

Ryszard STRZELECKI<sup>1</sup>  
Natalia STRZELECKA<sup>1</sup>  
Henryk DĘBICKI<sup>2</sup>

## PRZEKSZTAŁTNIKI MATRYCOWE W SYSTEMACH ELEKTROENERGETYCZNYCH – CZĘŚĆ 1: PODSTA- WY DZIAŁANIA I NOWE TOPOLOGIE

*Referat składający się z dwóch części dotyczy ogólnie możliwości zastosowania przekształtników matrycowych w systemach elektroenergetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem układów FACTS oraz układów generatorów wirujących. W części pierwszej referatu przedstawiono zasadę działania, właściwości i wybrane topologie takich przekształtników, ze szczególnym uwzględnieniem nowych rozwiązań, w tym tzw. układów pośrednich i wielokomórkowych.*

### 1 WSTĘP

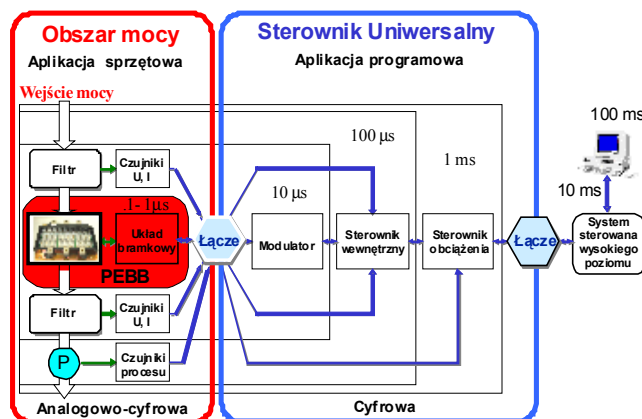
Masowe wykorzystanie energoelektroniki wywołało wiązać się z tendencją do budowy uniwersalnych modułów zawierających pojedyncze łączniki lub ich złożone połączenia oraz układy wyzwalania, a nawet sterowania. Pojawiła się koncepcja i pojęcie modułu PEBB (Power Electronics Building Block), tj. „energoelektronicznych klocków LEGO” (rys.1). Cały układ energoelektroniczny jest w tym przypadku budowany z odpowiednio połączonych typowych modułów PEBB, a realizowane funkcje zależą głównie od sterowania. Z tym związane jest również ponowne zainteresowanie układami przekształtników matrycowych MC (Matrix Converter), po około 20 latach przerwy.

Początki przekształtników matrycowych można datować na przełom lat 30 XX wieku, kiedy to w roku 1922 Mayer opatentował układ, a Alexenderson w roku 1934 aplikację cyklokonwertora do sterowania silnika indukcyjnego. Z oczywistych względów były to układy lampowe. Te układy są protoplastami rozwiązań współczesnych, wcześniej nazywanych (w latach 80-tych XX w.) bezpośrednimi przemiennikami częstotliwości [1,2]. Obecnie dla bezpośrednich przemienników częstotliwości o komutacji naturalnej (sieciowej) dalej stosuje się nazwę cyklokonwertor. Terminem przekształtnik matrycowy (MC) określa się tylko bezpośrednie przemienniki częstotliwości o komutacji wymuszonej, realizowane z zastosowaniem w pełni sterowal-

<sup>1</sup> Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, 81-226 Gdynia, ul Morska 81-87, tel. (+58)6901204, e-mail: rstrzele@am.gdynia.pl

<sup>2</sup> TP S.A., Zakład w Zielonej Górze, 65-001 Zielona Góra, Plac Pocztowy 1, e-mail: Henryk.Dembicki@telekomunikacja.pl

nych (wyłączalnych) łączników energoelektronicznych. Działanie i zasady sterowania tymi układami są omawiane w licznych publikacjach i rozprawach naukowych, np.[3,4]. Przeważająca większość tych prac koncentruje się jednak na tradycyjnych topologiach i zastosowaniach MC w układach napędowych. Tylko sporadyczne dotyczą innych rozwiązań i aplikacji.



Rys.1. Miejsce modułu PEBB w układzie energoelektronicznym

Celem niniejszego referatu jest krótki przedstawienie podstaw i najważniejszych właściwości oraz przegląd wybranych rozwiązań i możliwości układów MC.

## 2 PODSTAWY TEORETYCZNE PRZEKSZTAŁTNIKÓW MATRYCOWYCH

Układ MC zbudowany jest z w pełni sterowalnych łączników dwukierunkowych, łączących fazy wejściowe i wyjściowe (rys.2-3) [5,6]. Kondensatory wejściowe eliminują wpływ indukcyjności źródła. Stan łączników opisuje macierz  $\|M\|$  o wymiarach  $(N \times m)$ :

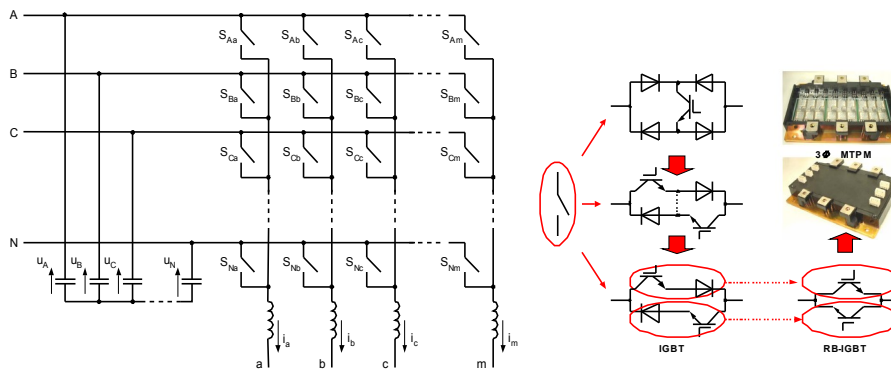
$$\|M\| = \begin{pmatrix} S_{Aa} & S_{Ab} & S_{Ac} & \dots & S_{Am} \\ S_{Ba} & S_{Bb} & S_{Bc} & & S_{Bm} \\ S_{Ca} & S_{Cb} & S_{Cc} & & S_{Cm} \\ \vdots & & & & \\ S_{Na} & S_{Nb} & S_{Nc} & & S_{Nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

gdzie:  $N, m$  – liczba faz wejściowych i wyjściowych, przy czym każdy element  $S_{ij}$  związany z fazą wejściową „i” i fazą wyjściową „j” przyjmuje wartość:  $S_{ij}=1$  – łącznik otwarty;  $S_{ij}=0$  – łącznik zamknięty.

