Control);
- metoda sterowania z orientacją wektora prądu sieci względem wirtualnego wektora strumienia sieci (VFOC- Virtual Flux Oriented Control);
- metody bezpośredniego sterowania mocą przekształtnika (DPC- Direct Power Control).

Metody VOC i VFOC są odpowiednikami metod polowo-zorientowanych dla silnika indukcyjnego. Metoda DPC jest odpowiednikiem metody DTC - bezpośredniego sterowania momentem i strumieniem silnika indukcyjnego.

3. Bezpośrednie sterowanie mocą przekształtnika sieciowego AC/DC

Analiza stanów pracy przekształtnika sieciowego AC/DC z zastosowaniem metody bezpośredniego sterowania mocą wykazuje szereg korzystnych właściwości tej metody regulacji.



Rys.2. Schemat układu bezpośredniego sterowania mocą przekształtnika sieciowego AC/DC z nieliniowym regulatorem napięcia RU

Z tego względu metoda bezpośredniego sterowania mocą przekształtnika AC/DC, w oparciu o wirtualny strumień sieci (VF-DPC) jest obecnie szczególnie rozwijana. W ramach analizy

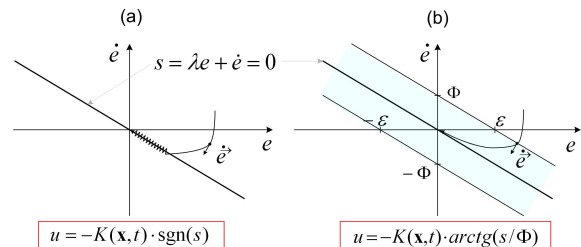
tego zagadnienia opracowano bezczujnikowy wariant tej metody regulacji [4]. Układ sterowania przekształtnikiem AC/DC z zastosowaniem metody bezpośredniego sterowania mocy opartej na estymacji wirtualnego wektora strumienia sieci przedstawiono na rys.2. Dla zapewnienia jednostkowego współczynnika mocy wymaga się utrzymania zerowej wartości mocy biernej. W dalszej części artykułu przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych stanów pracy przekształtników sieciowych z zastosowaniem metody bezpośredniego sterowania mocą przekształtnika (VF-DPC) oraz następujących nieliniowych regulatorów napięcia stałego: regulatora ślizgowego, regulatora rozmytego, oraz jednowejsściowego i dwuwęjsściowego regulatora ślizgowo-rozmytego.

4. Bezpośrednie sterowanie mocą przekształtnika z zastosowaniem ślizgowego regulatora napięcia stałego

Regulacja w trybie ruchu ślizgowego jest szczególnym przypadkiem sterowania ze zmienną strukturą. Układy sterowania ze zmienną strukturą stanowią klasę układów regulacji, w których sygnał sterujący zmieniany jest według zdefiniowanych reguł, w zależności od aktualnego stanu systemu. Sterowanie z ruchem ślizgowym jest sterowaniem odpornym, niewrażliwym na zmiany wartości parametrów układu oraz na zakłócenia [2]. Dla systemów drugiego rzędu definiuje się prostą przełączeń, względem której zachodzi proces przełączania zmiennej sterującej:

$$S = \lambda e + \dot{e} = 0 \quad (1)$$

Tak zaprojektowana prosta przełączeń stanowi obszar przyciągania dla wektora stanu. Wektor zmiennej stanu e , osiągnąwszy prostą ślizgową $S=0$, pozostaje na niej, ślizgając się w kierunku początku układu współrzędnych $e=0$ (rys.3a).

