

## STUDIUM WYKORZYSTANIA PRZEKSZTAŁTNIKA MACIERZOWEGO DO BUDOWY PRZESUWNIKA FAZOWEGO

Tomasz SIENKO<sup>1</sup>, Jerzy SZCZEPANIK<sup>2</sup>

Politechnika Krakowska

1. tel.: 12-628-26-23; e-mail: sienko77@o2.pl

2. tel.: 12-628-26-23; e-mail: jerzy\_szczepamik@hotmail.com

**Streszczenie:** W pracy wykonano analizę zastosowania wielofazowego Przekształtnika Macierzowego (*PM*) do budowy Przesuwnika Fazowego (*PS*). Analizę przeprowadzono przy pomocy technik symulacyjnych oraz pomiarów wykonanych na sześciofazowym modelu przekształtnika zbudowanym w laboratorium. Zaprezentowano trzy podstawowe schematy kontroli oraz ich związek z właściwościami *PM*. Poza zdolnością przesuwnika fazowego do zmiany transferu mocy czynnej, interesujący jest wpływ urządzenia na transmisję mocy bierniej co pokazano w artykule.

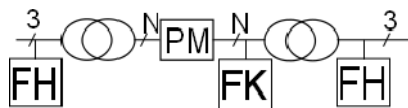
Nowo pokazane właściwości *PM* pozwalają na budowę *PS* o większych możliwościach kontroli Systemu Elektroenergetycznego (*SEE*) niż obecnie dostępne urządzenia.

Możliwości różnych wariantów sterowania *PM*, oraz duża prędkość reakcji bazującego na nim *PS* będą niewątpliwie przydatne w kontroli stanów dynamicznych pracy *SEE* (stanach po zaburzeniowych) np. do szybkiej likwidacji kołysań generatorów czy regulacji rozplywu mocy.

**Słowa kluczowe:** przekształtnik macierzowy, przesuwnik fazowy, FACTS, kontrola rozplywu mocy

### 1. WSTĘP

W chwili obecnej w Europie na wskutek budowy nowych połączeń zwiększa się wielkość *SEE* pracującego synchronicznie, a równocześnie zwiększa się penetracja Systemu Elektroenergetycznego przez źródła odnawialne. Skutkuje to zwiększeniem niekontrolowanych przepływów kołowych (loop flow) [1–4] i powstaniem potrzeby ograniczenia tego zjawiska [5–7] oraz konieczności szybkiej interwencji w rozplywu mocy w *SEE* (aby ograniczyć prawdopodobieństwo poważnej awarii lub nawet blackoutu [8–11]).



Rys. 1. Przesuwnik fazowy z przekształtnikiem macierzowym (*PM*). *FK* – filtr komutacyjny, *FH* – filtr harmonicznych

Potrzebne są zatem nowe idee, technologie i urządzenia służące do kontroli *SEE* (*FACTS*). W artykule wykonano analizę pracy nowego urządzenia posiadającego możliwości optymalizacji rozplywu mocy w warunkach statycznych oraz charakteryzującego się dużą prędkością odpowiedzi (tłumienie oscylacji między systemowych i kontrola rozplywu mocy w stanach pozaburzeniowych) – przesuwnika fazowego z *PM*. Urządzenie to (rys. 1) oraz część jego możliwości (przy wybranej metodzie sterowania) przedstawiono w artykułach [12–14]. Modyfikacja sposobu sterowania *PM* po-

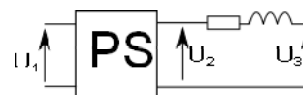
zwala uzyskać urządzenie o znacznie większych niż poprzednio sądzono możliwościach.