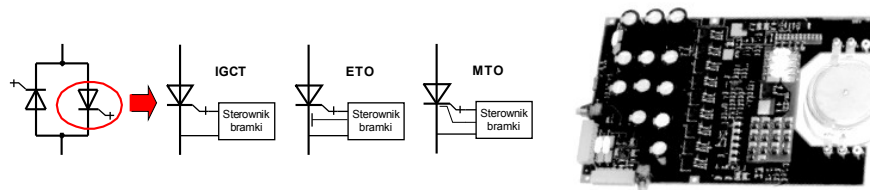
Ponieważ do wejść MC dołączone są źródła napięcia (kondensatory), a do wyjść źródła prądu (dławiki), stany łączników  $S_{ij}$  muszą spełniać następujące równania:

$$b) \sum_{i=A}^N S_{ia} = \sum_{i=A}^N S_{ib} = \sum_{i=A}^N S_{ic} = \dots = \sum_{i=A}^N S_{im} = 1, \quad a) \sum_{i=A}^N \sum_{j=a}^m S_{ji} = m \quad (2)$$

Równanie (2a) oznacza, że w każdej fazie wyjściowej może być dołączony tylko jeden łącznik - w przeciwnym przypadku nastąpi zwarcie faz wejściowych. Spełnienie równania (2b) zapewnia natomiast drogę dla przepływu prądu wyjściowego – liczba załączonych łączników zawsze musi być równa liczbie faz wyjściowych. W wyniku modulacji czasu trwania sygnałów sterujących możliwa jest zmiana napięcia, częstotliwości oraz liczby faz. Do wynikających stąd istotnych cech układu MC należą: swobodny dwukierunkowy przepływ energii elektrycznej; brak obwodu pośredniczącego napięcia (prądu) stałego; regulowany współczynnik mocy po stronie wejścia; sinusoidalny prąd wejściowy i napięcie wyjściowe. Brak obwodu pośredniczącego pozwala wyeliminować kondensator w elektrolityczny o dużej pojemności (lub dławik), a przez to uzyskać bardziej zwartą konstrukcję i podwyższenie trwałości układu w szerszym zakresie temperatur.



Rys.2. Schemat ogólny przekształtnika matrycowego oraz realizacje dwukierunkowych łączników tranzystorowych (IGBT - konwencjonalny, RB-IGBT - Reverse Blocking IGBT, 3Φ MTPM – 3-fazowy Matrix Transistor Power Module)



Rys.3. Realizacja łączników dwukierunkowych z wykorzystaniem nowoczesnych tyrystorów wyłączalnych (IGCT - Integrated Gate-Commutated Thyristor; ETO – Emitter Turn-Off Thyristor; MTO – MOS Turn-Off Thyristor) oraz przykład konstrukcji modułu

Sterowanie przekształtnikiem matrycowym i jego ogólne właściwości można w prosty sposób ocenić, uwzględniając, że czasy załączenia łączników  $S_{ij}$  zależą od wartości chwilowych ciągłych funkcji modulującej  $m_{ji}(t)$ , spełniających warunki podobne do

równań (2). W tym przypadku otrzymujemy model ciągły, przedstawiony dla podstawowego 3-fazowego układu MC na rysunku 4b. W tym modelu każdy element macierzy  $\|M\|$  ( $3 \times 3$ ) jest funkcją ciągłą.

Jednym z wielu algorytmów sterowania układem MC [3], zasilanym napięciem 3-fazowym o częstotliwości  $\omega_0$  jest zastosowanie sinusoidalnych funkcji modulujących sumacyjnych  $m_{ji}^+$  i różnicowych  $m_{ji}^-$ . Ogólną postać tych funkcji, oraz sposób i rezultat sterowania na tej podstawie układem MC opisują następujące równania:

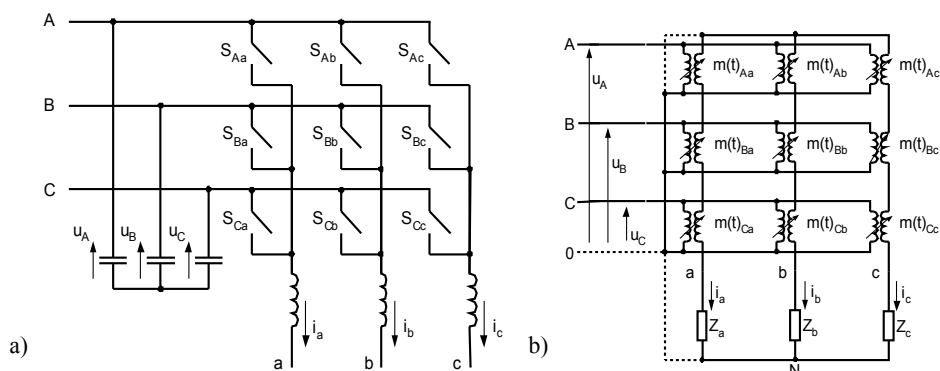
$$\begin{aligned} m_{ji}^+(t) &= \cos(\omega_0 t + \omega_s t) - (j-1+i-1)2\pi/3 + \Theta_0 \\ m_{ji}^-(t) &= \cos(\omega_0 t - \omega_s t) - (j-1+i-1)2\pi/3 + \Theta_0 \\ m_{ji}(t) &= B_+ \cdot m_{ji}^+(t) + B_- \cdot m_{ji}^-(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$i=1 \equiv A, 2 \equiv B, 3 \equiv C, j=1 \equiv a, 2 \equiv b, 3 \equiv c$$

$$m_{aA} = m_{bB} = m_{cC}, m_{aB} = m_{bC} = m_{cA}, m_{aC} = m_{bA} = m_{cB}$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{aA} & m_{aB} & m_{aC} \\ m_{bA} & m_{bB} & m_{bC} \\ m_{cA} & m_{cB} & m_{cC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}$$

gdzie:  $B_+$  i  $B_-$  - współczynniki amplitudowe funkcji  $m_{ji}^+$  i  $m_{ji}^-$ , którymi reguluje się amplitudę napięcia wyjściowego oraz wejściowy współczynnik mocy w zakresie kąta  $\pm$  kąta fazowego obciążenia  $\varphi_0$ ;  $\Theta_0$  - zadawana faza napięcia wyjściowego o regulowanej częstotliwości  $\omega_s$ . Suma współczynników  $B_+ + B_-$  nie może przy tym przekroczyć 1, co wiąże się z ograniczeniami (2).



Rys.4. Podstawowy przekształtnik matrycowy 3-fazowy: a) schemat połączeń łączników; b) model ciągły

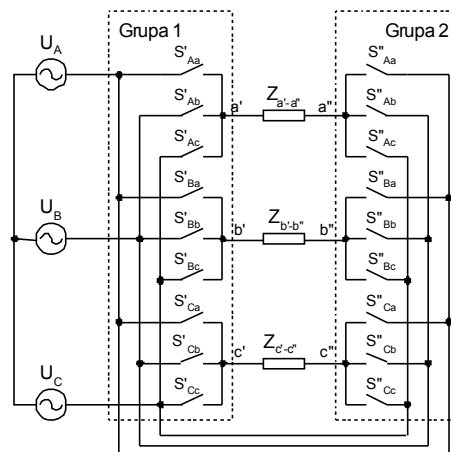
Przedstawiony model ciągły, aczkolwiek nieoptymalny, w prosty sposób wyjaśnia zasadę bezpośredniej przemiany częstotliwości i możliwości regulacji częstotliwości, amplitudy i fazy napięcia wyjściowego oraz wejściowego współczynnika mocy.