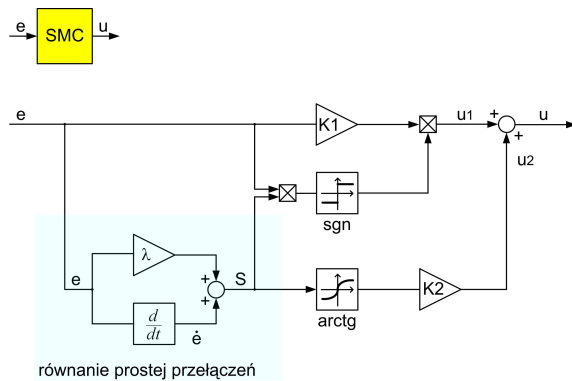


Rys.3. Sterowanie z ruchem ślizgowym: (a) przełączanie typu „bang-bang”; (b) ruch ślizgowy z warstwą ograniczającą

W przypadku, gdy sygnał wyjściowy regulatora ślizgowego jest sygnałem zadanym dla innych

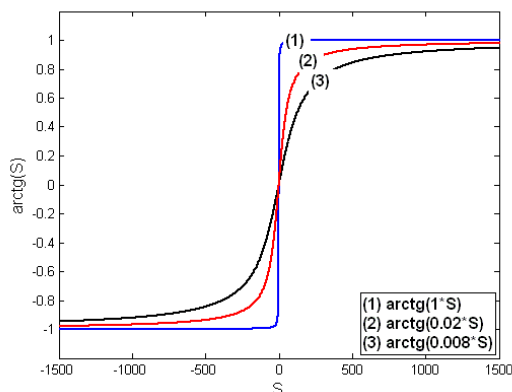
regulatorów w układzie sterowania, niekorzystne staje się zjawisko szybkich przełączeń sygnału sterującego, zwane chatteringiem. Modyfikacja metody przez wprowadzenie warstwy ograniczającej pozwala wyeliminować niepożądane zjawisko chatteringu (rys.3b). Można to osiągnąć przez zastosowanie ciągłej funkcji przełączającej w postaci funkcji arcus tangens [2, 5].

Nieliniowym regulatorem napięcia w układzie sterowania z rys.2. jest regulator ślizgowy SMC, którego strukturę przedstawia rys.4.



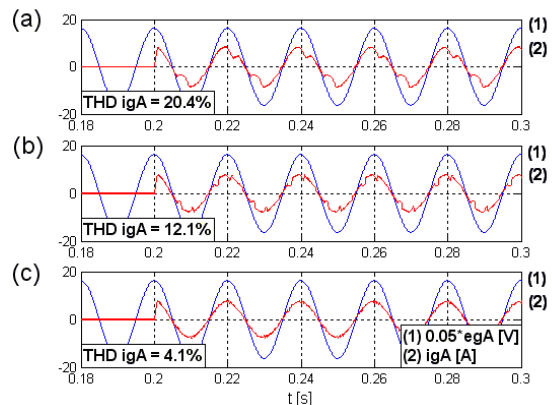
Rys.4. Schemat blokowy regulatora ślizgowego

Przebiegi funkcji przełączającej dla trzech wartości szerokości warstwy ograniczającej przedstawiono na rys. 5.



Rys.5. Przebiegi funkcji przełączającej, ograniczającej niekorzystne zjawisko chatteringu

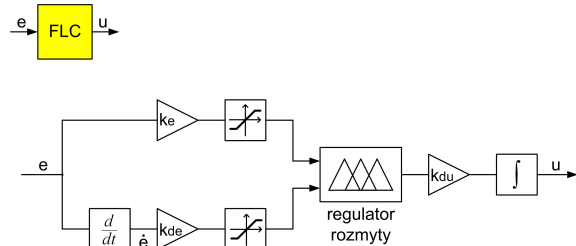
Na rys. 6 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu pobieranego z sieci przez przekształtnik AC/DC w chwili załączenia obciążenia. Zapewnienie współfazy przebiegów napięć i prądów sieci oznacza, że układ pracuje z jednostkowym współczynnikiem mocy, pobierając z sieci zasilającej jedynie moc czynną.



Rys.6. Przebiegi napięcia i prądu przewodowego sieci zasilającej uzyskane przy zastosowaniu funkcji przełączających z rys. 5: (a) arctg (1), (b) arctg (2), (c) arctg (3)

5. Bezpośrednie sterowanie mocą przekształtnika z zastosowaniem rozmytego regulatora napięcia stałego

Zasada sterowania rozmytego może być rozpatrywana jako wykorzystanie pewnego rodzaju systemu ekspertowego, opartego na bazie wiedzy. Algorytm sterowania określony jest w postaci bazy reguł. Baza reguł jest formułowana na podstawie doświadczenia inżynierskiego z uwzględnieniem teoretycznej i praktycznej znajomości rozpatrywanego obiektu [1]. Analizowano układ sterowania przekształtnikiem AC/DC z rys. 2. W obwodzie pośredniczącym przekształtnika został zastosowany regulator rozmyty FLC realizujący algorytm regulacji PI. Strukturę regulatora rozmytego przedstawiono na rys.7.