### 2. ZASADA DZIAŁANIA I OPIS URZĄDZENIA

Analizując rys. 2 można uzyskać powszechnie znane związki opisujące przepływ mocy przez linię:

$$P \sim v \quad Q \sim (U_2 - U_3) \quad (2)$$

gdzie jest  $v$  kątem pomiędzy  $\underline{U}_2$  i  $\underline{U}_3$  a  $U_2$  i  $U_3$  wartości napięć



Rys. 2. Przesuwnik fazowy (*PS*) współpracujący z linią

W konsekwencji można uznać, że skuteczną metodą kontroli mocy czynnej wymienianej pomiędzy dwoma systemami jest wykorzystanie urządzeń zmieniających fazę napięcia  $\underline{U}_2$  względem  $\underline{U}_1$ . Jeśli takie urządzenie także pozwoli również na zmianę amplitudy  $\underline{U}_2$  – możliwa będzie również kontrola mocy bierniej.

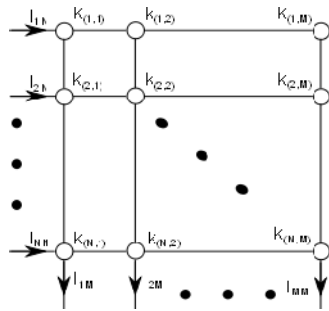
W *SEE* taką rolę pełnią: przesuwnik fazowy wykorzystujący transformator [15, 16] lub urządzenie *UPFC* [17, 18]. Urządzenia te posiadają jednak szereg wad związanych z zakresem interwencji i szybkością działania.

Rdzeniem proponowanego urządzenia (*PS*) jest wielofazowy *PM* (rys. 3) sterowany obszarowo. Jest on zbudowany z w pełni sterowalnych energoelektronicznych kluczy łączących bezpośrednio fazy „wejściowe” i „wyjściowe”. *PM* nie posiada zasobników energii – jego działanie można zatem sprowadzić do narzucenia więzów na napięcia i prądy po obu jego stronach [19, 20]. Koncepcja metody obszarowej sterowania *PM* opiera się na geometrycznej interpretacji pracy przekształtnika – Sobczyk [21, 22].

Autorzy pracy dokonali szeregu modyfikacji w oryginalnej koncepcji sterowania *PM* umożliwiających generację napięć o kształcie zbliżonym do sinusoidalnego na przez przekształtnik oraz umożliwiających sterowanie w stanach dynamicznych [23–29].

W artykule pokazano trzy podstawowe koncepcje sterowania przekładnikiem oraz wpływ tych sterowań na właściwości przekształtnika pracującego bez zmiany częstotliwości (konwersja 50 na 50 Hz). Właściwości przesuwnika fazowego dla poszczególnych sterowań zbadano nie tylko na podstawie symulacji ale także na podstawie przebiegów

otrzymanych z laboratoryjnego modelu przekształtnika o strukturze 6x6.



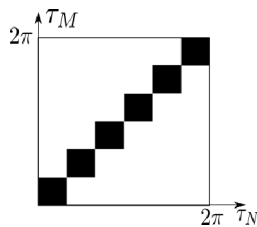
Rys. 3. Przekształtnik macierzowy

Opracowane koncepcje sterowania oparto na założeniach:

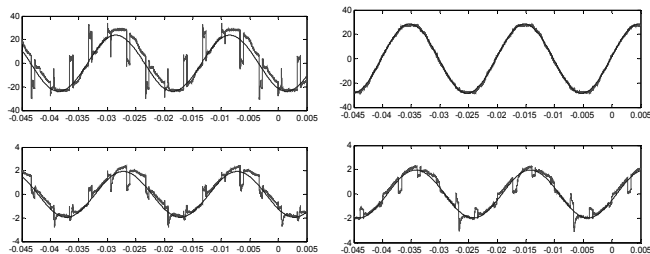
- Pierwszą na założeniu że dany przebieg wyjściowy przesunięty w fazę względem przebiegu wejściowego jest tworzony tylko z faz wejściowych sąsiednich w stosunku do pożądanego przebiegu wyjściowego.
- Druga koncepcja polega na budowie przebiegu wyjściowego z fragmentów faz wejściowych przecinających pożądaną przebiegu wyjściowy.
- Trzecią na zbudowaniu przebiegu wyjściowego z fragmentów faz wejściowych które w danej chwili są najbliższe pożądanego przebiegu.