Wszystkie dalsze rozważania uwzględniające sterowanie układem MC są prowadzone na jego podstawie

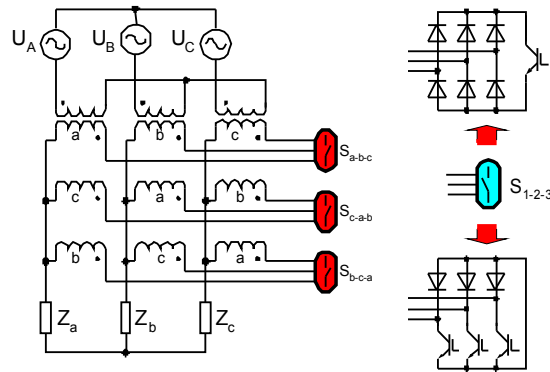
Układ MC jak na rysunku 4a nie wyczerpuje wszystkich rozwiązań 3-fazowych przekształtników matrycowych. W ostatnich latach pojawiło się wiele nowych oryginalnych układów, których ogólnym wyróżnikiem jest brak obwodu pośredniczącego prądu/napięcia stałego.

### 3 INNE ROZWIĄZANIA UKŁADÓW MC 3-FAZOWYCH

Układem MC podobnym w działaniu do rozpatrzonego wyżej jest przekształtnik pokazany na rysunku 5. Jego zaletą jest wyższe napięcie wyjściowe, wadą natomiast 2-razy większa liczba łączników dwukierunkowych oraz izolowane obciążenia każdej fazy wyjściowej. W przypadku, jeśli fazy obciążenia mają chociażby jeden wspólny zacisk, musi być stosowany transformator. Transformator można także wykorzystać do zmniejszenia liczby łączników (rys.6).

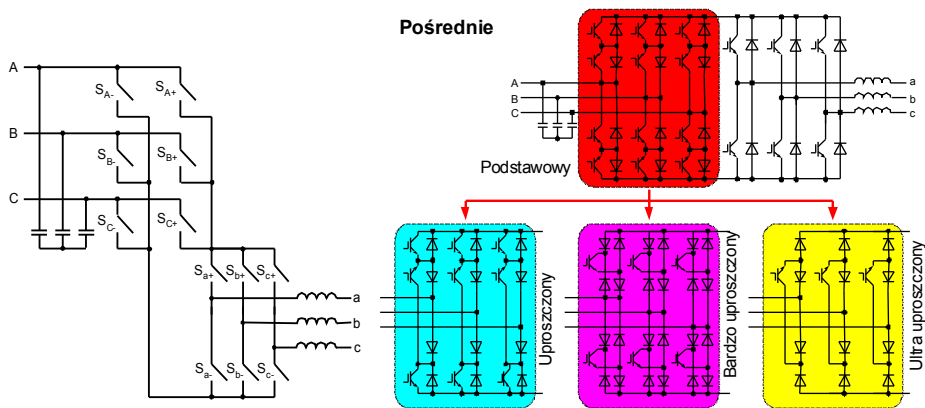


Rys.5. Przekształtnik matrycowy o jednostkowym współczynniku modulacji amplitudy



Rys.6. Transformatorowy przekształtnik matrycowy i przykładowe rozwiązania 3-fazowych łączników dwukierunkowych

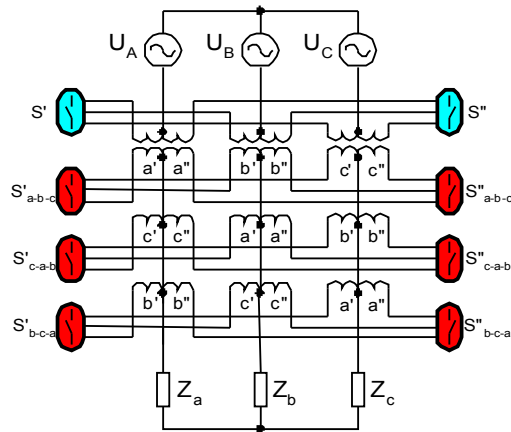
Do przekształtników matrycowych zaliczane są również układy z obwodami pośrednimi, lecz bez elementów biernych [7,8]. Ich ogólna topologia oraz przykładowe rozwiązania zostały przedstawione na rysunku 7. Zaletą rozwiązań jest przede wszystkim mniejszy spadek napięcia w stanach przewodzenia, a tym samym większa sprawność oraz łatwiejsze dołączenie obwodów kształtujących trajektorie przełączania łączników (odciążających). Wadą jest natomiast bardziej złożone sterowanie – nie można dopuszczać do pojawienia się chwilowego napięcia ujemnego na zaciskach wejściowych części falownikowej. Ponadto pośredni MC z ultra-uproszczonym obwodem wejściowym umożliwia tylko jednokierunkowy przepływ energii.



Rys.7. Ogólna topologia oraz wybrane rozwiązania pośrednich przekształtników matrycowych

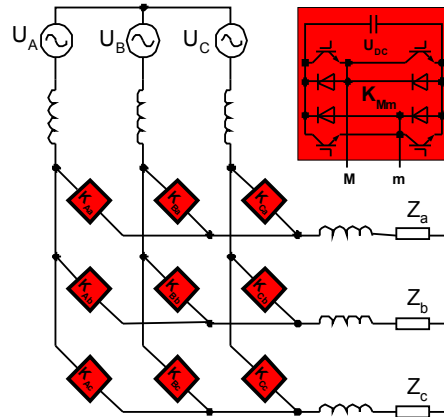
Pośrednie przekształtniki matrycowe mogą być również realizowane z transformatorem wysokiej częstotliwości. W jednym z takich możliwych rozwiązań (rys.8) [9],

za pomocą łączników  $S'$  i  $S''$  przełączanych z częstotliwością  $\omega_K$ , napięcie sieciowe jest przetwarzane na napięcie o częstotliwości  $\omega_S \pm \omega_K$ . Łączniki po stronie wtórnej transformatora pełnią funkcję demodulatora. Zaletą rozwiązania jest mały transformator oraz separacja galwaniczna źródła i odbiornika (często warunek konieczny BHP), natomiast główną wadą konieczność zachowania dużego stosunku częstotliwości łączy  $\omega_K$  do wyjściowej  $\omega_0$ . Zmniejszenie tego stosunku do wartości ok.20 przejawia się zwiększonymi zniekształceniami napięcia wyjściowego.



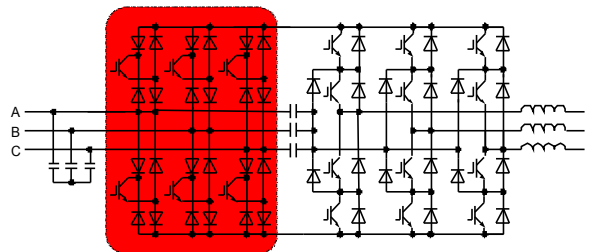
Rys.8. Przekształtnik matrycowy z transformatorem wysokiej częstotliwości

Oryginalnym i interesującym rozwiązaniem jest modułowy przekształtnik matrycowy przedstawiony na rysunku 9 [10]. Należy zauważyć, że nazwa „matrycowy” nadana przez autora tej publikacji kłóci się z dotychczasową definicją układów MC jako obwodów bez magazynów energii. W tym przypadku podstawowym łącznikiem dwukierunkowym jest 1-fazowy falownik napięcia. Z drugiej strony topologia jest typowa dla układów MC. Zaletą pokazanego rozwiązania jest możliwość zwiększania i zmniejszania napięcia wyjściowego, łatwość eliminacji stresów „napięciowych”, typowa modułowa budowa z zastosowaniem zweryfikowanych doświadczeniem układów falownikowych, bardzo dobra jakość napięcia wyjściowego, brak filtrów wejściowych, łatwość rozbudowy w kierunku realizacji przekształtnika wielopoziomowego.