Rys.7. Schemat blokowy regulatora rozmytego

Prawo sterowania, będące opisem relacji między wejściem a wyjściem regulatora typu PI można wyrazić następującym wzorem:

$$\Delta u(k) = f(e(k), \Delta e(k)) \quad (2)$$

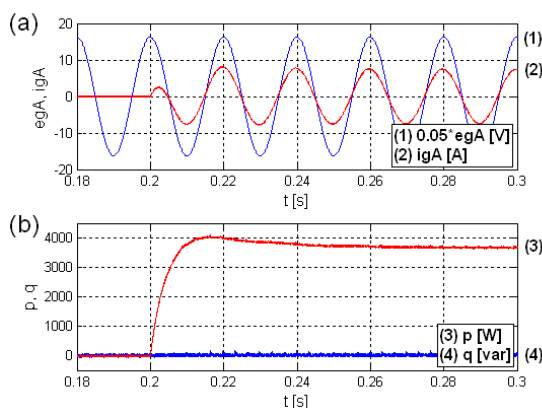
Prawo to opisuje za pomocą reguł rozmytych JEŻELI-TO relacje między zmianą sygnału sterującego $\Delta u(k)$, uchybem $e(k)$ oraz jego zmianą $\Delta e(k)$.

Dla każdego zbioru rozmytego wprowadzono siedem etykiet lingwistycznych: duży dodatni *PL* (*positive large*), średni dodatni *PM* (*positive medium*), mały dodatni *PS* (*positive small*), zerowy *Z* (*zero*), mały ujemny *NS* (*negative small*), średni ujemny *NM* (*negative medium*) i duży ujemny *NL* (*negative large*). Zakres zmiennych wejściowych regulatora rozmytego został określony na przestrzeni $[-1, 1]$ przez odpowiednio dobrane współczynniki skalowania k_e , k_{de} i k_{du} . W badaniach przyjęto bazę reguł opartą na diagonalnej bazie zaproponowanej przez Mac Vicara-Whelana, która tabelarycznie została przedstawiona na rys.8.

\hat{e} \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB
PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	NB
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
NS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE

Rys.8. Tablica reguł regulatora rozmytego *PI*

Przebiegi napięcia i prądu pobieranego z sieci przez prostownik PWM w chwili załączenia obciążenia przedstawiono na rys.9a. Warunek zapewnienia jednostkowego współczynnika mocy wymaga utrzymania zerowej wartości mocy biernej (rys.9b).



Rys.9. Przebieg napięcia i prądu przewodowego sieci (a); przebiegi estymowanej mocy czynnej i biernej przenoszonej przez przekształtnik AC/DC (b)

Z przeprowadzonych analiz i badań symulacyjnych różnych stanów pracy przekształtnika sieciowego AC/DC sterowanego za pomocą metod logiki rozmytej wynika, że na działanie regulatora rozmytego znaczny wpływ ma właściwy

dobór rodzaju funkcji przynależności, wybór metody defuzyfikacji, a także liczba przyjętych reguł.

6. Bezpośrednie sterowanie mocą przekształtnika z zastosowaniem ślizgowo-rozmytego regulatora napięcia stałego

Projektowanie dużej klasy systemów nieliniowych odbywa się z zastosowaniem powierzchni fazowej, określonej przez uchyb e i jego zmianę \dot{e} . W przypadku metod logiki rozmytej wartość rozmyta dla zmiennej sterującej jest określona zgodnie z wartościami rozmytymi błędu i zmiany błędu. Istotą projektowania sterowania jest podział powierzchni fazowej na dwie półpowierzchnie za pomocą linii przełączającej (rys.8). Biorąc pod uwagę powyższe argumenty można stwierdzić, że regulatory rozmyte działają jak zmodyfikowane regulatory ślizgowe. Reguły uwarunkowane są w taki sposób, że ujemna wartość sygnału sterującego jest generowana powyżej linii przełączającej $s=0$, a dodatnia pod nią, podobnie do sterowania ślizgowego [5, 6]. Zasadę pracy regulatora rozmytego FLC można opisać zależnością:

$$u = -K_{Fuzz}(e, \dot{e}, \lambda) \cdot \text{sgn}(S), \quad (3)$$

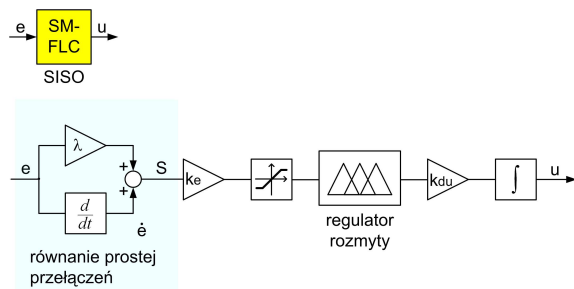
gdzie $K_{Fuzz}(e, \dot{e}, \lambda)$ jest wartością bezwzględną wyjścia sterującego regulatora rozmytego. Koryzści płynące z wprowadzenia metod logiki rozmytej do sterowania ślizgowego są następujące:

- możliwość projektowania nieliniowej funkcji przejścia regulatora FLC, umożliwiającej różną odpowiedź zamkniętego układu regulacji w różnych częściach rozmytej przestrzeni stanu rozpatrywanego układu;
- możliwość bieżącej adaptacji nieliniowej funkcji przejścia i parametrów regulatora;
- możliwość wyeliminowania niekorzystnych wysokoczęstotliwościowych zmian zmiennej sterującej, zwanych chatteringiem [5].

6.1 Analiza stanów pracy przekształtnika sieciowego AC/DC z zastosowaniem jedno-wejściowego regulatora ślizgowo-rozmytego

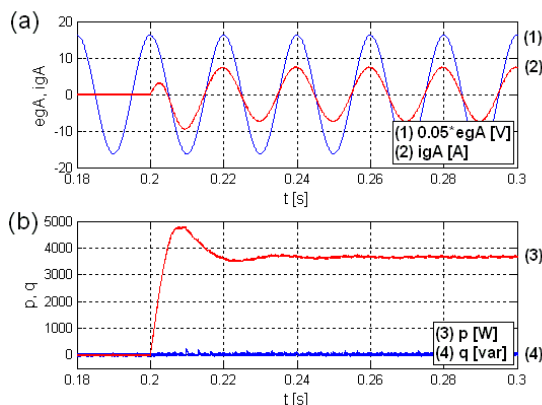
Ze względu na diagonalną postać bazy reguł regulatora rozmytego FLC (rys.8), inne podejście do projektowania sterowania uwzględnia zależność rozmytego wyjścia sterującego u od rozmytej wartości odległości $|S|$ między wektorem zmiennej stanu e a prostą przełączającą $S=0$. W ten sposób można zminimalizować liczbę reguł

rozmytych regulatora, wprowadzając na jego wejście tylko jedną zmienną stanu w postaci prostej przełączającej $S=0$ (rys.10).



Rys.10. Schemat blokowy jednoweściowego regulatora ślizgowo-rozmytego

Biorąc pod uwagę, że na wejście tradycyjnego regulatora rozmytego wprowadzane są dwie zmienne stanu, z których każda posiada m zbiorów rozmytych, liczba reguł rozmytych tego regulatora wynosi m^2 . W przypadku rozpatrywanego regulatora ślizgowo-rozmytego liczba reguł rozmytych wynosi m . Ta właściwość przemawia na korzyść rozwiązania ślizgowo-rozmytego, w przypadku realizacji praktycznej algorytmu i układu sterowania [5,6].

