

Układ Dynamicznego Odtwarzania Napięcia Bazujący na Przekształtniku Matrycowym

Streszczenie. W artykule rozpatrzono wybrane problemy łagodzenia zaburzeń napięcia w liniach zasilających za pomocą tzw. układów dynamicznego odtwarzania napięcia (DVR- Dynamic Voltage Restorers) z wykorzystaniem przekształtnika matrycowego. W artykule wskazano główne konfiguracje pracy przekształtnika matrycowego, jako układu odtwarzającego napięcie. Przedstawione wyniki badań symulacyjnych mają na celu wskazanie przydatności proponowanego układu, jako alternatywę do powszechnie stosowanych DVR-ów z falownikiem napięcia.

Słowa kluczowe: przekształtnik matrycowy, DVR – dynamic voltage restorer, Kompensacja zapadów napięcia

Wprowadzenie

Układy dynamicznego odtwarzania napięcia (z ang. Dynamic Voltage Restorers - DVR), w razie zaburzeń napięcia zasilania bezzwłocznie odtwarza napięcie wymagane, zabezpieczając właściwe zasilanie odbiornika wrażliwego, z wyjątkiem sytuacji przerw w zasilaniu oraz odchyłeń częstotliwości [1]. Głównie kompensowane są zapady napięcia oraz przepięcia. Działanie DVR polega na szeregowym dodawaniu napięcia o odpowiedniej wartości do aktualnego napięcia zasilania odbiornika wrażliwego, tak by napięcie odbiornika było równe napięciu nominalnemu.

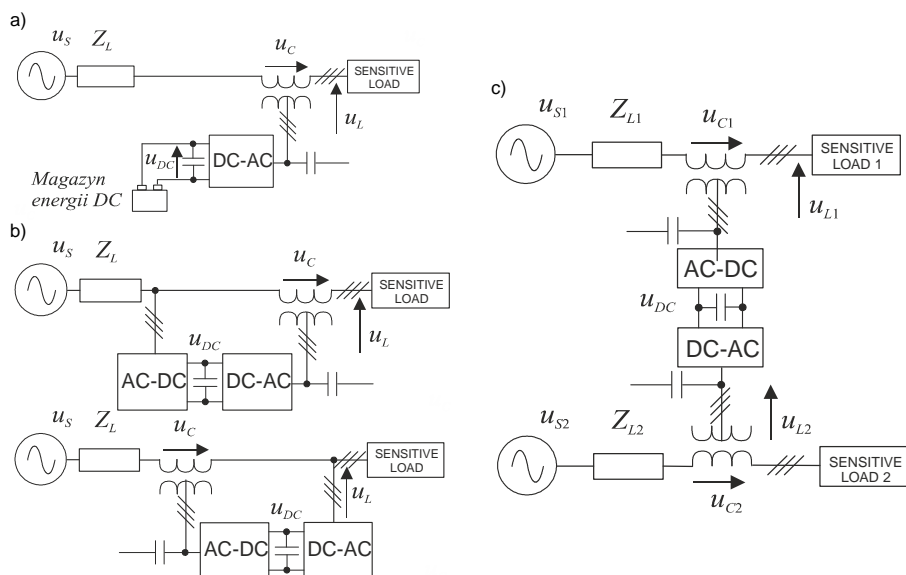
Ze względu na stosunkowo długie czasy trwania zaburzeń napięcia zasilania (nawet kilka sekund), układy DVR muszą mieć możliwość poboru energii z innego źródła zasilania [2]. Przy niewielkich zapadach dopuszczalne jest pobieranie energii z linii, w której występuje zaburzenie. Podział klasycznych układów DVR z falownikiem napięcia VSI (Voltage Source Inverter) przedstawiony jest na rys. 1. Rozróżniamy tu klasyczną strukturę VSI wyposażoną w dodatkowy zasobnik energii dołączony do obwodu DC (rys. 1a) [2], liniowy DVR z prostownikiem niesterowanym dołączonym do obwodu DC i zasilany z tej samej linii co odbiornik, w dwóch konfiguracjach z źródłem dodatkowym od strony sieci i zasilania (rys. 1b) [3], oraz układ międzyliniowego DVR zasilany z drugiego systemu zasilania (rys. 1c) [2].