Rys. 9. Modułowy przekształtnik matrycowy

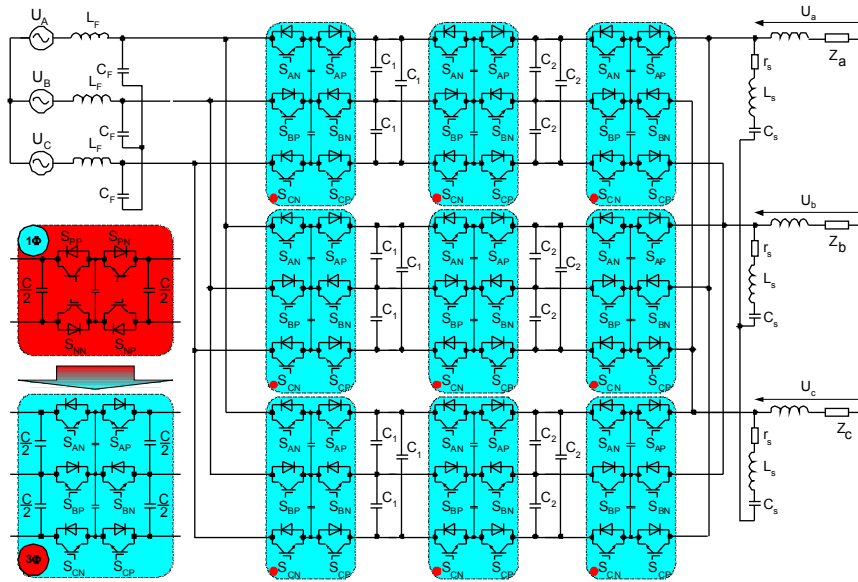
W kierunku budowy przekształtników wielopoziomowych zmiierają również inne najnowsze propozycje układów MC, w tym przedstawione na rysunku 10 i rysunku 11. Układ pokazany na rysunku 10 jest modyfikacją pośredniego przekształtnika matrycowego z uproszczonym obwodem wejściowym (rys.7) i wydzielonym punktem neutralnym 3-poziomowego układu wyjściowego. Układ jak na rysunku 11 jest natomiast propozycją autorską. Działanie układu wynika z zasady pracy komórkowych sterowników napięcia przemiennego, rozbudowy komórki 1-fazowej ( $1\Phi$ ) do 3-fazowej ( $3\Phi$ ) oraz modelu przedstawionego na rysunku 4b.



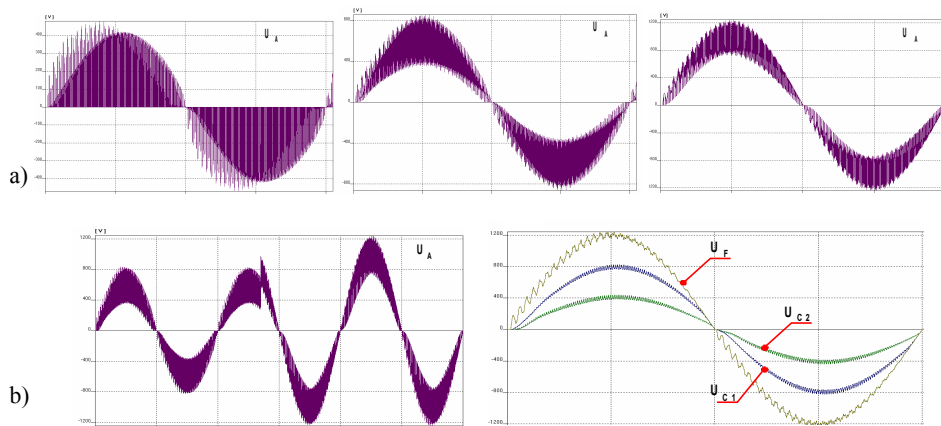
Rys. 10. Pośredni przekształtnik matrycowy 3-poziomowy

W przedstawionym układzie 3-komórkowym (rys.11) stosunek napięcia zasilania do napięcia na kolejnych kondensatorach międzykomórkowych jest równy  $1:2/3:1/3$ . Ten stosunek utrzymuje obwód rezonansowy  $r_s-L_s-C_s$ , dostrojony do częstotliwości łącznej. Maksymalna wartość napięcia na łącznikach w każdej komórce jest takie sama -  $1/3$  amplitudy napięcia wejściowego. Powyższe ilustrują przebiegi napięć wyjściowych i napięć na kondensatorach przestawione na rysunku 12, dotyczące różnych głębokości regulacji napięcia wyjściowego.





Rys.11. Schematy komórek 1- i 3-fazowych (1 $\phi$  i 3 $\phi$ ) oraz 3-komórkowego przekształtnika Matrycowego



Rys.13. Przebiegi napięć wyjściowych przekształtnika komórkowego w przypadkach: a) różnych głębokości regulacji, b) skokowej zmiany głębokości regulacji + napięcie na kondensatorach

#### 4 PODSUMOWANIE

O perspektywie i celowości podjęcia praktycznych, szerokich badań aplikacyjnych przekształtnika matrycowego mogą zdecydować jego następujące zalety: niezależna regulacja fazy, amplitudy i częstotliwości względem napięcia wejściowego, sinusoidalny prąd wejściowy i regulowany współczynnik mocy oraz dwukierunkowy przepływ

energii. Planując zastosowanie układu MC nie należy jednak zapominać o ograniczeniach wynikających z maksymalnej wartości funkcji modulującej właściwej dla wybranej topologii oraz o negatywnym wpływie niesymetrii i odkształceń napięć zasilających, a także niesymetrii i nieliniowości odbiornika [9]. Wiąże się to z tym, że typowy przekształtnik matrycowy, z założenia, nie ma możliwości magazynowania energii. W przypadku niesymetrii prowadzi to pojawienia się dodatkowych bocznych częstotliwości (z wyjątkiem niesymetrii zasilania, gdy stosowana jest tylko sumacyjna albo tylko różnicowa funkcja modulująca). W takich sytuacjach wskazane jest uzupełnienie przekształtnika matrycowego odpowiednim zasobnikiem energii.

