

doi:10.15199/48.2015.03.42

## Badania właściwości szeregowego kompensatora napięcia przemiennego bazującego na przekształtniku matrycowym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono i porównano właściwości szeregowego kompensatora napięcia przemiennego bazującego na bezpośrednim przekształtniku matrycowym dla trzech metod sterowania „in-phase”, „pre-fault” oraz „energy-optimal”. Zostały wyznaczone podstawowe zależności matematyczne i charakterystyki statyczne opisujące zakres kompensacji. Ponadto pokazano wyniki badań symulacyjnych w celu potwierdzenia poprawności kompensacji.

**Abstract.** This paper presents the properties of serial AC voltage compensator based on direct matrix converter for three control methods: in-phase, pre-fault and energy-optimal. In Article has been defined basic mathematical relationships and static characteristics describing the range of voltage compensation. The simulation results are also presented in order to confirm the correctness of the compensation. (**Properties studies of series AC voltage compensator based on matrix converter**).

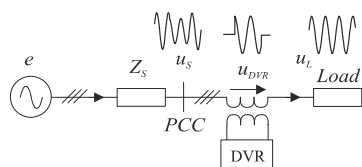
**Słowa kluczowe:** DVR, przekształtnik matrycowy, kompensacja zapadów napięcia.

**Keywords:** Dynamic Voltage Restorer (DVR), matrix converter, voltage sag compensation.

### Wstęp

Zaburzenia amplitudy napięcia przemiennego są najczęstszymi problemami z zachowaniem jakości energii (Power Quality) w przemysłowych sieciach dystrybucyjnych [1]. Dynamiczne zmiany napięcia spowodowane awariami, skokowymi zmianami obciążenia, zmianami konfiguracji sieci lub wyładowaniami atmosferycznymi generują niepożądane skutki u użytkowników końcowych, takie jak zapady napięcia, przepięcia, harmoniczne napięcia, niesymetrię oraz efekt flickera [1] - [3]. Dla wrażliwych odbiorów takich jak układy telekomunikacyjne, komputerowe oraz zawierające urządzenia energoelektroniczne konieczne jest zachowanie napięcia zasilania spełniającego warunki normy [4]. Brak spełnienia warunków normy [4] powoduje znaczne straty ekonomiczne szczególnie dla dziedzin przemysłu o bardzo dużym zaangażowaniu technologicznym jak przemysł motoryzacyjny, farmaceutyczny, chemiczny czy produkcji półprzewodników. Dla zapewnienia właściwych parametrów napięcia stosuje się różnego rodzaju układy kompensatorów takich jak układy dynamicznego odtwarzania napięcia DVR (z ang. Dynamic Voltage Restorer) [5], kompensatory statyczne (STATCOM) [6], magazyny energii z wielkimi masami wirującymi (z ang. flywheel) [7], układy UPS [8], zunifikowane układy do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC (ang. Unified Power Quality Conditioner) [9] oraz transformatory z odzeczami [10].

DVR jest układem szeregowym, chroniącym wrażliwe obciążenie od niepożądanych stanów napięcia zasilania  $u_s$  w punkcie wspólnego przyłączenia PCC (Point of Common Coupling) [11]. Podstawowym zadaniem układu jest dodawanie w szereg do obciążenia napięcia kompensującego o odpowiedniej amplitudzie, częstotliwości i fazie tak aby utrzymać żądany kształt krzywej napięcia obciążenia (Rys.1) [12].



Rys. 1. Zasada działania układu DVR

Jedno z ważniejszych zagadnień stosowania układów DVR dotyczy sposobu dostarczania wymaganej energii

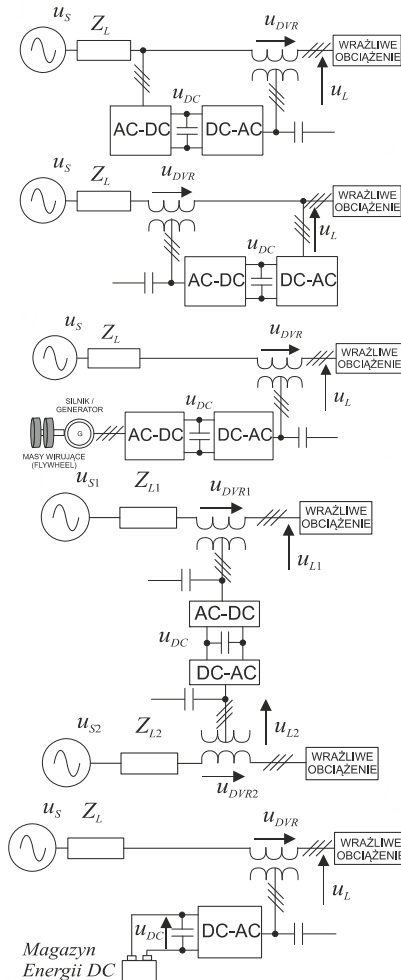
elektrycznej do układu kompensatora. Rozróżnia się dwie podstawowe struktury, w pierwszej energia jest pobierana z linii, która jest kompensowana w drugim z dodatkowego źródła energii [11]. Pierwsza struktura nie wymaga układów magazynowania energii elektrycznej. Najczęstszymi źródłami dodatkowej energii w układach DVR są baterie akumulatorów lub superkondensatorów [11] lub masy wirujące [13]. Ponadto w literaturze można spotkać topologię międzysystemowego (interline) układu DVR [14]. Układy magazynowania energii elektrycznej są elementami systemu DVR, które determinują jego gabaryty oraz masę jak również wpływają na jego znaczny koszt. Ponadto elementy te ulegają najczęściej uszkodzeniom podczas pracy, co z kolei wpływa na niezawodność całego systemu [15]. Dlatego też prowadzone są prace w celu ograniczenia wielkości zasobników energii, lub też ich całkowitego wyeliminowania.

Wiele topologii układowych zostało przedstawionych w literaturze naukowej, jednakże można wyróżnić wśród nich dwie podstawowe grupy. W pierwszej grupie stosowane są przekształtniki typu AC/DC/AC [11]. W tych topologiach wymagane napięcie DC jest uzyskiwane poprzez podłączenie prostownika poprzez transformator przyłączony bądź to od strony sieci zasilającej lub też obciążenia (Rys. 2a). Taka sama topologia będzie użyta w systemach DVR z masami wirującymi (Rys. 2b) lub typu interlinie (Rys. 2c). W drugiej grupie wymagana energia do kompensacji napięcia jest pobierana z magazynu energii DC (Rys. 2d), podłączonego do obwodu pośredniczącego falownika napięcia VSI (Voltage Source Inverter) [11]. W obu grupach wymagany jest duży kondensator obwodu pośredniczącego DC.