W konfiguracjach liniowego oraz międzyliniowego DVR-a zamiast klasycznej struktury z VSI możliwe jest zastosowanie bezpośredniego przekształtnika AC-AC, bez pośredniego linku DC. Najbardziej rozpowszechnionym układem bezpośredniego przekształtnika AC-AC jest przekształtnik matrycowy - PM (z ang. matrix converter) [4].

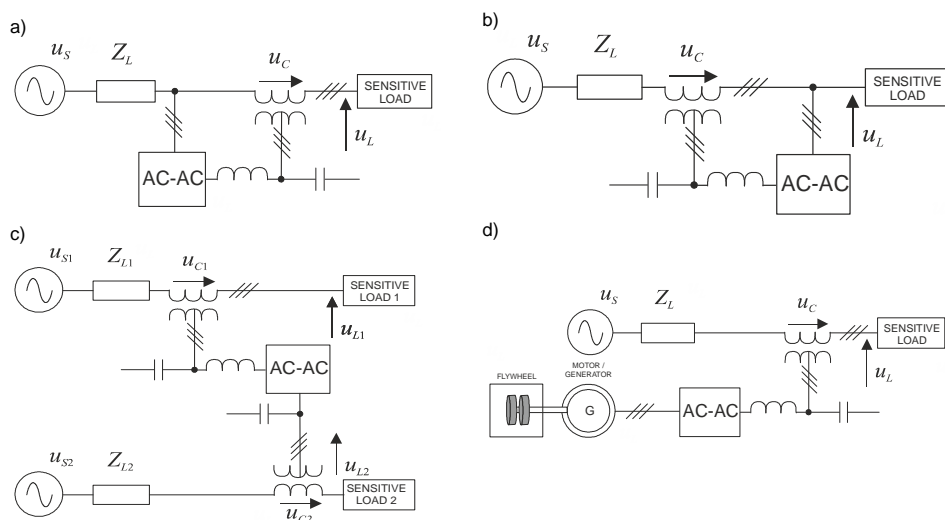
Ze względu na brak możliwości dołączenia do przekształtnika matrycowego zewnętrznego magazynu energii elektrycznej prądu stałego, możliwa jest praca PM, jako DVR tylko w konfiguracji liniowej (rys. 2a, b), międzyliniowej (rys. 2c) lub z zasilaniem z dodatkowego źródła energii elektrycznej typu AC (rys. 2d). Dodatkowym źródłem AC może być np. generator wiatrowy, mikroturbina, generator diesla lub magazyn energii w postaci szybko-wirujących dużych mas bezwładności (z ang. flywheel). Aplikacje DVR z PM, w różnych konfiguracjach pracy zostały przedstawione m.in. w pracach [4]-[10].

Z punktu widzenia żywotności i niezawodności układów przekształtnikowych, przekształtnik matrycowy jest wymieniany, jako układ o zwiększonej niezawodności i żywotności [4],[11]. PM nie posiada w swojej strukturze magazynu energii elektrycznej

typu DC. Magazyny te w postaci kondensatorów elektrolitycznych są elementami wrażliwymi, które najczęściej ulegają uszkodzeniom. Ponadto magazyn energii DC są jednym z komponentów, które w znacznym stopniu determinują gabaryty i koszty całego systemu.



Rys. 1. Konfiguracje DVR: a) z dodatkowym magazynem energii, b) liniowy, c) międzyliniowy



Rys. 2. Konfiguracje DVR z PM: a) liniowy ze źródłem dodatkowym od strony odbiornika, b) liniowy ze źródłem dodatkowym od strony sieci, c) międzyliniowy, d) zasilany z dodatkowego źródła AC

Brak magazynu energii elektrycznej z jednej strony zwiększa niezawodność z drugiej powoduje, że układ DVR w konfiguracji liniowej dodatkowo obciąża system, w którym nastąpiła awaria. Dlatego też liniowe układy DVR nie mogą kompensować dużych zapadów napięcia, jak również ich zastosowanie w danym systemie musi być