Na korzyść układu MC przemawia i to, że w odróżnieniu od rozwiązań funkcjonalnie podobnych i powszechnie stosowanych, nie wymaga on: śledzenia kierunku przepływu energii elektrycznej, dwóch algorytmów sterowania – dla części prostownikowej i falownikowej, sprzężenia algorytmów sterowania z napięciem/prądem obwodu pośredniczącego. Układ MC może spełnić funkcję uniwersalnego modułu, co ma istotne znaczenie dla ich wytwarzania. Potwierdzeniem są również proponowane obszary aplikacji [1,10,11,12,13,14]. Jeśli zaistnieje potrzeba układ MC można np. zastosować jako falownik 3-poziomowy lub analogiczny prostownik.

## 5 LITERATURA

1. Gyugyi L., Pelly B.R.: *Static Power Frequency Changers, Theory, Performance and Application*, John Wiley and Sons, New York, 1976.
2. Cítko T., Tunia H.: *Przezienniki częstotliwości. Metody analizy*, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Rozprawy Naukowe nr 21, Białystok, 1993.
3. Rząsa J., *Wybrane sposoby kształtowania przebiegów czasowych prądów wejściowych i napięć wejściowych przekształtników matrycowych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2001.
4. Bajdecki T.: *Strategia sterowania przekształtnikiem matrycowym zasilającym silnik indukcyjny*, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska (2003)
5. Takei M., Harada Y., Ueno K., *600V-IGBT with Reverse Blocking Capability*, Proc. of the ISPSD'2001 Conf., pp. 413-418, 2001.
6. Motto E.R. at al.: *Application Characteristics of an Experimental RB-IGBT (Reverse Blocking IGBT) Module*, Rec. of the IAS2004 Annual Meeting, IEEE 0-7803-8487-3/04, 2004.
7. Iimori K. at al.: *New Current-Controlled PWM Rectifier-Voltage Source Inverter without DC Link Components*, Proc. of the PCC1997 Conf., Vol.2, Nagaoka, pp. 783-786, 1997.
8. Wei L, Lipo T.A.: *A Novel Matrix Converter Topology with Simple Commutation*. Rec. of the IAS2001 Annual Meeting, Vol. 3, Chicago, pp. 1749-1754, 2001.
9. Noculak A.: *Analiza i badanie przekształtników matrycowych w układach energoelektronicznych*, Rozprawa doktorska, Uniwersytet w Zielonej Górze, 2006.

10. Al-Naseem O.A.: *Modeling and Space Vector Control of a Novel Multilevel Matrix Converter for Variable-Speed Wind Power Generators*, Ph.D. Thesis, University of Colorado , 2001.
11. Jabłoński W., Strzelecki R.: *Sterowanie zależne układów rezerwy zasilania z przemiennikiem częstotliwości*, Materiały Konferencji „Niezawodność i statystyczna kontrola jakości”, Bydgoszcz, str. 76-83, 1985.
12. Jabłoński W., Strzelecki R.: *Methods of Static Power Frequency Converters Synthesis*, Proc. of the Conf. EUROCON'86, Paris, pp. 448-453, 1986.
13. Strzelecki R., Zhuikov V.Y., *Principle of Tracking of the Static Power Frequency Changers using Moments*, Proc. of the Conf. INTELEC'85, Munich , pp. 229-234, 1985.
14. Strzelecki R.: *Sterowanie wektorowe energoelektronicznym kompensatorem nadążnym zniekształceń sieci trójfazowej*. Materiały Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Jakość energii elektrycznej”, T.2, Spała, str. 105-110, 1991.

## **MATRIX CONVERTERS APPLICATIONS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS – PART 1: BASIC OPERATION AND NEW TOPOLOGY**

Paper presents properties and possibilities of the matrix converters application in electric power systems. In part 1 some aspects concerning work were talked over and most important topologies of the converters, as well indirect and multi-cell matrix converters.

# PRZEKSZTAŁTNIKI MATRYCOWE W SYSTEMACH ELEKTROENERGETYCZNYCH – CZĘŚĆ 2: PERSPEKTYWY I PROBLEMY ZASTOSOWANIA

*Referat składający się z dwóch części dotyczy ogólnie możliwości zastosowania przekształtników matrycowych w systemach elektroenergetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem układów FACTS oraz układów generatorów wirujących. W części drugiej referatu pokazano i przeprowadzono wstępną ocenę wybranych elektroenergetycznych aplikacji przekształtników matrycowych, odniesioną do innych stosowanych układów energoelektronicznych.*

## 1 WSTĘP

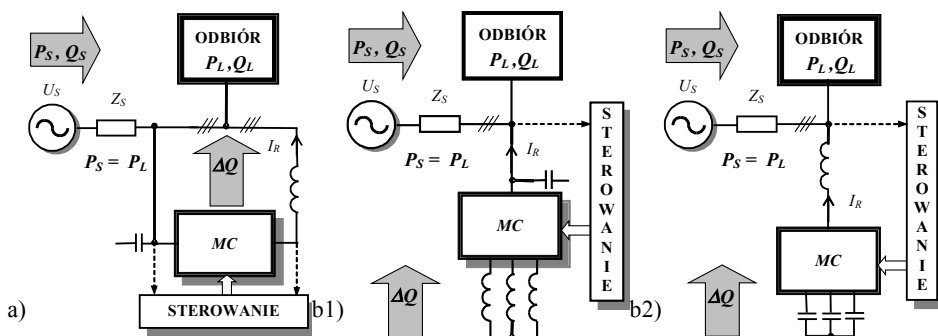
Decentralizacja systemu elektroenergetycznego, wynikająca z podejścia rynkowego, powoduje szybki wzrost zainteresowania układami sterującymi przepływem i parametrami mocy w liniach zasilających. Przełom w ich budowie, zapoczątkowujący rozwój układów FACTS (Flexible AC Transmission System) o dobrych właściwościach regulacyjnych, zapoczątkowało pojawienie się w latach 60-tych XX wieku pierwszych tyrystorów mocy. Kolejny przełom spowodowało pojawienie się nieco później w pełni sterowalnych przyrządów energoelektronicznych (tyrystorów GTO i tranzystorów IGBT). Budowane na ich podstawie urządzenia, umożliwiające sterowanie parametrami energii elektrycznej z nieosiągalną wcześniej jakością i dynamiką, zwiększyły również obszar i ilość aplikacji układów energoelektronicznych w elektroenergetyce [1-7]. Masowe wykorzystanie energoelektroniki wywołało z kolei tendencję do budowy uniwersalnych modułów, których funkcje zależą głównie od układów sterowania. Z tym również związane jest ponowne zainteresowanie układami przekształtników matrycowych MC (Matrix Converter) [8]. Przeważająca większość prac w tej tematyce koncentruje się jednak na zastosowaniach w układach napędowych. Tylko sporadycznie pojawiają się publikacje dotyczące aplikacji układów MC w systemach elektroenergetycznych.

Celem niniejszej, drugiej części referatu jest przegląd wybranych rozwiązań i możliwych aplikacji układów MC w systemach elektroenergetycznych.

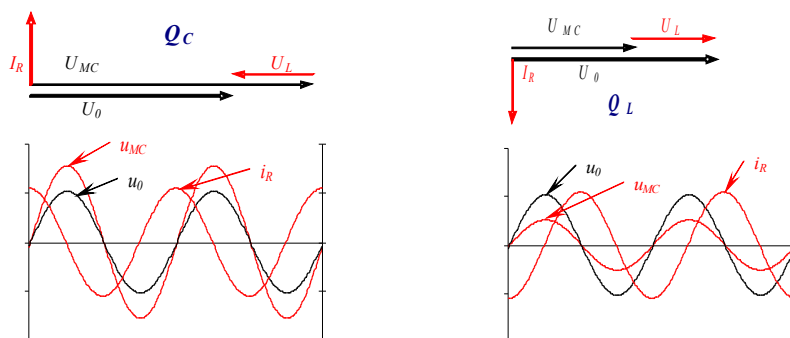
## 2 MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA PRZEKSZTAŁTNIKÓW MATRYCOWYCH W ELEKTROENERGETYCE

### 2.1 Kompensacja mocy biernej (przesunięcia)

Na rysunku 1 pokazano podstawowe sposoby dołączenia układu MC pracującego jako kompensator. W układzie połączeń wg rysunku 1a realizowana jest zasada generacji prądów biernych przedstawiona na rysunku 2. Można również wykorzystać możliwość regulacji wejściowego współczynnika mocy układu MC przez zmianę współczynników amplitudowych  $B_+$  i  $B_-$  - patrz wzór (3), pozycja literatury [8]. W celu generacji prądu pojemnościowego wyjście przekształtnika musi być dołączane przez transformator podwyższający. W układach połączeń jak na rysunku 1b istnieje również możliwość regulację prądu biernego przez zmianę częstotliwości wyjściowej  $\omega_0$ . Zmiany mocy biernej w funkcji parametrów sterowania przekształtnika matrycowego w tych układach zestawiono w tabelicy 1. Sterowania przedstawione w tej tabeli uznaje się za równorzędne. Układy umożliwiają płynną regulację mocy biernej z możliwością zmiany jej charakteru.



Rys. 1. Sposoby dołączenia przekształtnika matrycowego (MC) do sieci jako kompensatora mocy biernej: a) bez przemiany częstotliwości; b) z przemianą częstotliwości.



Rys. 2. Zasada generacji prądu pojemnościowego i indukcyjnego oraz przebiegi prądów i napięć w układzie z przedstawionym na rysunku 1a

Tab.1. Zmiany mocy biernej w funkcji parametrów sterowania

Układ	Rys.15b-1	Rys.15b-2
$f_{MC}=const$ $U_{MC}=const$ $B_+ \cdot B_- = var$		
$f_{MC}=const$ $U_{MC}=var$ $B_+ + B_- = var$ $B_+ / B_- = const$		
$f_{MC}=var$ $U_{MC}=const$ $B_+ / B_- = const$		

W zależności od wyjściowego elementu biernego L/C układ generuje moc bierną:

$$Q_i = (B_- - B_+) \cdot \frac{((B_+ + B_-) \cdot 0,5 \cdot U_{MC})^2}{1/(2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot L)} \quad \text{lub} \quad Q_i = (B_+ - B_-) \cdot \frac{((B_+ + B_-) \cdot 0,5 \cdot U_{MC})^2}{1/(2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot C)}$$

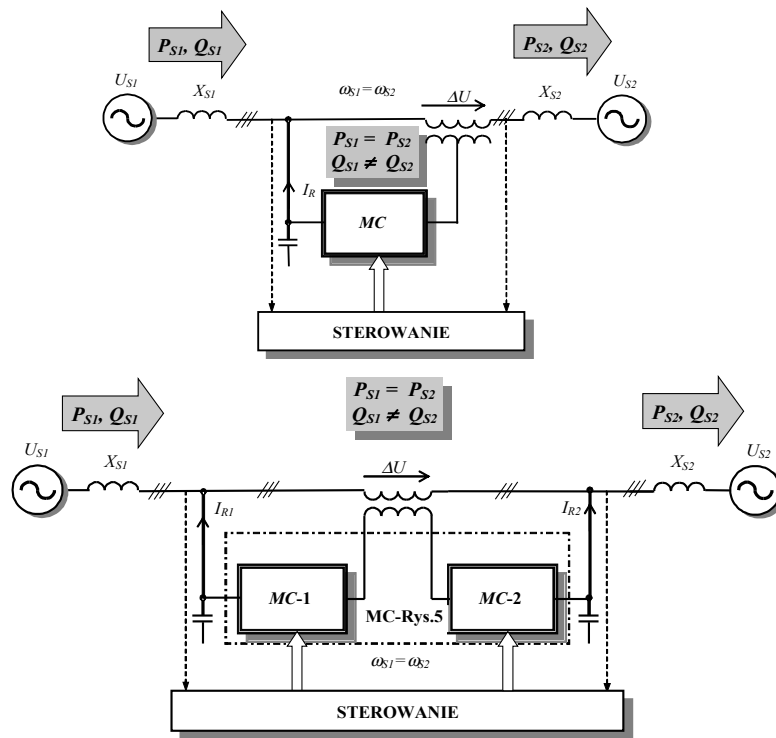
Ze względów praktycznych korzystniejsze jest sterowanie parametrami tylko sumacyjnej funkcji modulującej bądź różnicowej. W tym przypadku upraszcza się sterowanie i jest możliwość synchronizacji łączy. Taka synchronizacja powoduje, że w każdej chwili wszystkie fazy wejściowe są załączone (brak wahań potencjału „gwiazdowego”).

## 2.2 Sprzężanie systemów elektroenergetycznych

Sprzężanie systemów o jednakowych częstotliwościach można realizować za pomocą przekształtnika matrycowego pracującego w układzie UPFC (rys.3) [9]. W tym układzie istnieje również możliwość regulacji mocy biernej. Działanie układu ilustrują wskaźy oraz przebiegi prądów i napięć przedstawione na rysunku 4. W ten sposób układy MC mogą być też stosowane do stabilizacji napięcia w liniach promieniowych.

Oddzielnym zagadnieniem jest zastosowanie przekształtnika matrycowego do sprzężania systemów o różnych częstotliwościach. W tym zastosowaniu układ MC jest włączany szeregowo w linię łączącą systemy (rys.5). W przypadku różnicy napięć systemowych lub te napięcia są równe, jedna ze stron układu MC musi być dołączana przez

transformator. Dotyczy to w szczególności rozwiązania przedstawionego na rysunku 5a. Rozwiązanie wg. rysunku 5b pozwala sprzęgać systemy z pośrednim przetwarzaniem na niższe napięcie i inną częstotliwość, co rozszerza jego możliwości.