Dla zaproponowanych algorytmów sterowań wykonano szereg eksperymentów symulacyjnych oraz na modelu fizycznym (laboratoryjnym). Wyniki pokazane w artykule otrzymano dla przesuwnika pracującego w układzie pracy ze źródła napięciowego na obciążenie indukcyjne.

### 3. STEROWANIE „Z DWÓCH SĄSIEDNICH”



Rys. 4. Obszar przewodzenia– sterowanie „z dwóch sąsiednich”



Rys. 5. Napięcie (górną) i prąd (dół) na wyjściu (po lewej) i wejściu (po prawej) PM dla sterowania „z dwóch sąsiednich”.

Kolor czerwony przebiegi zmierzone, kolor niebieski – nałożone pierwsze harmoniczne

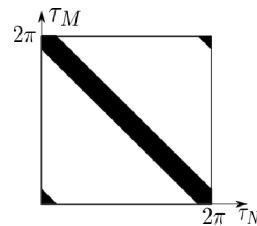
W przypadku gdy PM nie dokonuje zmiany częstotliwości napięcie wyjściowe jest składane z dwóch sąsiednich faz wejściowych (rys. 5), fazę napięcia wyjściowego reguluje się poprzez zmianę stosunku czasów w jakim na wyjście jest przyłączona jedna z dwóch sąsiednich z faz.

Analiza wyników pokazuje że transfer napięcia dla tego sterowania jest związany z kątem przesunięcia wprowadzanym przez przekształtnik, PM pozwala na transfer mocy biernej bez zmiany znaku (rys. 5).

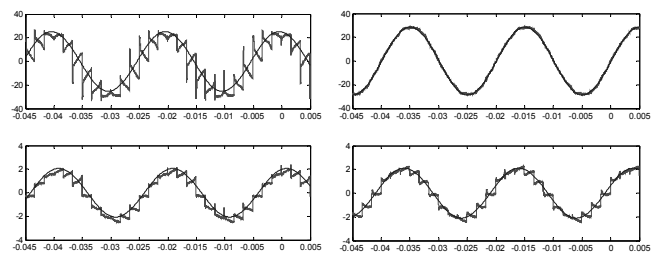
### 4. STEROWANIE „NA PRZECINAJĄCE”

Sterowanie to występuje w literaturze również pod nazwą jednookresowe (one-periodical), a algorytm i własności opisano w pracach [30–32]. Obszar przewodzenia dla tego sterowania pokazano na rysunku 6.

Dla sterowania „na przecinające” transfer napięcia nie zależy od kąta  $\alpha$ , ponadto wszystkie klucze pracują przez taki sam odcinek czasu (w trakcie okresu). Godną uwagi jest również ekstremalnie niska ilość przełączeń – 4 na klucz na okres. Analiza wyników pozwala zauważyć, że tak sterowany PM pozwala na transfer mocy biernej i odwraca jej znak (rys. 7.)

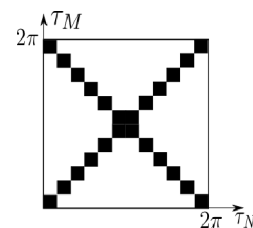


Rys. 6. Obszar przewodzenia sterowanie „na przecinające” (jednookresowe)



Rys. 7. Napięcie (górną) i prąd (dół) na wyjściu (po lewej) i wejściu (po prawej) PM dla sterowania „na przecinające się”. Kolor czerwony przebiegi zmierzone, kolor niebieski – nałożone pierwsze harmoniczne

### 5. STEROWANIE „Z NAJBLIŻSZEJ”

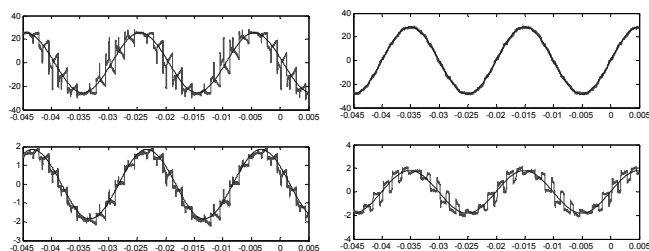


Rys. 8. Obszar przewodzenia i przebieg – sterowanie „z najbliższej”

Przebieg napięcia wyjściowego składa się z dominującej (mający największy udział) sinusoidy napięcia wejściowego uzupełnionej wstawkami z sinusoid przecinających projektowaną sinusoidę (rys. 9).