Jak wskazano powyżej realizacja układów DVR bez magazynów energii prądu stałego DC przyczynia się do obniżenia kosztów, zmniejszenia rozmiarów oraz zwiększenia niezawodności [16]. Należy jednak zauważyć, że przekształtniki energoelektroniczne AC/AC bez magazynów energii typu DC, są często postrzegane jako przyszłościowe rozwiązania dla specyficznych rozwiązań, ale pomimo intensywnych badań w ostatnich dziesięcioleciach ich obszar zastosowań przemysłowych jest niewielki. Jednym z głównych powodów może być aspekty techniczne takie jak mała liczba dedykowanych łączników energoelektronicznych czy rozbudowane strategie modulacji i komutacji łączników [17].

Najbardziej znanym przekształtnikiem energoelektronicznym AC/AC bez magazynu DC jest

przekształtnik matrycowy PM (z ang. matrix converter - MC) prezentowany w postaci bezpośredniej bądź też pośredniej DC [16]. Najbardziej perspektywicznymi obszarami jego zastosowań wydają się układy napędowe zarówno w konfiguracji silnikowej jak i generatorowej [18]. Realizacja PM w aplikacjach napędowych przynosiła pozytywne rezultaty, co skutkowało pojawieniem się pierwszych zastosowań komercyjnych [19].



Rys. 2. Klasyczne topologie układów DVR a) bez magazynów energii pobierających energię z kompensowanej sieci, b) z masami wirującymi, c) międzysystemowy DVR (interline), d) z magazynem energii prądu stałego

Jednakże w literaturze naukowej pojawiają się przykłady zastosowania PM w innych aplikacjach w tym, jako układ DVR [20]. Niniejszy artykuł przedstawia możliwości techniczne związane z wykorzystaniem przekształtnika matrycowego w układach DVR do kompensacji symetrycznych zapadów napięcia i przepięć. W pierwszej części artykułu przedstawione będą trzy znane metody kompensacji napięcia z użyciem układów DVR typu: „in-phase”, „pre-fault” oraz „energy-optimal” [12]. W drugiej części artykułu zostaną zaprezentowane zakresy kompensacji dla omawianych metod w układzie DVR z PM. Następnie przedstawiono przykładowe wyniki badań symulacyjnych. W ostatniej części zaprezentowano analizę porównawczą właściwości DVR przy różnych metodach kompensacji.

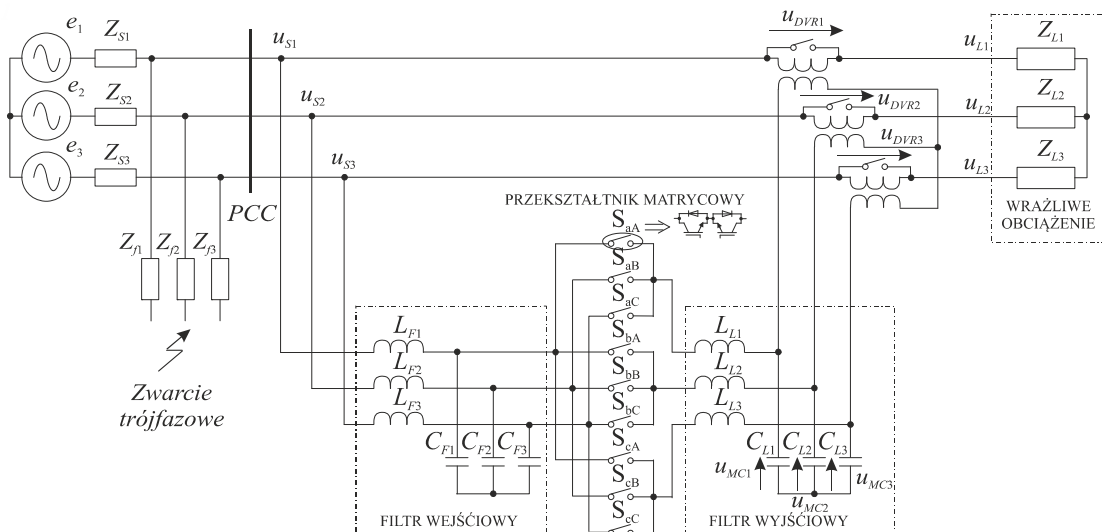
### Analizowany układ DVR

Rysunek 3 przedstawia schemat ideowy analizowanego układu DVR, zawierający: przekształtnik matrycowy, który jest bezpośrednio podłączony do sieci zasilającej, wejściowe oraz wyjściowe filtry biernie LC, szeregowo transformatory dodawcze oraz łączniki zwierające uzwojenia wtórne transformatorów dodawczych [20]. Układ taki pozwala na kompensację zniekształceń napięcia w nielimitowanym okresie czasu, gdyż energia potrzebna do kompensacji deformacji jest brana bezpośrednio z kompensowanej sieci.

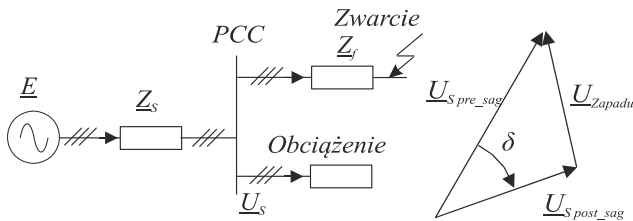
Do modulacji łączników w PM użyto modulacji wektora przestrzennego SVM (z ang. Space Vector Modulation) [21]. Przy zastosowaniu tej modulacji możliwe jest syntezowanie wypadkowego wektora napięć wyjściowych w PM oraz współczynnika przesunięcia fazowego prądu źródła. Szczegóły tej modulacji zaprezentowane są w licznej literaturze naukowej m.in. [21]. W szczególnym przypadku symetrycznych napięć zasilania i symetrycznego obciążenia w PM z zastosowaniem SVM możliwe jest uzyskanie maksymalnego wzmocnienia napięciowego  $q=0.866$ . To ograniczenie będzie miało wpływ na zakres kompensowanych zapadów/przepięć w układzie DVR z PM.