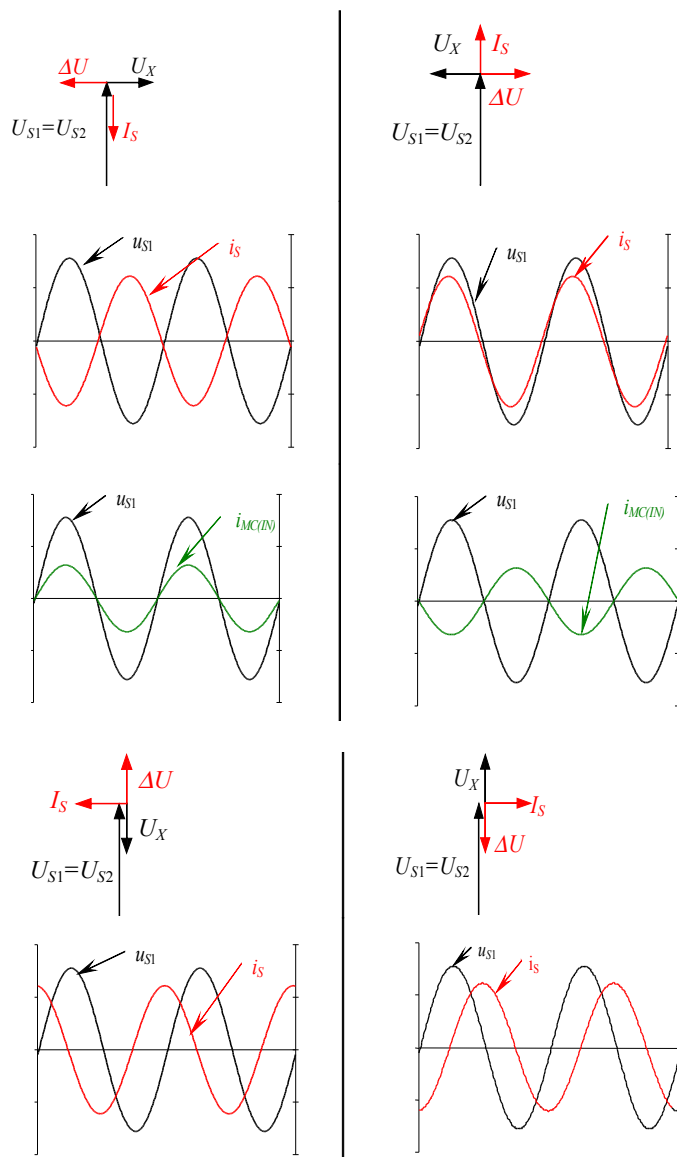
Rys.3. Połączenia przekształtnika matrycowego (MC) w układzie UPFC

### 2.3 Współpraca przekształtnika matrycowego z generatorami wirującymi.

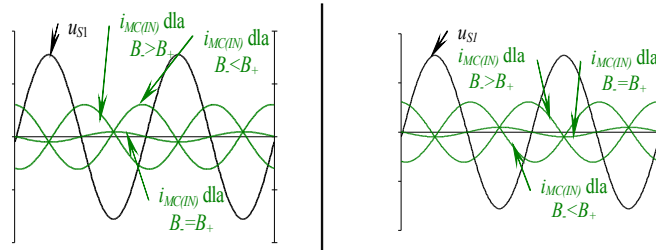
Takie aplikacje układów MC małym tylko stopniu różnią się od przedstawionych powyżej rozwiązań. Podobieństwo wynika z funkcji źródła, jaką pełni generator wirujący. Różnica polega tylko na bardziej rozbudowanym systemie sterowaniu maszynami wirującymi. Na rysunku 6 przedstawiono często spotykane układy generatorów z typowymi maszynami elektrycznymi. W tych rozwiązaniach (rys.6a,b,d) przekształtnik matrycowy pełni funkcje stabilizatora częstotliwości wyjściowej, układu dopasowującego napięcia oraz i kompensatora mocy biernej.

Działanie układu MC w przypadku generatora z maszyną synchroniczną PM, sterowanego w sposób podstawowy, ilustrują przebiegi napięć i prądów pokazane na rysunkach 7, 8 i 9. W przypadku pracy autonomicznej prądnicy indukcyjnej (rys.6c), bez stabilizacji częstotliwości, układ MC generuje tylko moc bierną o wartości wymaganej

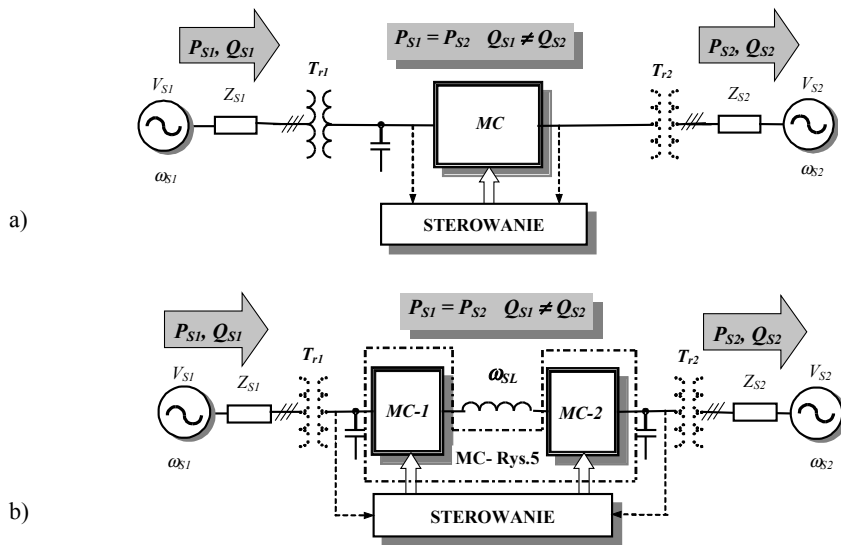
do utrzymania poziomu napięcia. Na rysunku 10 pokazano proces przejściowy po załączeniu układu MC oraz wpływ obciążenia na wartość napięcia wyjściowego. Sprężenie zwrotne, zmieniając moc bierną, stabilizuje to napięcie na wymaganym poziomie.



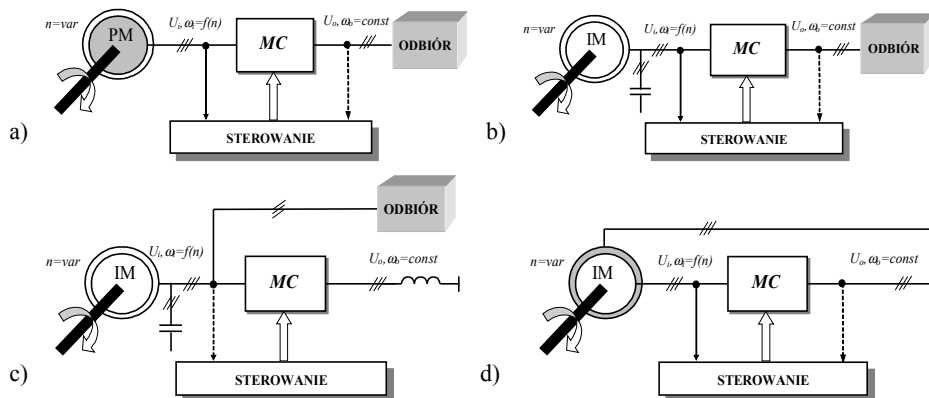




Rys.4. Charakterystyczne wykresy wskazowe oraz przebiegi prądów i napięć w UPFC (rys.3)

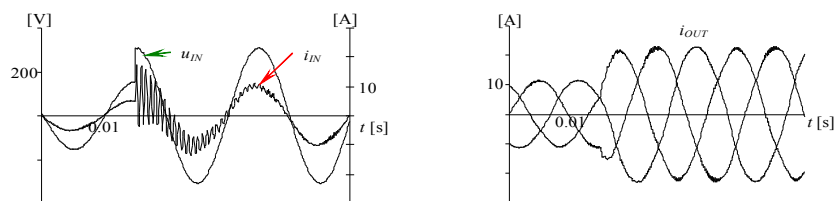


Rys.5. Zastosowanie MC do sprzęgania systemów elektroenergetycznych o różnych częstotliwościach; a) pojedynczy MC, b) podwójny MC

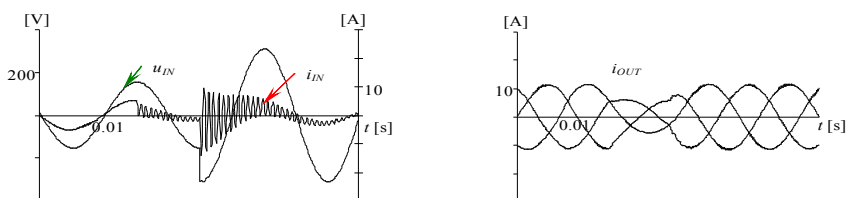


Rys.6. Przykłady aplikacji układów MC w generatorach o zmiennej prędkości obrotowej z: a) maszyną synchroniczną z magnesami stałymi – PM; b, c) maszyną indukcyjną klatkową;

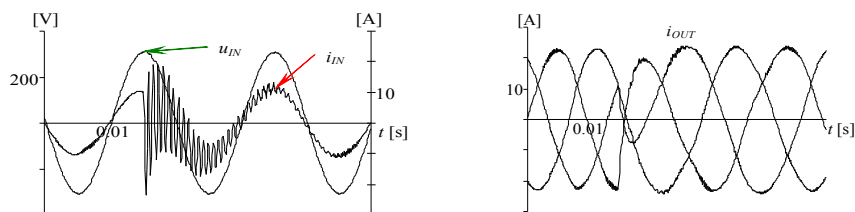
d) maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną



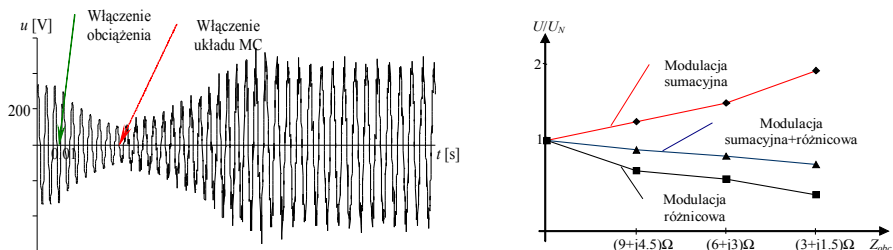
Rys.7. Przebiegi napięć  $u_{IN}$  i prądów  $i_{IN}$  wejściowych oraz prądów wyjściowych  $i_{OUT}$  w przypadku skoku napięcia generatora 155/310 V w układzie z maszyną PM (bez stabilizacji napięcia)



Rys.8. Przebiegi napięć  $u_{IN}$  i prądów  $i_{IN}$  wejściowych oraz prądów wyjściowych  $i_{OUT}$  w przypadku skoku napięcia generatora 155/310 V w układzie z maszyną PM (ze stabilizacją napięcia)



Rys.9. Przebiegi napięć  $u_{IN}$  i prądów  $i_{IN}$  wejściowych oraz prądów wyjściowych  $i_{OUT}$  w przypadku skoków częstotliwości generatora 50/60Hz w układzie z maszyną PM ze stabilizacją napięcia



Rys.10. Napięcia wyjściowe generatora samowzbudnego (rys.7c) oraz charakterystyki zmian tego napięcia w funkcji obciążenia dla charakterystycznych parametrów algorytmu modulacji

### 3 PODSUMOWANIE

Przekształtnik matrycowy ma szansę stać się uniwersalnym modulem PEBB - „klockiem LEGO”, stosowanym do budowy różnorodnych systemów elektroenergetycznych o funkcjach programowanych zmieniających algorytmem sterowania[10]. Na jego korzyść przemawia to, że w odróżnieniu od rozwiązań funkcjonalnie podobnych [5, 7], nie wymaga on: śledzenia kierunku przepływu mocy, sterowania częścią prostownikową i falownikową, sprzężenia algorytmów sterowania z napięciem/prądem obwodu pośredniczącego. Przedstawione wyniki potwierdzają zarazem uniwersalność zastosowania układu MC w systemach elektroenergetycznych, co ma istotne znaczenie aplikacyjne.

### 4 LITERATURA

15. Hingorani N. G., Gyugi L., *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press, New York, 2000.
16. Strzelecki R., *Aktywne układy kondycjonowania energii – nowa jakość czy moda*, V Międzynar. Konf. Naukowo-Techn. „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, Kozienice, str. 43-54, 2002.
17. Strzelecki R., Benysek G., *Nowe koncepcje elastycznego sterowania przepływem i kondycjonowania energii w rozproszonych systemach zasilających prądu przemiennego*, VI Międzynar. Konf. Naukowo-Techn. „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, Kozienice, str. 65-72, 2003.
18. Strzelecki R., Benysek G., *Układy STATCOM i ich rola w systemie elektroenergetycznym*, VII Międzynar. Konf. Nauk.-Techn. „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, Kozienice, str. 31-42, 2004.
19. Strzelecki R., Benysek G., Noculak A., *Wykorzystanie urządzeń energoelektronicznych w systemie elektroenergetycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, nr.2, cz.1, str. 41-49, 2003.
20. Fedyczak Z., Strzelecki R., *Energoelektroniczne układy sterowania mocą prądu przemiennego*, Wyd. Adam Marszałek, Seria Wydawnicza Komitetu Elektrotechniki PAN, „Postępy Napędu Elektrycznego”, Toruń, 1997.
21. Strzelecki R., Supronowicz H., *Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000.
22. Strzelecki R., Strzelecka N., Dębicki H.: *Przekształtniki matrycowe w systemach elektroenergetycznych – Część 1: Podstawy działania i nowe topologie*. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej „MITEL’2006”, Gorzów Wlkp. s.10, 2006 (patrz niniejszy tom)
23. Strzelecki R., et al., *UPFC with Matrix Converter*. Proc. of the EPE’2001 Conf., CD-ROM, Graz, pp.9, 2001.
24. Noculak A.: *Analiza i badanie przekształtników matrycowych w układach energoelektronicznych*, Rozprawa doktorska, Uniwersytet w Zielonej Górze, 2006.

## **MATRIX CONVERTERS APPLICATIONS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS – PART 2: PERSPECTIVE AND PROBLEMS**

Paper presents properties and possibilities of the matrix converters application in electric power systems. In part 2 advantage and limit possibilities for application this converters in transmission and distributed lines were considered. Possibilities of usage matrix converters arrangements with traditional compensators in distributed networks were considered.