

NOWOCZESNE URZĄDZENIA DO KONTROLI ROZPŁYWU MOCY W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM OPARTE NA WIELOFAZOWYM PRZEKSZTAŁTNIKU MACIERZOWYM – REFERAT KONFERENCYJNY

Jerzy SZCZEPANIK¹, Tomasz SIENKO¹

1. Politechnika Krakowska

Streszczenie: Artykuł prezentuje koncepcję konstrukcji przesuwnika fazowego zbudowanego w oparciu o przekształtnik macierzowy (MC – matrix converter) ze specjalnie opracowanym na potrzeby tego urządzenia algorytmem kontroli. W artykule zawarto również wyniki prób symulacyjnych pokazujących wpływ urządzenia na rozplływ mocy w prostym Systemie Elektroenergetycznym - SEE.

Słowa kluczowe: FACTS, przekształtnik macierzowy, kontrola rozpllywu mocy w SEE.

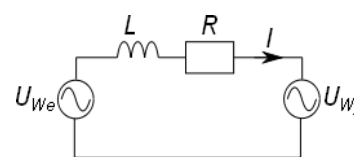
1. WSTĘP

Kontrola rozpllywu mocy jest jednym z kluczowych zagadnień w procesie sterowania pracą SEE. Zapewnienie prawidłowego rozpllywu mocy pozwala na osiągnięcie wysokich parametrów techniczno-ekonomicznych pracy systemu (minimalizacja strat przesyłowych, zapewnienie rezerwy stabilności). W stanach zaburzeniowych i po- zaburzeniowych w SEE kontrola rozpllywu mocy ma istotne znaczenie dla utrzymania pracy systemu (minimalizacja skutków awarii, ograniczenie ryzyka blackout'u), a zatem niezbędne jest posiadanie urządzeń pozwalających na szybką stabilizację pracy SEE.

Presja na instalację urządzeń do kontroli rozpllywu mocy w SEE będzie się powiększać w miarę zwiększania się rozmiarów SEE oraz wzrostu penetracji SEE przez źródła rozproszone i niespokojne – np. wiatraki. Z kolei nacisk na rozwój technologiczny sieci przesyłowej (mikro-grids, smart grids) zmierzający do jej optymalizacji i lepszej użycia zwiększa zapotrzebowanie na urządzenia klasy FACTS [1, 2] (Elastycznego Systemu Przesyłu Energii Elektrycznej) w tym na urządzenia przeznaczone do kontroli rozpllywu mocy.

2. PRZESYŁ MOCY CZYNNEJ I BIERNEJ PRZEZ LINIĘ ELEKTROENERGETYCZNĄ

Kontrola rozpllywu mocy czynnej i biernej w systemie elektroenergetycznym może być rozpatrzona poprzez pryzmat kontroli rozpllywu mocy przez linię energetyczną o uproszczonym schemacie zastępczym:



Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy linii z uwzględnieniem elementów wzdłużnych

Definiując moc pozorną jako $S = U_{wy}I$ oraz biorąc pod uwagę iż:

$$I = \Delta U / (R + jX) \quad (1)$$

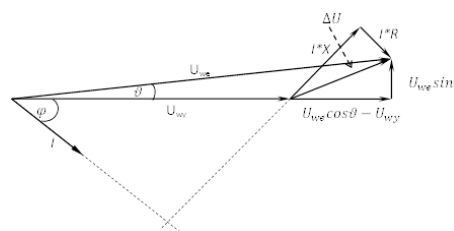
oraz

$$\Delta U = U_{we} \cos \vartheta - U_{wy} + jU_{we} \sin \vartheta \quad (2)$$

Przy założeniu że $X \gg R$ otrzymuje się zależność:

$$S = \frac{U_{wy}U_{we}}{X} \sin \vartheta - j \frac{U_{wy}U_{we}}{X} \left(\cos \vartheta - \frac{U_{wy}}{U_{we}} \right) \quad (3)$$

Część rzeczywista mocy pozornej (tj. moc czynna) zależy silnie od kąta pomiędzy napięciami a na część urojoną (moc bierna) większy wpływ mają wartości napięć.



Rys.2. Wykres wskazowy modelu linii z rysunku 1 pracującego przy prądzie indukcyjnym gdzie: φ – kąt pomiędzy prądem i napięciem ϑ – kąt pomiędzy U_{we} i U_{wy} .

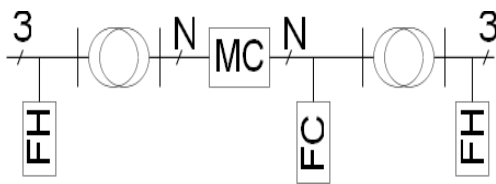
Dlatego też wydaje się że najlepszym obecnie sposobem kontrolowania przepływu mocy czynnej jest kontrola kąta pomiędzy napięciami na końcach linii, a metodą kontroli rozpllywu mocy biernej jest kontrola różnicy wartości tych napięć. Techniczną realizacją tych postulatów jest kontrola kąta jednego z napięć na końcu linii za pomocą przesuwnika fazowego lub za pomocą napięcia „dodawczego” (urządze-

nia UPFC[3]). Przesuwnik fazowy może być zrealizowany w formie transformatora [4][5] lub układu energoelektronicznego (DC link lub proponowany w pracy przekształtnik macierzowy).

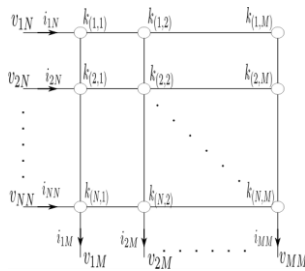
3. KONCEPCJA PRZESUWNIKA FAZOWEGO OPARTEGO NA PRZEKSZTAŁTNIKU MACIERZOWYM

Schemat proponowanego urządzenia obejmującego zarówno przekształtnik macierzowy jak i urządzenia pomocnicze przedstawia rysunek 3.

Przekształtnik macierzowy MC (rys.4) jest układem energoelektronicznym zbudowanym z kluczy o których zakłada się że są w pełni sterowane (w każdej chwili możliwe jest przejście klucza ze stanu otwarcia do stanu odcięcia jak i ze stanu odcięcia do stanu otwarcia) oraz symetryczne (własności klucza nie zależą od jego polaryzacji).



Rys. 3. Schemat blokowy przesuwnika fazowego (PS) zbudowanego z wykorzystaniem przekształtnika macierzowego. MC - przekształtnik macierzowy o wymiarze $N \times N$, FC - filtr komutacyjny, FH - filtry harmonicznych.



Rys. 4. Przekształtnik macierzowy - pokazano sposób indeksowania kluczy, napięć i prądów.

Istnieje szereg koncepcji sterowania przekształtnika macierzowego [6]. Ze względu na specyficzne wymogi dotyczące proponowanego obszaru zastosowania do sterowania MC wykorzystano algorytm oparty na koncepcji obszarowej [7, 8]. Na potrzeby sterowania MC w stanach dynamicznych dokonano modyfikacji koncepcji obszarowej uzależniając sterowanie od faz biegnących τ_N i τ_M wielofazowych układów AC po stronach N i M przekształtnika.

Zwykle układ wielofazowy definiowany jest jako:

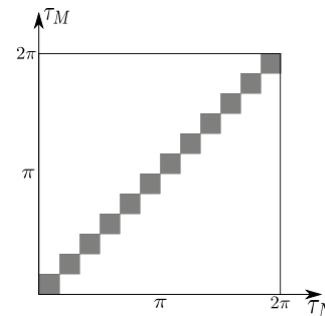
$$U = \begin{bmatrix} A \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) \\ \vdots \\ A \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi + (N - 1) \frac{2\pi}{N}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie: U - wektor napięć, A - amplituda, N - ilość faz układu AC, ω - pulsacja, ψ - faza początkowa układu AC.

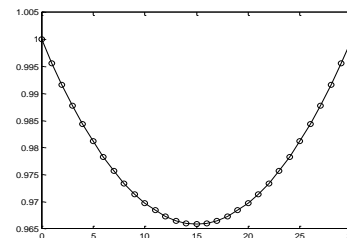
W warunkach rzeczywistych zarówno ω jak i ψ mogą być zmienne. Fazę biegnącą dla takiego układu można zdefiniować jako: $\tau = \omega \cdot t + \psi$. Technicznie fazę biegnącą przebiegu można wyznaczyć za pomocą pętli fazowej (PLL).

W proponowanym urządzeniu MC pracuje w specyficznej sytuacji: dokonuje konwersji pomiędzy dwoma elektroenergetycznymi układami wielofazowymi o tej samej częstotliwości, a ta aplikacja wymaga wysokiego transferu napięcia, niewielkiego zniekształcenia prądów po obu stronach przekształtnika i nie zmieniania ani znaku ani wartości mocy biernej (dla przebiegów odkształconych wykorzystano definicję mocy biernej zaproponowaną przez Kimbark'a [9]).

W związku z powyższymi wymogami wykonano szereg analiz różnego typu obszarów przewodzenia [10,11,12,13,14,15] i opracowano procedury ich generacji. Do sterowania proponowanego urządzenia wykorzystano obszar przewodzenia pokazany na rysunku 5. Obszar reprezentuje stan klucza na pozycji (I, I) w funkcji faz biegnących τ_N i τ_M . Jeśli w danej chwili t_i punkt o współrzędnych $(\tau_N(t_i), \tau_M(t_i))$ należy do tego obszaru to klucz $k_{(I, I)}$ znajduje się w stanie przewodzenia.



Rys. 5. Wykorzystany w pracy obszar przewodzenia dla klucza na pozycji (I, I) .



Rys. 6. Zależność transferu napięcia od kąta przesunięcia wprowadzanego przez MC dla przekształtnika 12×12 i proponowanego w pracy obszaru przewodzenia.

Zaletą proponowanego w tej pracy obszaru przewodzenia jest to że umożliwia on pracę „bez interwencyjną” urządzenia tzn. możliwe jest połączenie na „stałe” wybranych faz po obu stronach przekształtnika jeśli fazy biegnące przebiegów napięć po obu stronach przekształtnika są identyczne. Wadą: zależność transferu napięcia od kąta przesunięcia wprowadzanego przez przekształtnik. Należy jednak zauważyć że w miarę wzrostu rozmiarów maczyzy przekształtnika zależność ta jest coraz mniej istotna. Istotnymi zaletami struktury wielofazowej MC [16, 17] jest zmniejszenie prądów kluczy i dla proponowanego obszaru przewodzenia - zmniejszenie zaburzeń spowodowanych komutacją.

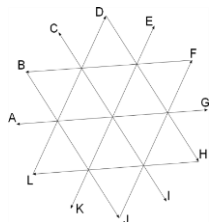
Ze względu na łatwe wykonanie transformatorów zmieniających liczbę faz z 3 na 12 (rys.7) i z powrotem w artykule wykonano symulację dla przekształtnika 12×12 .

Filtr komutacyjny (FC) pełni w urządzeniu podwójną rolę: zmienia charakter strony po której jest zainstalowany ze źródła „prądowego” na źródło „napięciowe”, a także jest

częścią układów zapewniających odpowiednią jakość energii na zaciskach urządzenia.

4. MODEL SYMULACYJNY URZĄDZENIA

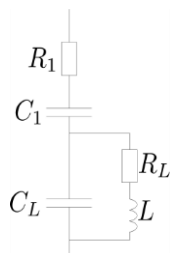
Symulację pracy urządzenia wykonano z wykorzystaniem pakietu MATLAB/Simulink z wykorzystaniem toolbox'u SimPowerSystems. Urządzenie zbudowano z standardowych bloków.



Rys.7. Wykres wskazowy strony 12-to fazowej transformatora zmieniającego liczbę faz z 3 na 12.

Filtr komutacyjny (FC) jest filtrem pasmowo zaporowym o schemacie układu pokazanym na rysunku 8. Wykorzystanie filtra o takiej strukturze pozwala na instalację stosunkowo dużych kondensatorów bez negatywnego oddziaływania na własności urządzenia.

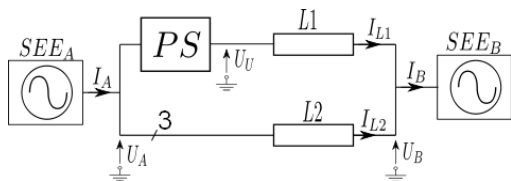
Dla proponowanego rozmiaru przekształtnika macierzewego (12×12) i obszaru sterowania (Rys.5) należy spodziewać się harmonicznych rzędów: 23 i 25, 47 i 49 oraz harmonicznych wyższych rzędów.



Rys. 8. Schemat filtra komutacyjnego (FC)

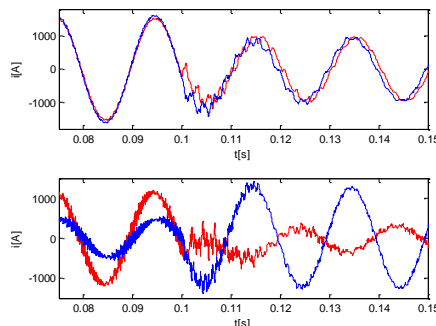
5. PRÓBY SYMULACYJNE URZĄDZENIA

Wykonano szereg symulacji, a w opracowaniu, na rysunkach 10 i 11 pokazano tylko przykładowe przebiegi (prądy i napięcia fazy A) dla zmiany kąta wprowadzanego przez urządzenie z $-7,5[^\circ]$ do $6[^\circ]$ w chwili $0.1[s]$ (zmiana wykonana w ciągu $40[\mu s]$), różnica faz pomiędzy podsystemami ($\psi_A - \psi_B$) $-12[^\circ]$, stosunek $U_A/U_B=0,97$, moce zwarciowe podsystemów $9GVA$.

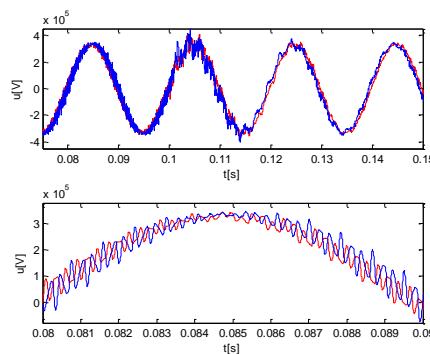


Rys. 9. Schemat układu do badania wpływu przesuwnika fazowego. SEE_A, SEE_B – systemy elektroenergetyczne, $L1, L2$ – linie elektroenergetyczne, PS – przesuwnik fazowy. Na schemacie zaznaczono lokalizację analizowanych wielkości.

W przykładowym przypadku w wyniku działania urządzenia uzyskano wyniki: zmiana mocy czynnej przesyłanej przez linię $L1$ z $570MW$ na $-156MW$, mocy biernej z $-63MVar$ na $39MVar$, przez linię $L2$ z $228MW$ na $624MW$ i $36MVar$ na $-15MVar$, mocy wyprowadzanej z podsystemu A z $747MW$ na $462MW$, i $-42MVar$ na $96MVar$, a z podsystemu B z $795MW$ na $471MW$ i z $-29MVar$ na $24MVar$.



Rys.10. Rysunek górny: przebiegi prądów w IA (czerwony) i IB (niebieski) dla układu z rysunku 9. Rysunek dolny: przebiegi prądów w $IL1$ (czerwony) i $IL2$ (niebieski).



Rys.11. Przebiegi napięcia U_A (czerwony) i U_U .

6. WNIOSKI

Prezentowane urządzenie pozwala wpływać na statyczne parametry rozplywu mocy w SEE. Pokazane przebiegi pozwalają stwierdzić że urządzenie cechuje się bardzo wysoką dynamiką i powoduje bardzo krótkie stany nieustalone: może być więc użyte na przykład do tłumienia oscylacji przepływu mocy występujących w stanach pozaburzeniowych SEE.

Wraz ze wzrostem ilości faz przekształtnika rośnie rząd i równocześnie maleją amplitudy generowanych harmonicznych. Redukcję szkodliwych oddziaływań można uzyskać starannie projektując układy filtracji (filtry harmonicznych i komutacyjne), poprzez zwiększenie rozmiaru przekształtnika (np. $24 \times 24, 48 \times 48$) oraz przez pewne modyfikacje obszaru przewodzenia. W chwili obecnej uznano że optymalnym ze względu na parametry i koszty rozwiązaniem jest układ 12 fazowy. Rzeczywisty układ przekształtnika został już zbudowany i przetestowany, a aktualnie trwają próby jego zastosowania do pracy w charakterze przesuwnika fazowego.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi "Understanding Facts: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems" Published December 24th 1999 by IEEE Computer Society Press edition language English ISBN0780334558 (ISBN13: 9780780334557).
2. Mahdiyeh ESLAMI, Hussain SHAREEF, Azah MOHAMED, Mohammad KHAJEHZADEH „A Survey on Flexible AC Transmission Systems (FACTS)” *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 1a/.
3. Namin, M.H. "Using UPFC in order to Power flow control " *Industrial Technology*, 2006. ICIT IEEE International Conference on 15-17 Dec. 2006 Digital Object Identifier 10.1109/ICIT.2006.372401.
4. Verboomen, J.; Van Hertem, D.; Schavemaker, P.H.; Kling, W.L.; Belmans, R. "Phase shifting transformers: principles and application" *Future Power Systems*, 2005 International Conference on Digital Object Identifier 10.1109/FPS.2005.204302 Publication Year: 2005, Page(s) 6 pp. -6.
5. Verboomen, J.; Van Hertem, D.; Schavemaker, P.H.; Kling, W.L.; Belmans, R. "Border-Flow Control by means of Phase Shifting Transformers" *Power Tech. 2007 IEEE Lausanne*, Page(s) 1338-1343 Digital Object Identifier: 10.1109/PCT.2007.4538510.
6. Wheeler, P.W.; Rodriguez, J.; Clare, J.C.; Empringham, L.; Weinstein, A. „Matrix converters: a technology review" *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Volume: 49, Issue: 2 Digital Object Identifier: 10.1109/41.993260 Publication Year: 2002, Page(s): 276 – 288.
7. T.J. Sobczyk, "Control strategy of matrix converters," in *Proc. of European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE)*, 1993, Vol.4, pp. 93-97.
8. Sobczyk T.J.: *The matrix converter – a universal power electronic unit*, Prace Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 2002, Zeszyt 211, str. 6-21.
9. Balci, M.E.; Hocaoglu, M.H. „Comparison of power definitions for reactive power compensation in nonsinusoidal conditions" *11th International Conference on Harmonics and Quality of Power 2004*, Publication Year: 2004, Page(s) 519-524.
10. Szczepanik J., Sieńko T.: "New control scheme and new application area for a multiphase matrix converter" (strona 85-89) *Third IASTED Asian Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS* April 2-4, 2007, Phuket, Thailand ISBN CD: 978-0-88986-657-7.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Sobczyk T. J, Sieńko T.: „Application of Matrix Converter as a Voltage Phase Controller in Power System" *S13-17 IEEE SPEEDAM* 23-26.05.2006 Taormina, Italy ISBN: 1-4244-0194-1 IEEE Catalog Number: 06EX1320C.
17. Jerzy Szczepanik „Area based" Control Algorithm for Matrix Converter ." *Proceedings of the Sixth IASTED International Conference on European Power and Energy Systems*, June 26–28, 2006 Rhodes, Greece pp.413-418.

NEW MULTIPHASE MATRIX CONVERER BASED DEVICE FOR POWER FLOW CONTROL – CONFERENCE PAPER

Key-words: FACTS, Matrix Converter, Power Flow Control

The article presents the concept of new matrix converter (MC) based device working as a phase shifting control device in power system. The multiphase MC is working under innovative control algorithm specially dedicated for the proposed application. The work presents the results of the simulation of the MC work in this application as well as the analysis of the MC properties.