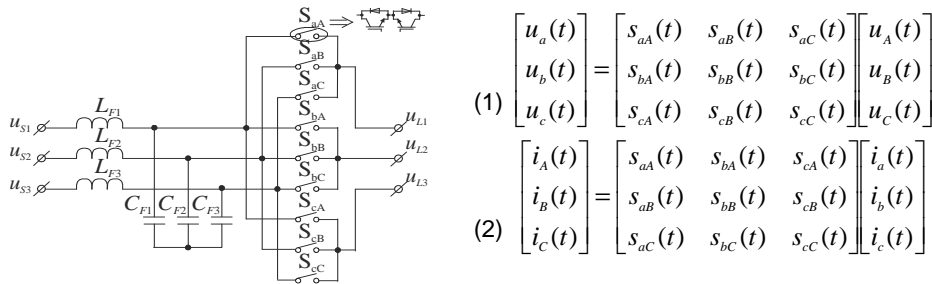
VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

poprzedzone analizą wpływu jego działania na sieć, podczas wystąpienia stanów niedozwolonych. W analizie tej należy uwzględnić impedancje sieci oraz generatorów, jak również obciążenie linii chronionej.

W artykule tym przedstawione będą wstępne wyniki badań symulacyjnych pokazujących pracę układu DVR z przekształtnikiem matrycowym w konfiguracji liniowego DVR ze źródłem dodatkowym od strony chronionego odbioru.

Przekształtnik Matrycowy

Schemat omawianego układu PM pokazano na rys. 3 [4], [11]. Niskoczęstotliwościowe relacje napięciowe i prądowe dla sygnałów wejściowych i wyjściowych matrycy łączników są określone zależnościami (1) oraz (2), gdzie: $s_{jk}=0$ – łącznik wyłączony, $s_{jk}=1$ – łącznik włączony, $j=\{a, b, c\}$, $k=\{A, B, C\}$ [4].



Rys. 3. Schemat ideowy przekształtnika matrycowego z idealnymi łącznikami dwukierunkowymi

Strategia sterowania układu PM bazuje na metodzie modulacji wektora przestrzennego (SVM - Space Vector Modulation) [4]. Spośród 27 dozwolonych konfiguracji matrycy łączników do realizacji SVM wykorzystywanych jest 18 konfiguracji aktywnych oraz 3 konfiguracje zerowe [4]. Reprezentacja wektorowa trójfazowych napięć i prądów jest budowana za pomocą zależności (3) [4]:

$$(3) \quad \underline{x} = \frac{2}{3}(x_1 + x_2 e^{j(2\pi/3)} + x_3 e^{j(4\pi/3)}),$$

gdzie: x_1, x_2, x_3 – wartości chwilowe trójfazowych wielkości transformowanych. Synteza dowolnych napięć u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} , oraz prądów i_A, i_B, i_C , w układzie z PM, polega na załączeniu odpowiednich konfiguracji łączników a przez to ustalaniu położenia wektorów przestrzennych napięcia oraz prądu. Sekwencja przełączania jest określona w zależności od położenia wektorów przestrzennych w danym sektorze S_i oraz S_o (rys. 4). Synteza wektorów prądów i napięć, w każdym okresie sekwencji przełączania T_{Seq} odbywa się za pomocą załączania 4 konfiguracji łączników matrycy odpowiadających wektorom aktywnym oraz jednej konfiguracji łączników odpowiadającej wektorowi zerowemu [4]. Względne czasy włączenia poszczególnych konfiguracji łączników obliczane są za pomocą zależności (4) – (9) [4]:

$$(4) \quad \delta_1 = (-1)^{s_o+s_i+1} \frac{2}{\sqrt{3}} q \frac{\cos(\alpha_o - \pi/3) \cos(\beta_i - \pi/3)}{\cos \varphi_i},$$

$$(5) \quad \delta_2 = (-1)^{s_o+s_i} \frac{2}{\sqrt{3}} q \frac{\cos(\alpha_o - \pi/3) \cos(\beta_i + \pi/3)}{\cos \varphi_i},$$