### Strategie sterowania układów DVR

Spadek napięcia w sieci jest spowodowany poprzez zwarcie obwodu w innej części sieci, które poprzez impedancje zastępcze sieci  $Z_S$  oraz zwarcia  $Z_f$  powoduje podział napięcia generatora  $\underline{E}$ , a w konsekwencji obniżenie napięcia  $\underline{U}_S$  w punkcie PCC (Rys. 4) [12]. Zmiana amplitudy i fazy napięcia  $\underline{U}_S$  w punkcie PCC po wystąpieniu zwarcia jest opisana zależnością (1).



Rys. 3. Schemat ideowy analizowanego układu DVR z PM



Rys. 4. Powstawanie zapadów napięcia w sieci: a) schemat zastępczy, b) wykres wektorowy

$$(1) \quad \underline{U}_{S\text{post\_sag}} = E \frac{Z_f}{Z_f + Z_s}$$

Strategie sterowania układu DVR można dobierać w zależności od typu chronionego obciążenia. Niektóre obciążenia są bardzo wrażliwe na skoki fazy napięcia (obciążenia z sterownikami tyrystorowymi), a niektóre są bardziej odporne. Głównym zadaniem jest przede wszystkim kompensacja amplitudy napięcia zasilania w punkcie PCC. Trzy podstawowe metody są prezentowane w literaturze naukowej do generacji napięć kompensacyjnych w układach DVR przy zapadach napięcia z przesunięciem fazowym [12] i nazywane są „in-phase”, „pre-fault” oraz „energy-optimal”. Wspólne dla wszystkich trzech metod jest to, że amplitudy napięć i prądów przed i po kompensacji są sobie równe:  $U_{L\text{post\_sag}} = U_{L\text{pre\_sag}} = \text{const}$ ,  $I_{L\text{post\_sag}} = I_{L\text{pre\_sag}} = \text{const}$ . Różnice polegają na tym ile energii jest przekształcane przez układ DVR, na wielkości amplitudy napięcia kompensującego oraz na tym czy jest kompensowane przesunięcie fazowe napięcia w punkcie PCC.

W celu zdefiniowania zasad kompensacji, napięcia i prądy w układzie zapisane są w postaci zespolonej (2). Wektor prądu obciążenia przed zapadem jest wektorem odniesienia. W prezentowanym opisie zasad kompensacji, parametry linii zasilającej zostały uwzględnione w sposób pośredni, jako zmiana amplitudy  $U_{S\text{post\_sag}}$  oraz zmiana przesunięcia fazowego  $\delta$  napięcia w punkcie PCC. Impedancje zastępcze sieci  $Z_s$  oraz zwarcia  $Z_f$  nie będą dalej uwzględniane w analizie.

$$(2) \quad \begin{aligned} \underline{U}_{L\text{pre\_sag}} &= U_{L\text{pre\_sag}} (\cos(\varphi_L) + j \sin(\varphi_L)) \\ \underline{U}_{S\text{post\_sag}} &= U_{S\text{post\_sag}} (\cos(\varphi_L + \delta) + j \sin(\varphi_L + \delta)) \\ \underline{U}_{DVR} &= U_{DVR} (\cos(\beta) + j \sin(\beta)) \\ \underline{I}_{L\text{pre\_sag}} &= I_{L\text{pre\_sag}} (\cos(0^\circ) + j \sin(0^\circ)) \end{aligned}$$

Podstawową metodą kompensacji napięcia w układach DVR jest metoda „in-phase”, w której kompensowana jest tylko amplituda napięcia. Wówczas napięcie  $u_{DVR}$  jest w fazie z napięciem  $u_{S\text{post\_sag}}$ . Uwzględniając te zależności wzory definiujące amplitudę napięcia  $U_{DVR}$  oraz jego kąt  $\beta$  zestawione są w Tab. 1. Wykresy wskazowe opisujące otrzymane zależności przedstawione są na Rys. 5a [11].

W metodzie kompensacji „pre-fault” układ DVR kompensuje zarówno amplitudę napięcia jak i przesunięcie fazowe  $\delta$  [11]. W ten sposób napięcie wyjściowe po kompensacji powinno odpowiadać napięciu sprzed zapadu. Przy zastosowaniu tego typu kompensacji skutki zapadu praktycznie nie powinny być odczuwalne dla wrażliwego obciążenia. Jedynie niewielkie zniekształcenia napięcia mogą się pojawiać w chwili wystąpienia i zaniku zapadu. Zależności opisujące ten sposób kompensacji zestawione są w Tab. 1 oraz pokazane na Rys. 5b.

W obu przedstawionych powyżej metodach układ DVR dostarcza do sieci moc czynną. Dla układów z magazynem DC zasób mocy czynnej był ograniczony. W metodzie

„energy-optimal” w celu zmniejszenia poboru energii z magazynu DC napięcie kompensujące  $u_{DVR}$  było przesunięte w fazie o  $90^\circ$  w stosunku do prądu obciążenia [11]. W ten sposób kompensacja przebiegała bez konieczności dostarczania mocy czynnej do obciążenia. Należy zauważyć, że metoda „energy-optimal” ma mniejsze znaczenie praktyczne przy układzie DVR bez magazynu energii DC zasilanego z sieci, której napięcie jest kompensowane. Zależności opisujące ten sposób kompensacji zestawione są w Tab. 1 oraz pokazane na Rys. 5c.

Należy również podkreślić, że dla każdej z przedstawionych metod, zmiana zakresu generowanych napięć kompensacyjnych jest funkcją zmienną innego parametru. Dla metody „in-phase” amplituda napięcia  $u_{DVR}$  jest tylko funkcją wielkości zapadu i nie ulega zmianie przy różnych  $\delta$  oraz  $\cos(\varphi_L)$ . Natomiast dla metody „pre-fault” napięcie kompensacji jest funkcją zarówno wielkości zapadu jak i kąta  $\delta$ . Wartość  $\cos(\varphi_L)$  oraz głębokość zapadu ma wpływ na generowane napięcie kompensujące w metodzie „energy-optimal” [11]. Zmienność napięcia kompensacji przy różnych parametrach systemu, obliczone na podstawie zależności z Tab. 1 są pokazane na Rys. 6.

### Zakresy kompensacji

W podrozdziale tym zostaną obliczone zakresy kompensacji, dla której zachodzi pełna kompensacja w układzie DVR z bezpośrednim PM. Zależności napięciowe w układzie z Rys. 3 są zdefiniowane następująco [22]:

$$(3) \quad u_{MCK} = q u_{sk},$$

$$(4) \quad u_{DVRk} = n_{tr} u_{MCK},$$

$$(5) \quad u_{DVRk} = n_{tr} q u_{sk},$$

gdzie  $u_{sk}$  – napięcia zasilające PM,  $k=1, 2, 3$  – numer fazy,  $u_{MCK}$  – napięcie wyjściowe PM,  $q$  – wzmocnienie napięciowe PM,  $u_{DVRk}$  – napięcie wyjściowe układu DVR na zaciskach wtórnych transformatorów dodatkowych,  $n_{tr}$  – przekładnia napięciowa transformatorów dodatkowych. Dla strategii modulacji SVM łączników PM wzmocnienie napięciowe opisane jest zależnością (6) [21]. Przy jednostkowym wejściowym współczynniku mocy ( $\cos(\varphi_S)=1$ ) uzyskujemy maksymalne wzmocnienie napięciowe  $q_{max}=0.866$ .

$$(6) \quad q \leq \sqrt{3}/2 |\cos \varphi_S|$$

Uwzględniając zależności (3) – (5), relacje pomiędzy amplitudą napięcia obciążenia  $U_{L\text{post\_sag}}$ , amplitudą napięcia po wystąpieniu zapadu  $U_{S\text{post\_sag}}$  oraz amplitudą napięcia  $U_{DVR}$  układu DVR z PM są określone zależnością (7) [22]. Wartość napięcia DVR w jednostkach względnych określa zależność (8) [22].

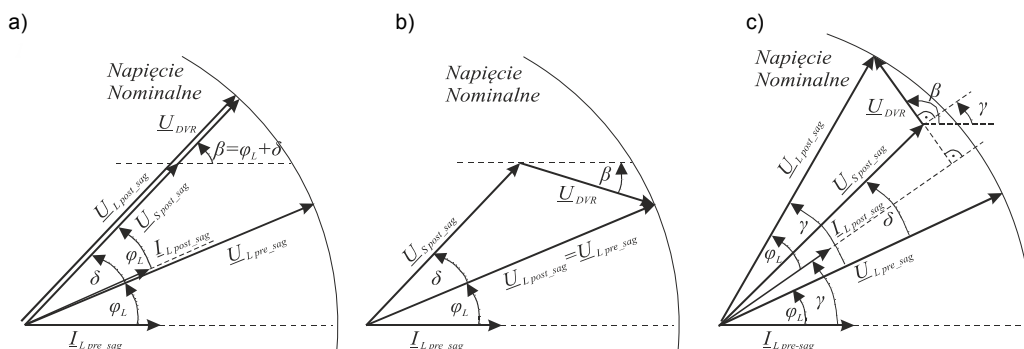
$$(7) \quad U_{L\text{post\_sag}} = U_{S\text{post\_sag}} + U_{DVR} = (1 + q n_{tr}) U_{S\text{post\_sag}}$$

$$(8) \quad U_{DVR} = \frac{U_{L\text{post\_sag}} - U_{S\text{post\_sag}}}{U_{L\text{post\_sag}}} = \frac{q n_{tr}}{1 + q n_{tr}}$$

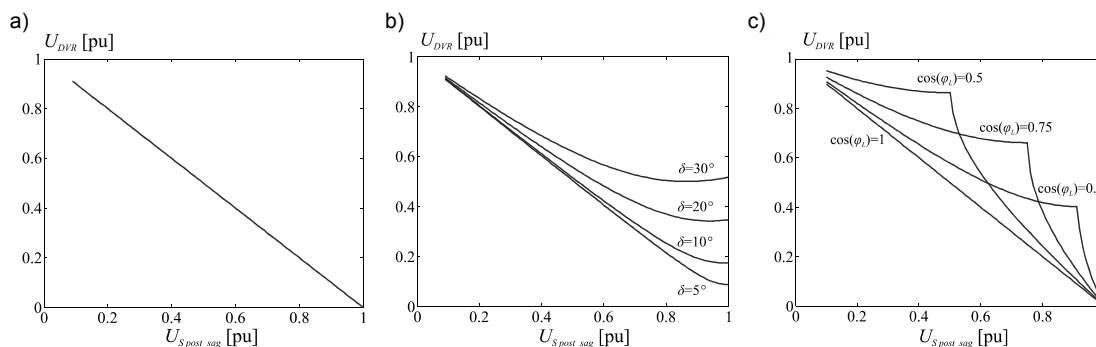
Na Rys. 7 zostały pokazane zakresy regulacji amplitudy napięcia  $U_{DVR}$  w funkcji  $q$  oraz  $n_{tr}$ . Maksymalna wartość tego napięcia dla przekładni napięciowej transformatora  $n_{tr}=1$  wynosi  $U_{DVR\text{max}}=0.464$ . Z tej zależności wynika, że układ DVR z PM przy  $n_{tr}=1$  jest w stanie skompensować zapad równy około 0.536 [pu] (53.6%).

Tabela 1. Reguły kompensacji w układzie DVR

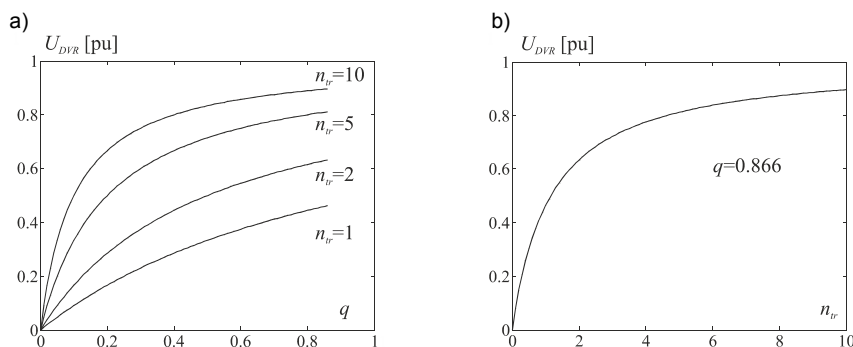
in-phase	$\underline{U}_{DVR} = U_{L\ post\_sag} (\cos(\delta + \varphi_L) + j \sin(\delta + \varphi_L)) - U_{S\ post\_sag} (\cos(\delta + \varphi_L) + j \sin(\delta + \varphi_L))$ $U_{DVR} = U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag}, \quad \beta = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(\underline{U}_{DVR})}{\text{Re}(\underline{U}_{DVR})} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\delta + \varphi_L)}{\cos(\delta + \varphi_L)} \right) = \delta + \varphi_L$
Pre-fault	$\underline{U}_{DVR} = U_{L\ post\_sag} (\cos(\varphi_L) + j \sin(\varphi_L)) - U_{S\ post\_sag} (\cos(\delta + \varphi_L) + j \sin(\delta + \varphi_L))$ $U_{DVR} = \sqrt{1 - (U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag})^2} - 2(U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag}) \cos(\delta)$ $\beta = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(\underline{U}_{DVR})}{\text{Re}(\underline{U}_{DVR})} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\varphi_L) - (U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag}) \sin(\delta + \varphi_L)}{\cos(\varphi_L) - (U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag}) \cos(\delta + \varphi_L)} \right)$
Energy-optimal	$\underline{U}_{DVR} = U_{L\ post\_sag} (\cos(\varphi_L + \gamma) + j \sin(\varphi_L + \gamma)) - U_{S\ post\_sag} (\cos(\delta + \varphi_L) + j \sin(\delta + \varphi_L))$ $U_{DVR} = \sqrt{1 - (U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag})^2} - 2(U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag}) \cos(\delta - \gamma)$ $\beta = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(\underline{U}_{DVR})}{\text{Re}(\underline{U}_{DVR})} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\varphi_L + \gamma) - (U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag}) \sin(\delta + \varphi_L)}{\cos(\varphi_L + \gamma) - (U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag}) \cos(\delta + \varphi_L)} \right)$ $\gamma = \varphi_L + \delta \text{ dla } U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag} \geq \cos(\varphi_L)$ $\gamma = \varphi_L + \delta - \cos^{-1}(1 / (U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag})) \text{ dla } U_{L\ post\_sag} - U_{S\ post\_sag} < \cos(\varphi_L)$



Rys. 5. Diagram wskazowy napięć w systemie z DVR przy kompensacji: a) typu „in-phase”, b) typu „pre-fault”, c) typu „energy-optimal”



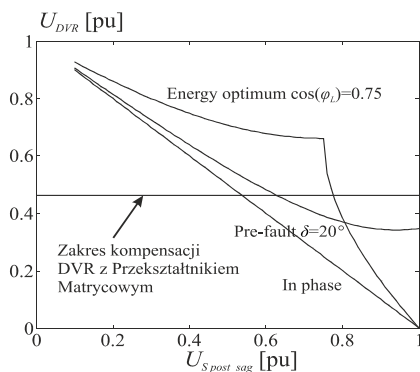
Rys. 6. Charakterystyki regulacyjne układu DVR przy kompensacji: a) typu „in-phase”, b) typu „pre-fault”, c) typu „energy-optimal”



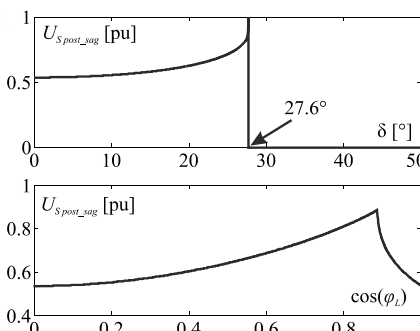
Rys. 7. Zakres generowanego napięcia przez DVR z PM: a) w funkcji wzmożenia napięciowego PM dla różnych przekładni transformatorów, b) w funkcji przekładni transformatorów przy stałym wzmożeniu PM  $q=0.866$

Zestawiając otrzymany wynik z zakresami generacji napięcia  $U_{DVR}$  trzech metod sterowania, jesteśmy w stanie oszacować dla danej metody, jaki maksymalny zapad jesteśmy w stanie skompensować. Przykładowe zestawienie charakterystyk pokazane jest na Rys. 8.

Z rysunku 8 wynika, że dla metody „in-phase” możliwe jest kompensowanie maksymalnego zapadu 53.6% bez względu na zmianę kąta  $\delta$  czy  $\cos(\varphi_L)$ . Dla metody „pre-fault” możliwe jest określenie analitycznej zależności na wartość maksymalnego zapadu, jaki jest w stanie skompensować układ DVR w zależności od zmiany kąta  $\delta$ . Zależność ta opisana jest równaniem (9). Interpretacja graficzna tej zależności przedstawiona jest na Rys. 9a. Pełna kompensacja napięcia zgodnie z zależnością (9) jest spełniona wówczas gdy wartość pod pierwiastkiem będzie większa od zera. Gdy wyrażenie to osiągnie wartość mniejszą od zera, to układ DVR nie jest w stanie skompensować pełnego zapadu. Na Rys. 9a zaznaczony jest tylko pełny zakres kompensacji – wartość charakterystyki różna od zera. Dla kąta  $\delta$  równego około  $27.6^\circ$  możliwe jest jeszcze pełne skompensowanie niewielkich zapadów do około 85%.



Rys. 8. Porównanie metod sterowania układu DVR w zestawieniu z maksymalnym napięciem generowanym przez układ DVR z PM



Rys. 9. Wartość maksymalnego zapadu, który może być całkowicie z kompensowany dla układu DVR z PM i  $n_{tr}=1$ : a) metoda „pre-fault”, b) metoda „energy-optimal”

$$(9) U_{S post\_sag max [pu]} = \cos(\delta) - \sqrt{\frac{2U_{DVR max [pu]}^2 + \cos(2\delta) - 1}{2}}$$

Dla metody „energy-optimal” nie jest prostym wyznaczenie zależności analitycznej na wyznaczenie zakresu pełnej kompensacji. Na Rys. 9b przedstawiony jest zakres pełnej kompensacji wyznaczony w sposób numeryczny na zasadzie różnicy maksymalnej amplitudy napięcia  $U_{DVR}$  oraz napięcia potrzebnego do kompensacji zgodnie z zależnościami z Tab. 1.

Dla przekładni napięciowych transformatorów dodatkowych  $n_{tr}$  większych od jednośc zakresy pełnej kompensacji rozszerza się zgodnie z zależnością (8).

## Wyniki badań symulacyjnych

W celu sprawdzenia poprawności omawianych metod kompensacji zapadów napięcia zgodnie z zależnościami zestawionymi w Tab. 1, zostały wykonane badania symulacyjne układu DVR z PM w konfiguracji jak na Rys. 3. Badania te zostały przeprowadzone za pomocą programu Matlab Simulink. Parametry symulacyjne układu przedstawione są w Tabeli 2.

Tabela 2. Parametry symulacyjne

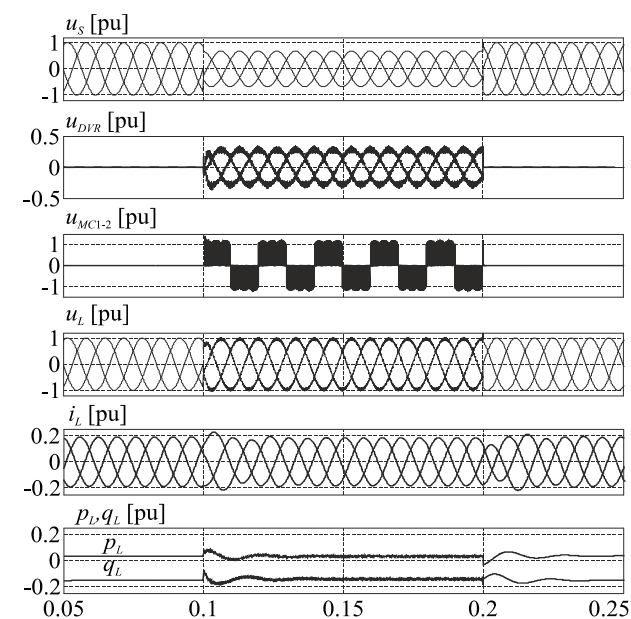
Parametry Systemu	Nazwa	Wartość
Napięcie zasilania	$U_S$	400 V
Impedancja obciążenia	$Z_L$	$(15+j25.13) \Omega$
Częstotliwość PWM	$f_{sw}$	5 kHz
Zapad napięcia	$U_{S post\_sag}$	227 V
Czas zapadu	$t_D$	100 ms
Zmiana fazy podczas zapadu	$\varphi_D$	$25^\circ$
Parametry transformatora	Nazwa	Wartość
Moc znamionowa	$S_N$	100 kVA
Napięcie strony pierwotnej/wtórnej	$U_{pri} / U_{sec}$	400 V/400 V
Indukcyjność rozproszenia	$L_{leakage}$	0.76 mH
Rezystancja uzwojeń	$R_L$	120 mΩ
Indukcyjność mag.	$L_{mag}$	314 mH
Rezystancja strat w żelazie	$R_{fe}$	359 Ω
Parametry Filtrów	Nazwa	Wartość
Indukcyjność filtru wejściowego	$L_F$	1 mH
Indukcyjność filtru wyjściowego	$L_L$	0.5 mH
Pojemność filtru wejściowego	$C_F$	8 μF
Pojemność filtru wyjściowego	$C_L$	5 μF

Na rysunku 10 zostały zaprezentowane wyniki badań symulacyjnych przy metodzie kompensacji typu „in-phase”. Zaprezentowano kolejno przebiegi czasowe: napięć sieci zasilającej z zapadem równym 68% oraz przesunięciem fazowym  $\delta=25^\circ$ , napięć kompensujących z układu DVR, napięcia międzyfazowego  $u_{MC1-2}$  na wyjściu przekształtnika matrycowego, napięć obciążenia po kompensacji, prądów obciążenia oraz wartości mocy chwilowych czynnej  $p_L$  i biernej  $q_L$  na obciążeniu. Charakterystyczne dla tego typu sterowania jest to, że podczas zapadu napięcia przy skoku fazy napięcia zasilania kompensowana jest tylko amplituda napięcia na obciążeniu. Widoczne są wówczas, na początku i końcu zapadu napięcia, duże kołysania prądów obciążenia, a co za tym idzie mocy czynnej oraz biernej. Dla odbiorników wrażliwych na takie zjawiska ten sposób kompensacji jest niewystarczający. Z przebiegów czasowych można zauważyć poprawność przeprowadzonej kompensacji, gdyż zarówno amplituda napięcia obciążenia jak i chwilowe moce czynne i bierne podczas zapadu mają wartość taką jak przed zapadem. Występują tylko stany przejściowe w momentach początkowym i końcowym zapadu.

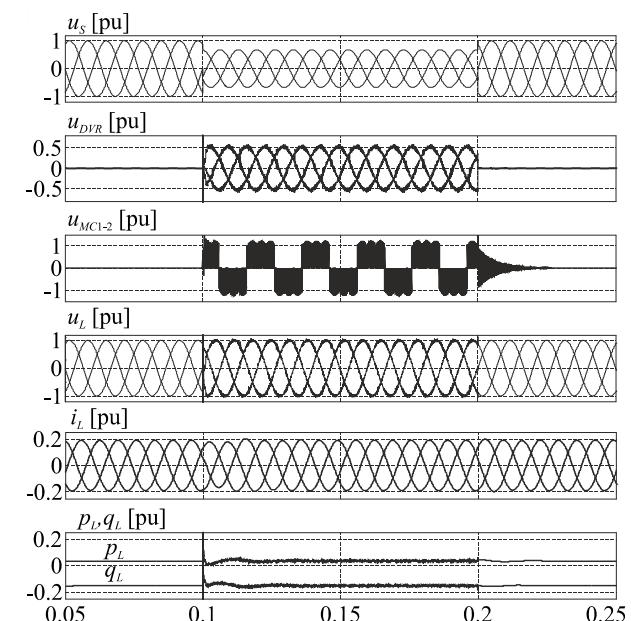
Identyczny zestaw przebiegów czasowych został zaprezentowany na Rys. 11 dla metody sterowania DVR typu „pre-fault”. Z rysunku tego można zauważyć wyraźne różnice w stosunku do wyników z Rys. 10. Przede wszystkim amplituda napięcia kompensującego jest znacznie większa niż dla metody typu „in-phase”. Ponadto w napięciu obciążenia prawie niezauważalny jest moment wystąpienia i zakończenia zapadu, gdyż kompensowana jest zarówno amplituda napięcia jak i jego faza. Również, stan przejściowy prądów obciążenia, jak i mocy chwilowych jest minimalny i wynika z szybkości zadziałania algorytmu detekcji zapadu napięcia.

Wyniki symulacji dla ostatniej z prezentowanych metod typu „energy-optimal” zostały pokazane na Rys. 12. Zaprezentowano identyczny zestaw przebiegów co poprzednio wzbogacony o przebiegi napięć  $u_{DVR}$  oraz prądu obciążenia  $i_L$ . Przebiegi te są przesunięte względem siebie o  $90^\circ$ , co świadczy o poprawności metody. Z punktu widzenia źródła zasilania metoda ta ma mniejsze znaczenie

dla układów DVR bez magazynu energii niż dla układów z magazynami energii DC, dla których minimalizowała zużycie zmagazynowanej energii. Z punktu widzenia obciążenia, metoda ta jest kompromisem pomiędzy dwiema wcześniej opisywanymi metodami, gdyż kompensowana jest amplituda napięcia obciążenia jak i częściowo przesunięcie fazowe.



Rys. 10. Przebiegi czasowe sygnałów w układzie z Rys. 3 dla metody kompensacji typu „in-phase”

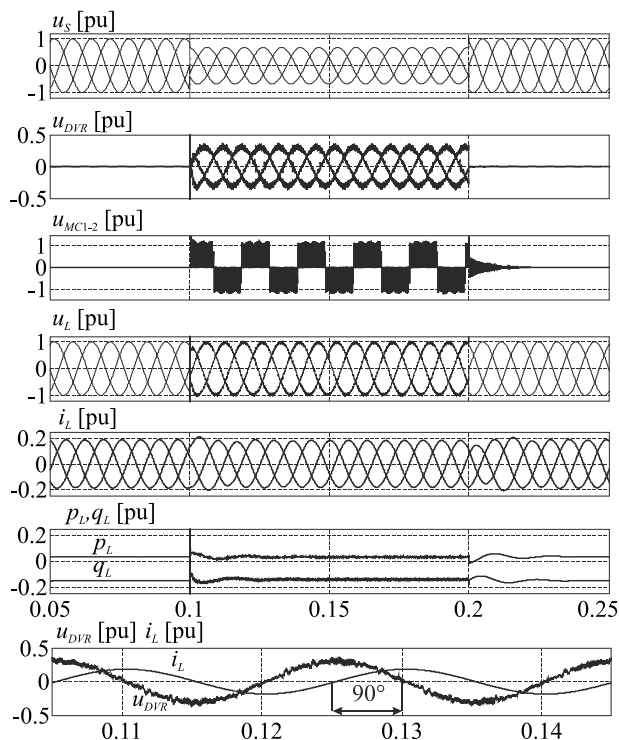


Rys. 11. Przebiegi czasowe sygnałów w układzie z Rys. 3 dla metody kompensacji typu „pre-fault”

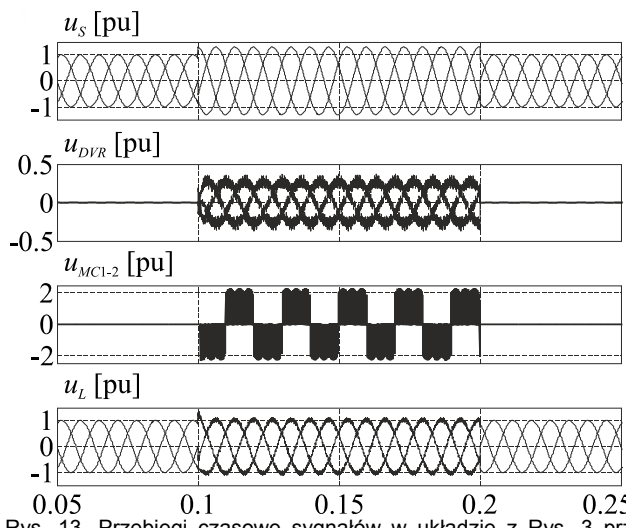
Układ DVR umożliwia kompensację prępeń występujących w systemie. Wyniki symulacyjne dla prępeń 130% przedstawione są na Rys. 13, przy kompensacji typu „in-phase”. Napięcie kompensujące jest w przeciwną fazę z napięciem obciążenia, tak by po zsumowaniu z napięciem sieci zasilającej na obciążeniu otrzymać nominalną wartość napięcia obciążenia. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość kompensacji prępeń w układzie DVR z PM.

Duża liczba zapadów w sieci to zapady jednofazowe lub niesymetryczne będące wynikami zwarć jednofazowych

z ziemią, dwufazowych i dwufazowych z ziemią. Analiza tego typu zagadnień wymaga od układu sterowania łączników przekształtnika matrycowego rozbudowanej strategii modulacji. Ze względu na złożoność tego zagadnienia, tego typu analiza nie będzie prezentowana w tej publikacji.



Rys. 12. Przebiegi czasowe sygnałów w układzie z Rys. 3 dla metody kompensacji typu „energy-optimum”



Rys. 13. Przebiegi czasowe sygnałów w układzie z Rys. 3 przy kompensacji prępeń, dla metody kompensacji typu „in-phase”

### Porównanie właściwości DVR z PM

W podrozdziale tym zostało zaprezentowane, porównanie właściwości układu DVR z przekształtnikiem matrycowym. Właściwości te zestawiono w Tab. 3. Ogólnie można stwierdzić, że metody kompensacji typu „pre-fault” i „energy-optimal” wymagają dużej liczby obliczeń matematycznych i muszą mieć informacje o stanie parametrów sieci sprzed zapadu. Umożliwiają kompensację zarówno amplitudy jak i fazy napięcia. Należy wskazać, że metoda „energy-optimal” jest raczej metodą dedykowaną do układów DVR z magazynem energii elektrycznej, a w artykule była analizowana jedynie ze względów

poznawczych i porównawczych. Najprostszą do implementacji jest metoda „in-phase” jednakże kompensuje ona tylko amplitudę napięcia obciążenia. Prostota tej metody, ma wpływ na tętnienia prądu obciążenia w momencie wejścia i wyjścia w stan zapadu, podczas gdy przy dwóch poprzednich metodach możliwe jest zmniejszenie tych tętnień, co ma duży wpływ dla obciążeń wrażliwych na zmianę kąta fazowego napięcia zasilania.

Przedstawione właściwości metod kompensacji są niezależne od typu przekształtnika energoelektronicznego zastosowanego w układzie DVR. Podobne właściwości przy sterowaniu z wykorzystaniem powyższych metod, będą występowały w układach DVR zarówno z magazynem DC, AC, międzysystemowych jak i układzie zasilanym z sieci kompensowanej z użyciem przekształtnika AC/DC/AC.

Zastosowanie topologii DVR zasilanej z kompensowanej sieci charakteryzuje się tym, że może kompensować bardzo długie zapady bez ryzyka wyczerpania się energii potrzebnej do kompensacji. Wadą tej konfiguracji jest ograniczona możliwość kompensacji głębokich zapadów, gdyż wiązałoby się to ze znacznym obciążeniem kompensowanej linii. Zastosowanie przekształtników bezpośrednich, bez magazynów DC, umożliwia zwiększenie niezawodności systemu, ze względu na eliminację wrażliwych komponentów. Jednocześnie minimalizuje się gabaryty i cenę takich rozwiązań.

Tabela 3. Porównanie właściwości DVR z PM

Parametry	in-phase	pre-sag	energy-optimal
Kompensacja:			
Amplitudy	Tak	Tak	Tak
Fazy	Nie	Tak	Częściowa
Wpływ parametrów na amplitudę napięcia $U_{DVR}$			
Obciążenia	Nie	Nie	Tak
Kąta fazowego $\delta$	Nie	Tak	Nie
Konieczność pamiętania wartości sprzed zapadu	Nie	Tak	Tak
Złożoność obliczeniowa	Mała	Średnia	Duża
Tętnienia w prądzie obciążenia przy wejściu i wyjściu z zapadu	Duże	Małe	Średnie/Małe

## Wnioski

W artykule omówiono trzy metody kompensacji zapadów napięcia w układach DVR: typu „in-phase”, typu „pre-fault”, typu „energy-optimal”. Metody te zaimplementowano do sterowania układem DVR z przekształtnikiem matrycowym zasilanym z kompensowanej sieci. Przedstawiono zakresy kompensacji dla takiego układu DVR z wykorzystaniem omawianych metod kompensacji i wskazano ich ograniczenia. Poprawność kompensacji została zweryfikowana w badaniach symulacyjnych w programie Simulink. Uzyskane wyniki badań potwierdzają możliwość wykorzystania PM w układach typu DVR, jak również możliwość ich sterowania przy pomocy omawianych metod kompensacji.

Dalsze badania będą dotyczyły sprawdzenia możliwości kompensacji za pomocą układu DVR z PM przy zwarciach niesymetrycznych. Dodatkowo planowane jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych w układzie laboratoryjnym małej mocy.

## LITERATURA

- [1] Hanzelka Z., Jakość dostaw energii elektrycznej. Zaburzenia wartości skutecznej napięcia. Wydawnictwa AGH, Kraków 2013.
- [2] Djokic Z., Desment J., Vanalme G., Milanovic J., Stockman K., Sensitivity of personal computer to voltage sags and short interruptions, *IEEE Trans. Power Del.*, 20 (2005), n.1, 375–383
- [3] Falce A., Matas G., Da Silva Y., Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors,” in *Proc. IEEE IAS 2004*, 4 (2004), 2573–2578.
- [4] PN-EN 50160:2010 - Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych
- [5] Pawlicki B., Kształtowanie obciążeń w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych z wykorzystaniem regulacji napięcia DVR, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr.9, 249-253
- [6] Rafał K., Kaźmierkowski M. P., Sterowanie układem STATCOM z zasobnikiem energii z kompensacją wyższych harmonicznych i symetryzacją napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr.12a, 1-5
- [7] Chen Z., Zou X., Duan S., Wen J., Cheng S., Application of flywheel energy storage to damp power system oscillations, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr.3, 333-337
- [8] Qanaatian M. J., Rahmati A., Analysis and Design of Hybrid Learning Control scheme for High Performance UPS Inverters, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.4, 41-44
- [9] Fabijański P., Zastosowanie układu UPQC do poprawy jakości energii elektrycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.2, 191-194
- [10] Bashi S. M., Microcontroller-based fast on-load semiconductor tap changer for small power transformer, *J. Appl. Sci.*, 5 (2005), n.6, 999–1003
- [11] Nielsen J. G., Blaabjerg F., A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 41 (2005), n.5, 1272- 1280
- [12] Nielsen J.G., Blaabjerg F., Mohan N., Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump, In *Proc. APEC 2001*, 2 (2001), 1267-1273
- [13] Wang B. Venkataraman G., Dynamic Voltage Restorer Utilizing a Matrix Converter and Flywheel Energy Storage, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 45 (2009), n.1, 222-231
- [14] Vilathgamuwa D. M., Wijekoon H. M., Choi, S. S., Interline dynamic voltage restorer: a novel and economical approach for multiliner power quality compensation, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 40 (2004), n.6, 1678-1685
- [15] Wang H., Blaabjerg F., Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters—An Overview, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 50 (2014), n.5, 3569-3578
- [16] Kolar J. W., Friedli T., Rodriguez J., Wheeler P. W., Review of Three-Phase PWM AC–AC Converter Topologies, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58 (2011), n.11, 4988–5006
- [17] Empringham L., Kolar J. W., Rodriguez J., Wheeler P. W., Clare J. C., Technological Issues and Industrial Application of Matrix Converters: A Review, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60 (2013), n.10, 4260-4271
- [18] Szcześniak P., Fedyczak Z., Application of the matrix converter to power flow control, *Archives of Electrical Engineering*, 63 (2014), n.3, 409-422
- [19] Yamamoto E., Hara H., Kang J. K., Krug H. P., Development of MCs for Industrial Applications, *IEEE Ind. Electron. Mag.*, 5 (2011), 4–12
- [20] Garcia-Vite P.M., Mancilla-David F., Ramirez J. M., Per-Sequence Vector-Switching Matrix Converter Modules for Voltage Regulation, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60 (2013), n.12, 5411-5421
- [21] Szcześniak P., A Static and Dynamic Model of a Space Vector Modulated Matrix-Reactance Frequency Converter, *Elec. Power Syst. Res.*, 108 (2014), 82-92
- [22] Babaei E., Kangarlu M. F., Sabahi M., Mitigation of Voltage Disturbances Using Dynamic Voltage Restorer Based on Direct Converters, *IEEE Trans. Power Del.*, 25 (2010), n.4, 2676-2683

**Autorzy:** dr inż. Paweł Szcześniak, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Podgórna 50, 56-246 Zielona Góra, E-mail: [P.Szczesniak@iee.uz.zgora.pl](mailto:P.Szczesniak@iee.uz.zgora.pl)