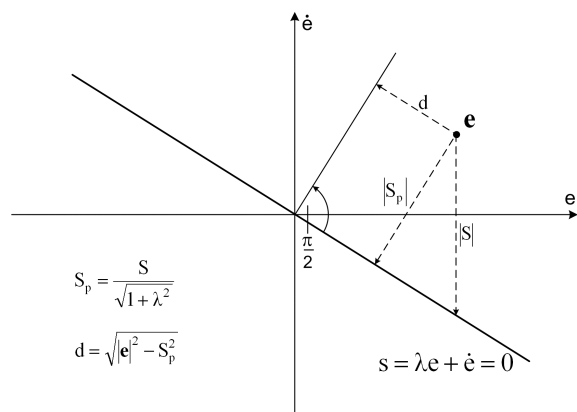


Rys.11. Przebieg napięcia i prądu przewodowego sieci (a); przebiegi estymowanej mocy czynnej i biernej przenoszonej przez przekształtnik AC/DC (b)

Rys.11a przedstawia przebiegi napięcia i prądu przewodowego sieci zasilającej przekształtnika AC/DC sterowanego w oparciu o metodę regulacji z rys.2. Nieliniowy regulator napięcia w obwodzie pośredniczącym przekształtnika został zaprojektowany według opisanej zasady sterowania ślizgowo-rozmytego. Rys.11b przedstawia chwilowe wartości estymowanej mocy czynnej i biernej, przenoszonej przez przekształtnik AC/DC.

6.2 Analiza stanów pracy przekształtnika sieciowego AC/DC z zastosowaniem dwuwęściowego regulatora ślizgowo-rozmytego

Reguły rozmyte jednoweściowego regulatora ślizgowo-rozmytego opisują zależność między odległością wektora zmiennej stanu e od prostej przełączeń $S=0$ a wyjściem sterującym u . Według tej zależności dla danej wartości odległości wektora stanu e od prostej przełączeń uchyb regulacji może osiągać zarówno duże jak i małe wartości. Jednym ze sposobów wyeliminowania tego problemu jest modyfikacja metody przez wprowadzenie dodatkowego stopnia swobody dla wektora zmiennej stanu e [5].



Rys.12. Odległość d i S_p na płaszczyźnie fazowej regulatora ślizgowo-rozmytego

Wówczas, oprócz odległości S_p od prostej przełączeń rozpatruje się odległość d wektora zmiennej stanu e od prostej prostopadłej do prostej przełączeń i przechodzącej przez środek układu współrzędnych. Po przyporządkowaniu każdej ze zmiennych S_p , d i u zbioru rozmytego otrzymuje się następującą tablicę reguł (rys.13).

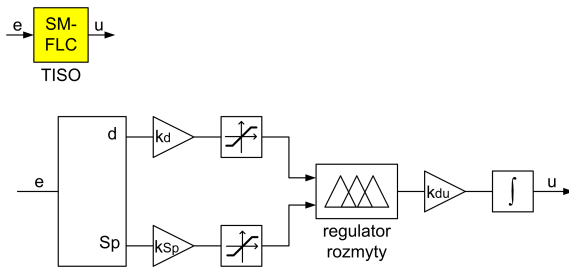
PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB	B
PB	PB	PB	PM	NM	NB	NB	NB	M
PB	PB	PM	PS	NS	NM	NB	NB	S
PB	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NB	Z
NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB	S_p \ d

Rys.13. Tablica reguł (S_p - d)

Wyjście sterujące regulatora rozmytego FLC można opisać następującą funkcją analityczną:

$$u = -K_{Fuzz}(|S_p|, d) \cdot \text{sgn}(S), \quad (4)$$

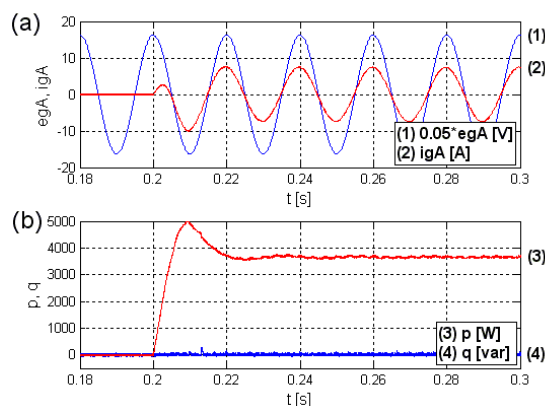
gdzie $K_{Fuzz}(|S_p|, d)$ jest wartością bezwzględną wyjścia sterującego regulatora rozmytego. Strukturę dwuwęściowego regulatora ślizgowo-rozmytego przedstawiono na rys.14.