Transfer napięcia dla tak sterowanego PM jest funkcją kąta, przekształtnik jest zdolny do transferu mocy biernej oraz zmiany jej wartości i znaku. Przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem a prądem na wejściu przekształtnika jest funkcją kąta przesunięcia wprowadzanego przez przekształtnik. Okupione to jest dużymi zniekształceniami generowa-

nymi oraz dużymi wymogami dotyczącymi synchronizacji oraz komutacji.



Rys. 9. Napięcie (góra) i prąd (dół) na wyjściu (po lewej) i wejściu (po prawej) PM dla sterowania „z najbliższej”. Kolor czerwony przebiegi zmierzone, kolor niebieski – nałożone pierwsze harmoniczne.

## 6. WNIOSKI

W pracy pokazano, że przesuwnik fazowy oparty na przekształtniku macierzowym posiada możliwość wpływu na przesył mocy biernej poprzez dwustronnie zasilaną linię elektroenergetyczną. Co więcej poza wpływem na przesyłaną moc czynną istnieje również możliwość zmiany charakteru przesyłanej mocy biernej a nawet manipulacji jej wielkością tylko za pomocą odpowiedniego wysterowania przekształtnika. W tej chwili trwają starania związane z budową modelu przekształtnika który mógłby być zastosowany do wybudowanego już modelu Systemu Elektroenergetycznego, co umożliwi badanie układów sterowania rozpięciem mocy w systemie. Przebiegi które pokazano w artykule są przebiegami zbieranymi bezpośrednio z zacisków laboratoryjnego modelu przesuwnika pracującego ze źródła napięciowego na obciążenie indukcyjne bez filtrów wyższych harmonicznych. Analiza pracy układów pokazuje że do rozwiązania pozostaje jeszcze szereg zagadnień związanych między innymi z synchronizacją pracy przekształtnika oraz jego komutacją.

Należy też wspomnieć że po badaniach nad wpływem przesuwnika na przepływ mocy biernej zgłoszono wniosek patentowy opisujący proponowane urządzenie do kompensacji mocy biernej wykorzystującym własności sterowań *PM* [33].

Reasumując, prezentowany w pracy Przesuwnik Fazowy dla różnych sterowań *PM* wykazuje ciekawe własności pozwalające na znacznie większą ingerencję w rozpięciem mocy w *SEE* niż przesuwnik fazowy zbudowany na transformatorze.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Komunikat PSE Operator w sprawie wspólnego stanowiska CEPS, MAVIR, PSE Operator i SEPS na temat definicji obszarów rynkowych. <http://www.pse.pl/index.php?dzid=14&did=1082>
2. Kąkol, A. Sobczak, B. Trębski R. Badanie wpływu wyłączenia i załączania mocno obciążonej linii przesyłowej na pracę elektrowni z turbogeneratorami, *Acta Energetica* 2011, nr 3 s. 23-28
3. Cvijic, S.; Ilic, M.D., “Part II: PAR Flow Control Based on the Framework for Modeling and Tracing of Bilateral Transactions and Corresponding Loop Flows”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 6, pp.2715,2722, Nov. 2014 doi: 10.1109/TPWRS.2014.2312372
4. Korab R.: Możliwości zwiększenia zdolności przesyłowych połączeń transgranicznych KSE. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2/2011
5. Korab, R. Owczarek, R. Kształtowanie transgranicznych przepływów mocy z wykorzystaniem przesuwników fazowych instalowanych w liniach wymiany *Przegląd Elektrotechniczny* 2012 R.88 nr 10b s. 299–302

6. Cotrus, A.; Adam, M.; Andrusca, M.; Molodeschi, M.; Pantelimon, R., *Power flow control equipment, Electrical and Power Engineering (EPE), 2014 International Conference and Exposition on*, pp. 284,288, 16–18 Oct. 2014 doi: 10.1109/ICEPE.2014.6969914
7. Zhicheng Li; Jinghan He; Xiaojun Wang; Yip, T.; Guomin Luo, “Active control of power flow in distribution network using flexible tie switches”, *Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on*, pp. 1224,1229, 20–22 Oct. 2014 doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993526
8. Awaria systemowa w dniu 4 listopada 2006, raport końcowy, UCTE, 2007
9. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: Causes and recommendations," US-Canada Power System Outage Task Force, 2004, accessed in June 2010. [Online]. Available: <https://reports.energy.gov/>
10. Final report: System disturbance on 4 November, 2006, “Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, 2007”, accessed in June 2010. [Online]. Available: <http://www.entsoe.eu/fileadmin/user/upload/library/publications/ce/otherreports>
11. Oziemblewski, K. Opala K. Możliwości oceny bieżącego stanu stabilności SEE. Pochodne zamiast charakterystyk. *Acta Energetica* 2011 nr 2, s. 33–42
12. Szczepanik, Jerzy; Sieńko, Tomasz: „Nowoczesne urządzenia do kontroli rozpięciem mocy w systemie elektroenergetycznym oparte na wielofazowym przekształtniku macierzowym” *APE* 2013
13. Szczepanik, J. Sieńko, T. „Nowoczesne urządzenia do kontroli rozpięciem mocy w systemie elektroenergetycznym oparte na wielofazowym przekształtniku macierzowym” *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 32 2013 83–86, 2013
14. Szczepanik, Jerzy, Sieńko, Tomasz; „New Multiphase Matrix Converter Based Device for Power Flow Control” *Acta Energetica* 4/17 (2013) pp. 158–165
15. Verboomen, J.; Van Hertem, D.; Schavemaker, P.H.; Kling, W.L.; Belmans, R., *Phase shifting transformers: principles and applications, Future Power Systems, 2005 International Conference on*, vol., no., pp.6 pp.,6, 18–18 Nov. 2005 doi: 10.1109/FPS.2005.204302
16. Rimez J., Van Der Planken R., Wiot D., Claessens G., Jottrand E., Declercq J.: Grid Implementation of a 400 MVA 220/150 kV  $-15^{\circ}/+3^{\circ}$  Phase-shifting Transformer for Power Flow Control in the Belgian Network: Specification and Operational Considerations. Paper no A2-202, Proceedings of the 2006 CIGRE Session, Paris, France, August 2006
17. Namin, M.H., Using UPFC in order to Power flow control, *Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1486,1491, 15–17 Dec. 2006 doi: 10.1109/ICIT.2006.372401
18. Murugan, A.; Thamizmani, S., A new approach for voltage control of IPFC and UPFC for power flow management, *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on*, vol., no., pp.1376,1381, 10–12 April 2013 doi: 10.1109/ICEETS.2013.6533588
19. Sieńko, T. Schemat zastępczy przekształtnika macierzowego dla stanów dynamicznych przy sterowania jednookresowym *Czasopismo Techniczne 1-E/2012 zeszyt 24, rok 109, ISSN 0011-4561, ISSN 1897-6301*
20. Sieńko, T.; Sobczyk, T. J. Modelling concept of  $N \times M$  matrix converter under periodic control for dynamic states, *Archives of Electrical Engineering*, 63 2 305–315, 2300–2506, 2014
21. Sobczyk T.J. Control strategy of matrix converters, in *Proc. of European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 93–97, 1993, vol. 4,
22. Sobczyk, T. J. The matrix converter – a universal power electronic unit, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, 2002, pp. 5–21, ISSN 0032-6216,
23. Szczepanik J., Sieńko T.: New control scheme and new application area for a multiphase matrix converter. (s. 85–89) *Third*

- IASTED Asian Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS April 2–4, 2007, Phuket, Thailand ISBN CD: 978-0-88986-657-7
24. Szczepanik J., Sieńko T.: New control algorithm for multiphase matrix converter, Proceedings of 16th International Conference on Systems Science 4-6 September 2007, Wrocław, Poland (tom III s 241-250) ISBN 978-83-7493-341-4
  25. Szczepanik J., Sieńko T. A new concept of application of multiphase matrix converter in power system, Proceedings of EUROCON 2007 The International Conference on "Computer as a Tool" Warsaw, Poland September 9-12 ISBN: 1-4244-0813-X IEEE Catalog Numer 07EX1617C
  26. Sieńko T., Szczepanik J., Sobczyk T. J. Voltage Phase Controller for Power Systems, Proceedings of 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, 9–11 October 2007 ISBN of CD 978-84-690-9441-9
  27. Szczepanik, J.; Sienko, T. New Control Strategy for Multiphase Matrix Converter, Systems Engineering ICSENG'2008 19–21.08.2008 Page(s): 121–126 Digital Object Identifier 10.1109/ICSEng.2008.44
  28. Szczepanik, J. Sienko, T. Control scheme for a multiphase matrix converter"EUROCON2009. This paper appears in: EUROCON 2009, EUROCON '09. Publication Date: 18–23 May 2009 On page(s): 545–551 Location: St.-Petersburg Print ISBN: 978-1-4244-3860-0 INSPEC Accession Number: 10798882 Digital Object Identifier: 10.1109/EURCON.2009.5167685 Current Version Published: 20 lipiec 2009
  29. Tomasz Sieńko, Jerzy Szczepanik The study of Implementation of Multiphase Matrix Converter in Power System, Przegląd Elektrotechniczny vol 2013. Nr 8 RokLXXXIX PL ISSN 0033-2097, (s.10–15).
  30. Sieńko T., Sobczyk T. J. Matrix converter control for applications to multi-phase high-speed microgenerators. Archives of Electrical Engineering 2004 (vol. LIII No. 2, pp. 217–228)
  31. Sobczyk T. J, Sieńko T. Application of Matrix Converter as a Voltage Phase Controller in Power System S13-17 IEEE SPE-EDAM 23–26.05.2006 Taormina, Italy ISBN: 1-4244-0194-1
  32. Sieńko T. Sobczyk T. Sposób sterowania przekształtnikiem macierzowym Polski Patent: (21) 358928, (22) 27-02-2003, H02M5/00, BUP 06-09-2004 18/2004,WUP 29-01-2010 01/2010
  33. Sieńko T., Szczepanik J., Hudym V. Sposób kompensacji mocy biernej, urządzenie do kompensacji mocy biernej Zgłoszenie oznaczone jest numerem P.408817.

## THE STUDY OF THE APPLICATION OF MATRIX CONVERTER INTO PHASE SHIFTING DEVICE

Nowadays, in modern power systems there is a tendency to build more and more dispersed energy sources, to increase their transmission abilities and to increase their size. Parallel to these actions, the requirements regarding the quality of the delivered energy and system reliability are also increased. These changes required the new solutions to system control in both static and dynamic states of work to be implemented.

The paper includes the analysis of the application of the multiphase Matrix Converter (MC) to the development of the phase shifting device. The analysis was performed not only on the basis of the simulation, but also on the basis of the waveforms obtained from the real life model constructed in the laboratory. The relationships between the device control algorithms and the properties of the built on their basis phase shifting device were thoroughly investigated. Some of the described properties of the MC are not only connected to its ability to influence active power flow in the power line, but also to its impact on reactive power transmission. For three developed control procedures, the reactive power flow control was investigated for MC working as a voltage source inverter on inductive load. The capabilities of alternative control procedures and short device reaction times can be useful not only for power flow control, but also during system dynamic states for example to fast dumping of the system oscillations. The research is the continuation of the previously published work, and its next step will include the solution to the MC commutation problems and the implementation of the MC based shifting device to the already build model of the multi-node power system.

**Keywords:** matrix converter, phase shifter, FACTS, power flow control