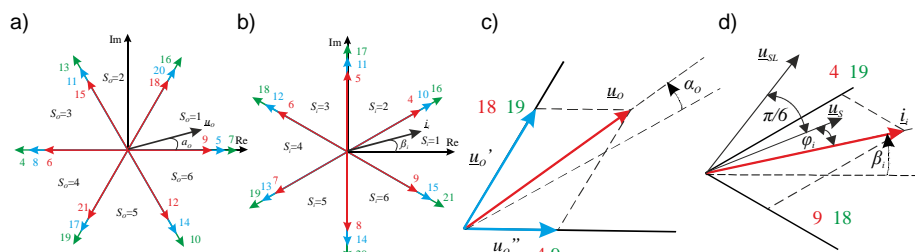
$$(6) \quad \delta_3 = (-1)^{S_0+S_i} \frac{2}{\sqrt{3}} q \frac{\cos(\alpha_0 + \pi/3) \cos(\beta_i - \pi/3)}{\cos \varphi_i},$$

$$(7) \quad \delta_4 = (-1)^{S_0+S_i+1} \frac{2}{\sqrt{3}} q \frac{\cos(\alpha_0 + \pi/3) \cos(\beta_i + \pi/3)}{\cos \varphi_i},$$

$$(8) \quad t_1 = |\delta_1| T_{seq}; \quad t_2 = |\delta_2| T_{seq}; \quad t_3 = |\delta_3| T_{seq}; \quad t_4 = |\delta_4| T_{seq},$$

$$(9) \quad t_0 = |\delta_0| T_{seq} = 1 - (|\delta_1| + |\delta_2| + |\delta_3| + |\delta_4|) T_{seq},$$

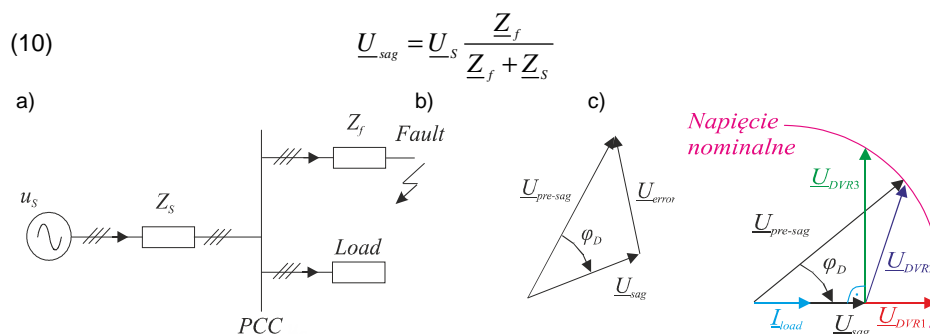
gdzie: α_0 – kąt pomiędzy wektorem napięć \underline{u}_{OL} i linią dzielącą aktualny sektor S_0 na dwie równe części, β_i , – kąt pomiędzy wektorem prądów \underline{i}_i i linią dzielącą aktualny sektor S_i na dwie równe części (Rys. 4,c,d).



Rys. 4. Reprezentacje wektorowe, a) napięć międzyfazowych u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} , b) prądów i_a , i_b , i_c , Przykład syntezy wektorów przestrzennych w układzie PM dla $S_i = 1$ oraz $S_0 = 1$; c) wektor napięć u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} , d) wektora prądów i_a , i_b , i_c

Sterowanie układu DVR

Zapady napięcia w sieci elektroenergetycznej są wynikiem niepożądanych stanów pracy systemu np. zwarcia lub przeciążenia. W wyniku tych stanów na impedancji sieci występuje spadek napięcia. Wówczas w punkcie PCC, w którym chcemy utrzymywać stałą wartość napięcia, z godnie z rys. 5a uzyskujemy [4]:



Rys. 5. Powstawanie zapadów napięcia w sieci elektroenergetycznej a) schemat poglądowy sieci, b) wykresy wskazowe; $\underline{U}_{pre-sag}$ -amplituda napięcia przed zapadem, \underline{U}_{sag} -amplituda napięcia po zapadzie, \underline{U}_{error} -amplituda napięcia potrzebna do skompensowania zapadu, c) sposoby kompensacji zapadów napięcia za pomocą układów DVR: \underline{U}_{DVR1} -sterowanie typu „in-phase”; \underline{U}_{DVR2} -sterowanie typu „pre-sag”; \underline{U}_{DVR3} -sterowanie typu „energy optimal”

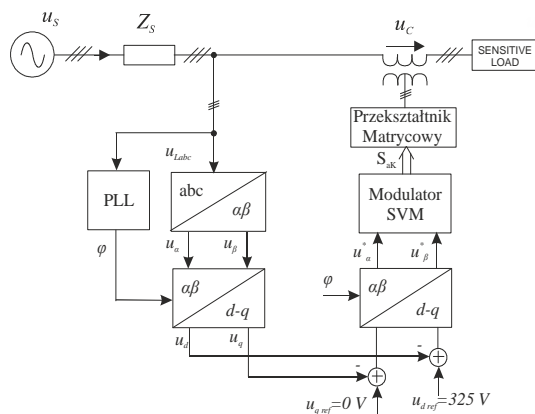
Oprócz spadku amplitudy napięcia może wystąpić również przesunięcie fazy napięcia w punkcie PCC. W teorii kompensacji napięć za pomocą układów DVR

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

rozróżniamy trzy sposoby sterowania [4], [10]: typu „pre-sag”, typu „in-phase” oraz typu „energy optimal” (rys. 5c). Sterowanie typu „pre-sag” polega na kompensacji zarówno spadku amplitudy napięcia jak również powstałego przesunięcia fazowego [4], [10]. W sterowaniu typu „in-phase” kompensowany jest tylko spadek amplitudy napięcia, a jego faza jest równa fazie napięcia podczas zapadu [4], [10]. W sterowaniu „energy optimal” napięcie kompensujące jest przesunięte w fazie w stosunku do prądu obciążenia o 90° , tak by układ DVR nie pobierał mocy czynnej z sieci zasilającej [4], [10].

Wyniki badań symulacyjnych

W artykule zostały zaprezentowane wstępne wyniki badań symulacyjnych układu DVR z przekształtnikiem matrycowym, w konfiguracji liniowej z napięciem dodawczym od strony obciążenia (rys. 2a). Zasymlowano trójfazowy symetryczny zapad napięcia równy 70% napięcia nominalnego z przesunięciem fazowym równym 25° . Parametry symulacyjne układu zostały zestawione w tabeli 1. Do wyznaczania zapadu napięcia wykorzystany został algorytm bazujący na transformacji napięć do układu $dq0$, który został przedstawiony na rys. 6.



Rys. 6. Schemat układu detekcji zapadu napięcia i generacji napięć kompensujących w układzie DVR z PM (rys. 2a)

Tab. 1 Parametry modelu symulacyjnego

Parametr Systemu	Oznaczenie	Wartość	Parametr transformatora	Oznaczenie	Wartość
Napięcie zasilania	U_S	400 V	Moc znamionowa	S_N	10 kVA
Impedancja źródła	Z_S	$j0.04 \Omega$	Napięcie strony pierwotnej	U_{pri}	400 V
Moc obciążenia	S_L	2 kW	Napięcie strony wtórnej	U_{sec}	400 V
Impedancja obciążenia	Z_L	$(80+j0) \Omega$	Indukcyjność rozproszenia	$L_{leakage}$	0.76 mH
Częstotliwość PWM	f_{sw}	10 kHz	Rezystancja uzwojeń	R_L	120 m Ω
Zapad napięcia	$ U_D $	280 V (0.7 pu)	Indukcyjność mag.	L_{mag}	314 mH
Czas zapadu	t_D	100 ms	Rezystancja strat w żelazie	R_{fe}	359 Ω
Zmiana fazy podczas zapadu	φ_D	25°			

Na rysunkach 7 oraz 8 zostały przedstawione wstępne wyniki badań symulacyjnych układy DVR z zastosowaniem PM pracującego w konfiguracji liniowego DVR (rys. 2a). Rysunek 7 ilustruje działanie układu DVR ze sterowaniem typu „pre-fault”. Wówczas sygnały kompensujące są generowane z uwzględnieniem przesunięcia fazowego napięć przed wystąpieniem zapadu. W układzie pętli synchronizacji fazowej PLL (rys. 6) musi być zapamiętana informacja o częstotliwości i fazie napięcia sieci przed wystąpieniem zapadu. W celu kompensacji zapadu, dla prezentowanego przypadku, potrzebne jest wygenerowanie napięcia o amplitudzie około 118 V. Wartość zadaną amplitudy tego

napięcia definiuje składowa u_{dref} układu detekcji zapadu (rys. 7). Napięcie obciążenia u_L po kompensacji, które jest sumą napięcia sieci u_S oraz napięcia kompensującego u_C ma stałą wartość. Widoczne są niewielkie zniekształcenia w chwilach wystąpienia i zaniku zapadu napięcia. Wynikają one z szybkości działania algorytmu identyfikacji zapadu oraz z opóźnień czasowych przekształtnika matrycowego i transformatora sprzęgającego.

Rysunek 8 ilustruje działanie układu DVR ze sterowaniem typu „in-phase”. Wówczas kompensowana jest tylko zmiana amplitudy napięcia obciążenia. Amplituda napięcia kompensującego jest mniejsza niż dla kompensacji typu „pre-fault” i wynosi około 96 V. Widoczne są znacznie większe zniekształcenia w chwilach wystąpienia i zaniku zapadu napięcia, wynikające głównie z różnicy przesunięcia fazowego przed i po zapadzie.

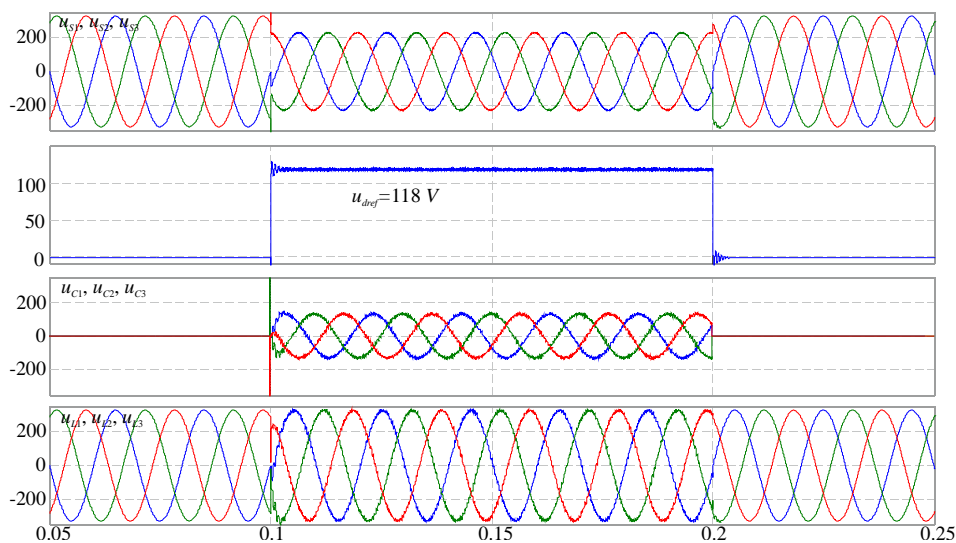


Fig. 6. Przykładowe przebiegi symulacyjne systemu DVR z PM dla sterowanie typu „pre-fault”

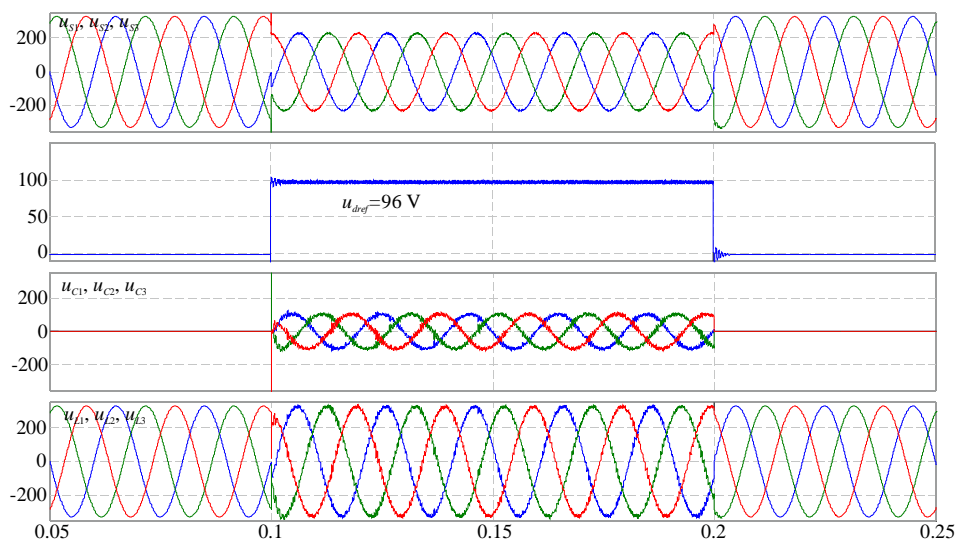


Fig. 7. Przykładowe przebiegi symulacyjne systemu DVR z PM dla sterowanie typu „in-phase”

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Podsumowanie

W artykule zostały wskazane podstawowe konfiguracje pracy układów DVR z bezpośrednim przekształtnikiem matrycowy, który w swojej strukturze nie posiada magazynu energii typu DC. Brak tego magazynu jest korzystny pod względem ceny, gabarytów oraz niezawodności systemu, jednakże może niekorzystnie wpływać na działanie całego systemu. Dlatego konieczne są dalsze szczegółowe badania wyznaczające zakresy kompensacji oraz wpływ takich układów na sieć elektroenergetyczną. Należy wówczas uwzględnić parametry sieci elektroenergetycznej, odbiorów oraz szczegółowe modele generatorów napięcia. Ponadto należy rozpatrzyć działanie DVR z PM dla niesymetrycznych zapadów napięcia.

W artykule zaprezentowano wstępne wyniki badań symulacyjnych dla dwóch rodzajów kompensacji typu „pre-fault” oraz „in-phase”. Uzyskane wyniki wskazują, że możliwe jest zastosowanie PM w układach kompensacji zapadów napięcia. Przekształtnik matrycowy umożliwia generację napięć kompensujących z bardzo dobrymi właściwościami zarówno w stanach statycznych oraz dynamicznych.

Literatura

1. Strzelecki R., Wojciechowski D., Benysek G. Układy dynamicznego odtwarzania napięcia. Zastosowanie i właściwości. Przegląd Elektrotechniczny, 2008, nr 2, 36-40.
2. Nielsen, J.G.; Blaabjerg, F., A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers, IEEE Trans. Ind.y Applications, Vol. 41, no.5, pp.1272-1280, Sept.-Oct. 2005.
3. Vilathgamuwa, D.M.; Wijekoon, H. M.; Choi, S.S., Interline dynamic voltage restorer: a novel and economical approach for multilene power quality compensation, IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 40, no.6, pp.1678-1685, Nov.-Dec. 2004.
4. Casadei D, Serra G., Tani A., Zarri L., A review on matrix converters. Przegląd Elektrotechniczny 2006, nr. 2, 15–25.
5. Lozano J.M, Ramirez J.M., Correa R.E., A novel dynamic voltage restorer based on matrix converters,” in Proc. MEPS 2010, Wrocław, Poland, 2010.
6. Garcia-Vite, P.M.; Mancilla-David, F.; Ramirez, J.M., Per-sequence vector-switching matrix converter modules for voltage regulation, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, no.12, pp.5411-5421, Dec. 2013.
7. Bingsen W.; Venkataramanan, G., Dynamic voltage restorer utilizing a matrix converter and flywheel energy storage, IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 45, no.1, pp.222-231, Jan.-feb. 2009.
8. Babaei, E.; Kangarlu, M.F.; Sabahi, M., Mitigation of voltage disturbances using dynamic voltage restorer based on direct converters, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 25, no.4, pp.2676-2683, Oct. 2010.
9. Abardeh, M.H.; Ghazi, R., A new configuration for dynamic voltage restorer based-on matrix converter, Universities Power Engineering Conference, UPEC 2010, Cardiff, Wales, pp.1-6, 2010.
10. A. Shabanpour, A. R. Seifi, Comparative studies of different control strategies of a dynamic voltage restorer based on matrix converter, Advances in Power Electronics, Sept 2012.
11. J. W. Kolar, T. Friedli, J. Rodriguez, P. W. Wheeler. Review of three-phase PWM AC–AC converter topologies, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 58, no.11, pp. 4988–5006, Nov. 2011.

Autorzy: dr inż. Paweł Szcześniak; Instytut Inżynierii Elektrycznej, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, e-mail: p.szczesniak@iee.uz.zgora.pl