Rys. 14. Schemat blokowy dwuwęściowego regulatora ślizgowo-rozmytego

W układzie bezpośredniego sterowania mocą przekształtnika (rys.2) zastosowano nieliniowy regulator napięcia obwodu pośredniczącego, działający w oparciu o zmodyfikowaną metodę sterowania ślizgowo-rozmytego.

Na rys.15 przedstawiono przebiegi ilustrujące zmiany wielkości elektromagnetycznych przekształtnika AC/DC w chwili załączenia obciążenia w obwodzie pośredniczącym prądu stałego.



Rys.15. Przebieg napięcia i prądu przewodowego sieci (a); przebiegi estymowanej mocy czynnej i biernej przenoszonej przez przekształtnik AC/DC (b)

7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań układów symulacyjnych różnych stanów pracy przekształtnika AC/DC sterowanego za pomocą metod ruchu ślizgowego i logiki rozmytej sformułowano następujące wnioski:

–bezczytnikowa metoda bezpośredniego sterowania mocą przekształtnika z zastosowaniem regulatora ślizgowego zapewnia szybką odpowiedź układu regulacji na zmiany obciążenia przekształtnika. Występują duże zniekształcenia przebiegów prądów sieci zasilającej. Modyfikacja metody przez wprowadzenie warstwy ograniczającej pozwala wyeliminować niepożądane zjawisko chatteringu;

–metoda bezpośredniego sterowania mocą przekształtnika z zastosowaniem regulatora ślizgowo-rozmytego w bezczujnikowej metodzie bezpośredniego sterowania mocą przekształtnika charakteryzuje się bardzo dobrą dynamiką układu regulacji. Zastosowanie tego typu regulatora pozwala zredukować liczbę reguł członu rozmytego, ze względu na wprowadzenie jednej zmiennej wejściowej w postaci prostej przełączającej;

–nieliniowe sterowanie przekształtnikami sieciowymi AC/DC z zastosowaniem metod ruchu ślizgowego i sztucznej inteligencji zapewnia odporność na zmiany wartości parametrów układu sterowania i wyeliminowanie niekorzystnego oddziaływania przekształtnika na sieć zasilającą.

8. Literatura

- [1]. Duban P., Pieńkowski K.: *Sterowanie przekształtnikiem AC/DC z zastosowaniem metod logiki rozmytej*. Pr. Nauk. Inst. Masz., Nap. i Pom. Elektr. PWr, Nr 56, Stud. i Mat., Nr 24, Wrocław 2004.
- [2]. Edwards Ch., Spurgeon S. K.: *Sliding Mode Control – Theory and Applications*. Taylor & Francis, United Kingdom, 1998.
- [3]. Knapczyk M., Pieńkowski K.: *Polowo zorientowane układy napędowe z silnikiem indukcyjnym, falownikiem napięcia i przekształtnikiem sieciowym AC/DC o dwukierunkowym przepływie energii*. Pr. Nauk. Inst. Masz., Nap. i Pom. Elektr. PWr, Nr 56, Stud. i Mat., Nr 24, Wrocław 2004.
- [4]. Knapczyk M., Pieńkowski K.: *Bezczytnikowe metody sterowania przekształtnikami sieciowymi AC/DC o dwukierunkowym przepływie energii*. Pr. Nauk. Inst. Masz., Nap. i Pom. Elektr. PWr, Nr 56, Stud. i Mat., Nr 24, Wrocław 2004.
- [5]. Palm R., Driankov D., Hellendoorn H.: *Model Based Fuzzy Control – Fuzzy Gain Schedulers and Sliding Mode Fuzzy Controllers*, Spr.-Verlag, 1996.
- [6]. Yager R. R., Filev D. P.: *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, Warszawa, WNT, 1995.

Autorzy

Mgr inż. Michał Knapczyk

michal.knapczyk@pwr.wroc.pl

Dr hab. inż. Krzysztof Pieńkowski

krzysztof.pienkowski@pwr.wroc.pl

Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław