

Autoreferat rozprawy doktorskiej

ZASTOSOWANIE SZEREGOWYCH ENERGETYCZNYCH FILTRÓW AKTYWNYCH DO POPRAWY JAKOŚCI DOSTAWY ENERGII ELEKTRYCZNEJ

mgr inż. Krzysztof Piątek

PROMOTOR: dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka, prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza, WEAIiE

RECENZENCI: dr hab. inż. Irena Wasiak, prof. PŁ – Politechnika Łódzka
dr hab. inż. Andrzej Senderski, prof. AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza, WEAIiE

W rozprawie doktorskiej autor zaprezentował koncepcję i badania szeregowego filtra aktywnego kompensującego równocześnie kilka zaburzeń napięcia zasilającego. Potrzeba stosowania takiego układu wynika z konieczności ochrony odbiorników wrażliwych na zaburzenia napięcia. Układ dedykowany jest do instalacji w sieci trójfazowej trójprzewodowej, lub czteroprzewodowej na poziomie niskiego, lub średniego napięcia. Rozważany w pracy układ zbudowany jest w oparciu o 3 jednofazowe falowniki napięcia połączone wspólną stroną prądu stałego, natomiast sprzężenie z siecią realizowane jest przez 3 jednofazowe transformatory dodawcze. W rozprawie przedstawiono wyniki symulacji komputerowych wykonanych w pakiecie Matlab/Simulink oraz wyniki eksperymentalne pracy modelu laboratoryjnego. Badania symulacyjne dotyczyły sprawdzenia koncepcji sterowania układem szeregowym w oparciu o strategię krokową w wyprzedzeniu fazy (ang. *phase advance strategy*, PAS) umożliwiającą kontrolę wymiany energii między układem szeregowym a siecią i odbiornikiem i jej minimalizację. Wyprzedzenie fazy (rozsunięcie wskazów napięcia zasilania i odbiornika) wyznaczane jest na podstawie pomiaru napięcia DC. Jako regulator napięcia falownika zastosowano regulatory proporcjonalne wykorzystujące trzy wielkości wejściowe: napięcie zasilania i odbiornika, oraz prąd kondensatora filtra częstotliwości łączeniowej. Dodatkowo w celu zmniejszenia liczby przetworników pomiarowych wykorzystano estymator prądu kondensatora, co umożliwiło zbudowanie układu regulacji wykorzystującego 7 przetworników napięciowych. Model laboratoryjny zbudowano przy wykorzystaniu systemu szybkiego prototypowania dSPACE, wytwarzającego impulsy sterujące dla tranzystorów zawartych w inteligentnych modułach mocy. Model laboratoryjny przystosowano do pracy z trójfazowym odbiornikiem o mocy 3 kVA i napięciu znamionowym 230/400 V.

Cel i zakres pracy

Celem rozprawy doktorskiej było zaproponowanie struktury i sterowania szeregowym układem aktywnym kompensującym równocześnie kilka zaburzeń napięcia zasilającego. Potrzeba stosowania tego rodzaju układów wynika z konieczności dostarczenia napięcia o odpowiednich parametrach w celu zasilania urządzeń wrażliwych na jakość dostarczanej energii elektrycznej. Jakość dostawy energii elektrycznej rozumiana jako zachowanie parametrów napięcia zasilającego stała się ważnym tematem prac w dziedzinie elektrotechniki. Przyczyniło się do tego rozpowszechnienie urządzeń wprowadzających zaburzenia napięcia i rosnące koszty niedotrzymania jakości napięcia zasilającego. Wpływ zaburzeń napięcia na procesy przemysłowe jest omawiany w różnych publikacjach, gdzie badane są również progi odporności konkretnych urządzeń. Efekt tych badań pozwala stwierdzić, że istnieje bardzo duża grupa urządzeń, których tolerancja na zmiany wartości skutecznej napięcia zasilającego jest bardzo mała np. napędy elektryczne zasilane z pośrednich przemienników

częstotliwości. Jedną ze strategii postępowania jest ochrona wrażliwego odbiornika, lub grupy odbiorników układem zapewniającym wymaganą jakość zasilania. Jednym z rozwiązań technicznych jest zastosowanie w tym celu układu szeregowego, włączonego pomiędzy sieć zasilającą i chroniony odbiornik, aktywnie kształtującego wyjściowy przebieg napięcia, zbudowanego w oparciu o falownik napięcia. Z pośród układów aktywnych układy łączone szeregowo charakteryzują się mniejszą mocą w stosunku do innych rozwiązań, gdyż falownik może być wymiarowany jedynie na część mocy odbiornika. Szeregowo układy aktywne są również najbardziej ekonomicznym rozwiązaniem jeżeli chodzi o kompensację zapadów napięcia. Wadą połączenia szeregowego jest fakt przewodzenia całego prądu odbiornika, co powoduje konieczność zabezpieczenia takiego układu przed zwarciami w odbiorniku i przerwami w zasilaniu.

Dotychczasowe praktyczne zastosowania układów szeregowych koncentrowały się na kompensacji zapadów napięcia. Fakt ten miał swoje ekonomiczne uzasadnienie –

zapady napięcia są jednym z głównych czynników powodujących wymierne straty finansowe np. wynikające z zatrzymania produkcji bądź zniszczenia półproduktów. Układ szeregowy, zwany w tym zastosowaniu dynamicznym stabilizatorem napięcia (ang. *dynamic voltage restorer*, DVR) wykrywał wystąpienie zapadu przez detekcję obniżenia wartości skutecznej poniżej wartości progowej, a następnie wytwarzał napięcie dodawcze tak, aby suma napięć: dodawczego i sieci zasilającej mieściła się w granicy tolerancji chronionych odbiorników.

W pracy opisano wyniki badań szeregowego układu aktywnego kompensującego równocześnie kilka zaburzeń jak: zapady i wzrosty, odkształcenie, asymetria, oraz wahania wartości skutecznej napięcia. Topologia układu szeregowego oparta na szeregowym źródle napięcia predysponuje go do kompensacji wymienionych zaburzeń. W pracy postawiono następującą tezę:

W oparciu o topologię aktywnego układu szeregowego istnieje możliwość zbudowania dynamicznego stabilizatora napięcia przeznaczonego do równoczesnej kompensacji kilku zaburzeń napięcia.

Układ jest przeznaczony do poprawy jakości dostawy energii elektrycznej w sieciach średniego i niskiego napięcia o małej mocy zwarciowej. Podstawowym celem jego działania jest zagwarantowanie poprawnych parametrów napięciowych dostarczanej energii elektrycznej, w szczególności:

1. kompensacja zapadów i wzrostów napięcia,
2. stabilizacja i symetryzacja napięcia,
3. kompensacja wyższych harmonicznych napięcia.

Układ nie zapewnia bezprzerwowego zasilania, czyli nie ma funkcjonalności UPS. Elementem tezy jest również znalezienie korzystnej struktury układu sterowania zapewniającej realizację wymienionych funkcji i cechującej się małą liczbą koniecznych sygnałów pomiarowych. Badania przebiegały w dwóch etapach:

1. badania symulacyjne z wykorzystaniem pakietu Matlab/Simulink – koncentrowały się na analizie własności układu sterowania,
2. badania eksperymentalne – implementacja regulatora za pomocą układu dSPACE i badanie fizycznego modelu laboratoryjnego.

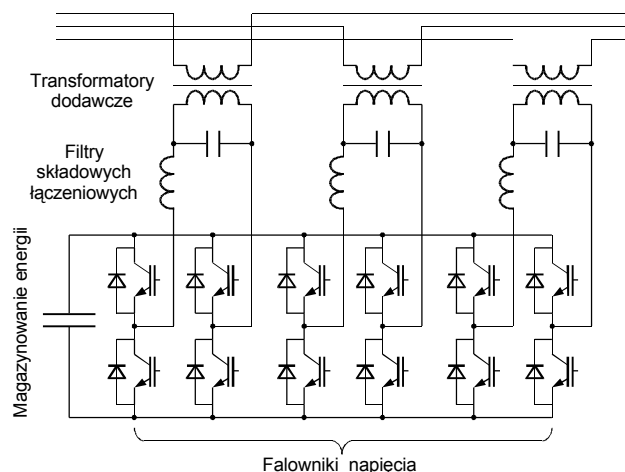
Budowa układu szeregowego

Do realizacji praktycznej wybrano strukturę zawierającą:

1. trzy jednofazowe falowniki napięcia – wytwarzanie napięcia dodawczego niezależnie w każdej fazie,
2. filtry biernie LC dla każdego falownika – filtracja częstotliwości łączeniowej,
3. wspólną stronę prądu stałego falowników – ułatwia zarządzanie wymianą energii,
4. trzy jednofazowe transformatory dodawcze – separacja galwaniczna, umożliwia stosowanie wspólnej strony prądu stałego.

Schemat blokowy rozważanego układu przedstawiony jest na rysunku 1.

Taka struktura układu jest najbardziej korzystna gdyż umożliwia:

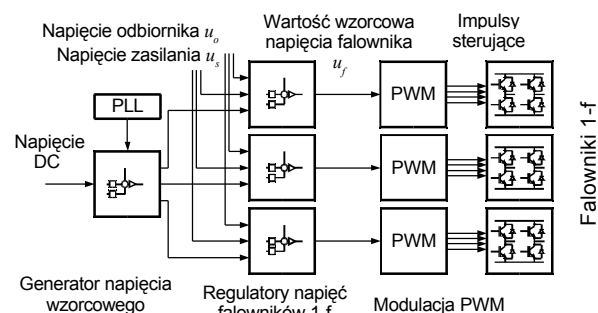


Rys. 1: Schemat układu szeregowego.

1. wytworzenie napięć trójfazowych o składowej symetrycznej zerowej kolejności wirowania, co z kolei umożliwia kompensację tej składowej powstałej w wyniku asymetrii statycznej i zapadów asymetrycznych w sieci czteroprzewodowej,
2. podział układu sterowania na trzy układy z których każdy wyznacza napięcie wzorcowe i wytwarza wzorzec łączeniowy dla łączników falownika w danej fazie niezależnie od pozostałych,
3. zwiększenie możliwości zarządzania wymianą energii między układem szeregowym, siecią zasilającą i odbiornikiem, co daje możliwość m. in. większego poboru energii z fazy o najmniej zaburzonym napięciu zasilającym wydłużając w ten sposób maksymalny czas kompensacji zapadów asymetrycznych

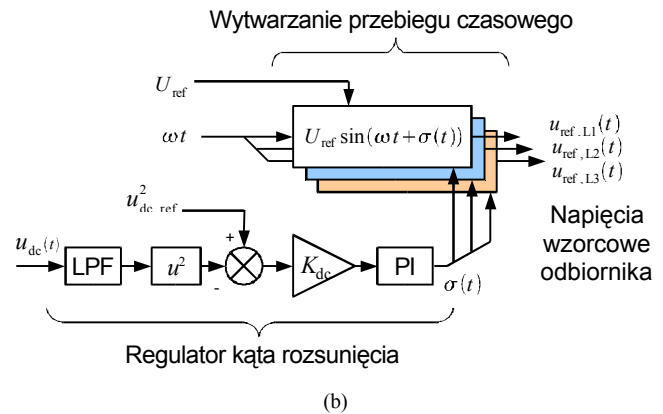
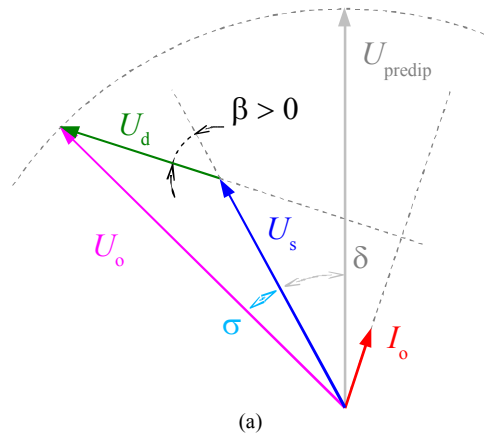
Przedstawione zalety znalazły potwierdzenie w trakcie badań symulacyjnych. Inną korzystną cechą układu jest zdolność do samoladowania, czyli naładowania kondensatorów strony DC bez pomocy dodatkowych układów prostownikowych.

Przyjęta struktura układu sterowania składa się z trzech bloków – rysunek 2:



Rys. 2: Schemat sterowania układem szeregowym.

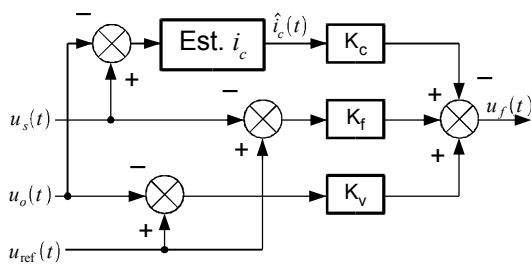
1. Generator napięcia wzorcowego – wytwarza wzorcowe napięcie odbiornika realizując strategię dodawania napięcia z wyprzedzeniem fazy (ang. *phase advance strategy*, PAS) – rysunek 3a. Idea tej strategii polega na takim rozsunieciu wskazów napięć zasilania i odbiornika, aby moc czynna układu szeregowego była minimalna, lub równa zero. Dodatkowo generator realizuje strategię PAS krokowo tj. stopniowo zmieniając kąt rozsunienia, w celu uniknięcia gwałtownej zmiany kąta fazowego napięcia odbiornika. Zmiana tego kąta zależy od wartości



Rys. 3: Schemat sterowania układem szeregowym: strategia dodawania napięcia z wyprzedzeniem fazy (a); schemat blokowy generatora napięć wzorcowych (b). U_d – napięcie dodawcze, U_o – napięcie odbiornika, U_s – napięcie zasilania, I_o – prąd odbiornika, β – kąt wyprzedzenia, U_{predip} – napięcie zasilania z chwili przed wystąpieniem zaburzenia (zapadu), σ – kąt rozsunienia, δ – zmiana kąta fazowego napięcia zasilania w wyniku zaburzenia (zapadu), $u_{dc}(t)$ – napięcie DC, $u_{dc,ref}$ – napięcie wzorcowe DC, U_{ref} – amplituda wzorcowa napięcia odbiornika.

napięcia DC tak, aby redukcja energii kondensatorów spowodowała rozsuniecie wskazów napięć: dodawczego i odbiornika. W konsekwencji falowniki wytwarzają napięcie dodawcze o przesunięciu fazowym względem prądu odbiornika skutkującym mniejszą mocą czynną. Generator wykorzystuje blok PI i stabilizuje napięcie DC. Schemat generatora przedstawiono na rysunku 3b.

- Regulator napięcia falownika – osobne układy dla każdego falownika wytwarzające wzorce napięcia z uwzględnieniem dynamiki wprowadzanej przez filtry częstotliwości łączeniowej LC. Zaimplementowano regulatory posiadające trzy pętle sprzężeń: od napięć odbiornika i zasilania, oraz od prądu kondensatora filtru LC. W celu zmniejszenia liczby koniecznych przekładników pomiarowych ten ostatni sygnał otrzymywany jest z estymatora. Schemat regulatora napięcia dla jednej fazy przedstawiony jest na rysunku 4.



Rys. 4: Schemat regulatora napięcia falownika.

- Wytworzenie impulsów sterujących łączniki falowników – zaimplementowano modulację szerokości impulsów (PWM) z piłokształtnym przebiegiem nośnym.

Układ sterowania wymaga pomiaru 7 sygnałów napięciowych (dla układu trójfazowego). Działanie układu szeregowego sprowadza się do wytworzenia takiej wartości napięcia dodawczego, aby jego suma z napięciem odbiornika śledziła zadany przebieg wzorcowy w każdej fazie.

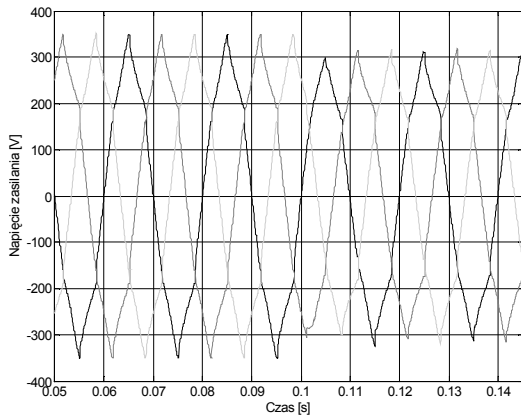
Wyniki badań symulacyjnych

Przedstawioną strukturę części energoelektronicznej i układu sterowania poddano badaniom symulacyjnym. Wykorzystano pakiet Matlab/Simulink (wersja 2007b) oraz bibliotekę *SimPowerSystem*, zawierającą modele elementów elektrycznych i energoelektronicznych. Modele symulacyjne budowane były pod kątem sprawdzenia zaproponowanego sterowania układu szeregowego w różnych stanach pracy sieci.

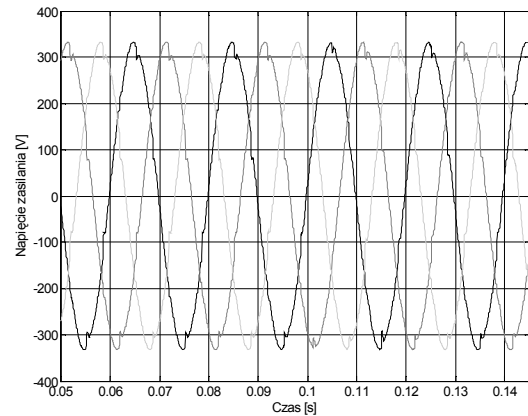
Na rysunku 5 zaprezentowano przykładowe wyniki badań symulacyjnych równoczesnej kompensacji zapadu i odkształcenia napięcia w wspólnym punkcie przyłączenia (PWP). Odształcenie napięcia w PWP jest wynikiem przepływu odkształconego prądu przez prostownik niesterowany, natomiast zapad napięcia wywołany jest rozruchem silnika indukcyjnego. Przebiegi napięć w momencie wystąpienia zapadu (początek rozruchu silnika) przedstawione są na rysunku 5a i 5b. Napięcie zasilania jest odkształcone w wyniku pracy prostownika, dodatkowo w chwili $t=100$ ms przeprowadzony zostaje rozruch silnika, powodujący trójfazowy spadek wartości skutecznej napięcia do ok. 198 V (86% U_N) trwający ok. 150 ms. Napięcie odbiornika ma utrzymaną wartość skuteczną na poziomie znamionowym oraz wykazuje znacznie mniejsze odkształcenie. Analiza harmoniczných obu napięć przedstawiona jest na rysunku 6a. Na rysunku 6b przedstawiono napięcie strony pośredniej DC oraz przebieg zmiany kąta rozsunienia przez cały okres trwania kompensacji zapadu.

Wyniki badań laboratoryjnych

W celu przeprowadzenia testów w warunkach laboratoryjnych zbudowano model fizyczny układu szeregowego o opisaną wyżej strukturze. Model laboratoryjny przystosowany był do pracy z odbiornikiem trójfazowym o mocy 3 kVA. Falowniki napięcia zostały wykonane w oparciu o inteligentne moduły mocy IPM o maksymalnym prądzie przewodzenia 20 A i maksymalnym napięciu blokowania 600 V. Jako magazyn energii wykorzystano baterię kondensatorów o pojemności 5 mF.

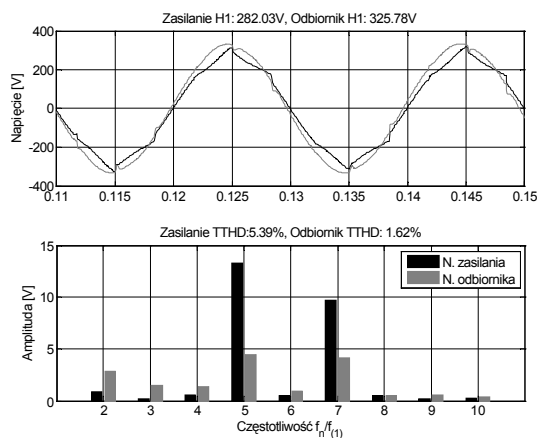


(a)

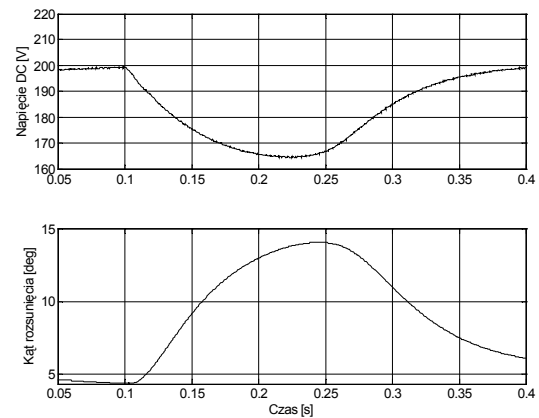


(b)

Rys. 5. Przebiegi wartości chwilowej napięcia podczas zapadu – moment rozruchu silnika indukcyjnego (a) i napięcie zasilania (b).



(a)



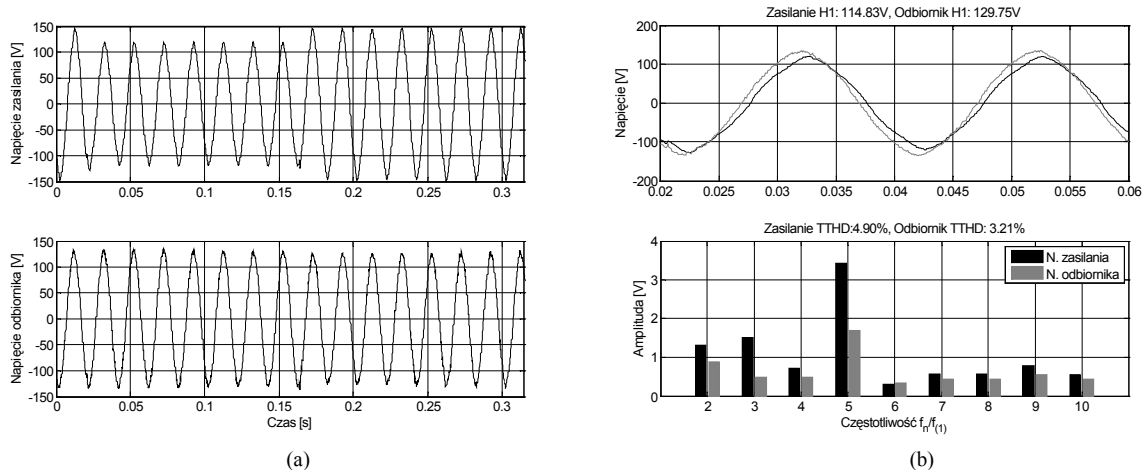
(b)

Rys. 6. Porównanie odkształcenia napięć zasilania i odbiornika (a); napięcie DC – przebieg górny i kąt rozsunęcia σ – przebieg dolny (b).

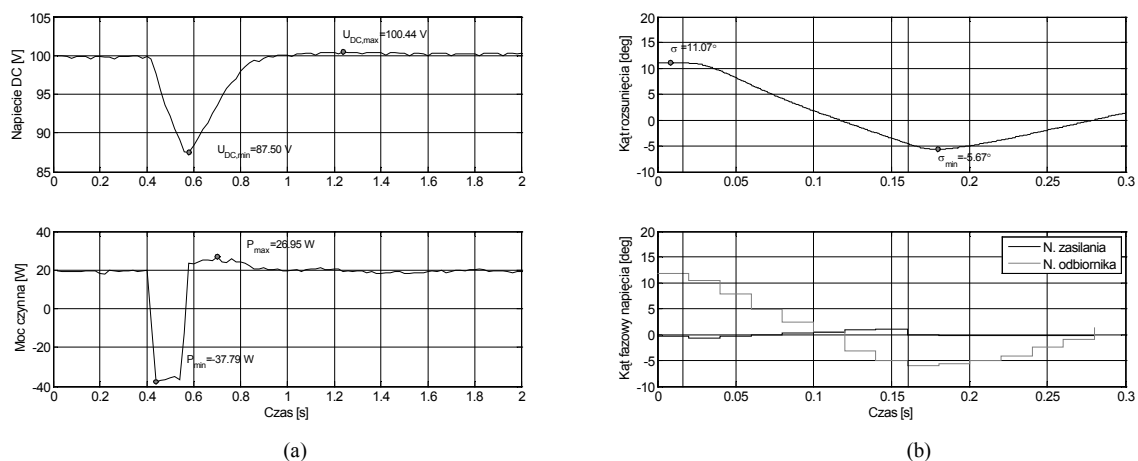
Pojedynczy moduł jest układem scalonym zawierającym tranzystory IGBT wraz z diodami i układami sterowania w topologii trójgałęziowego falownika napięcia. Ze względu na badawczy charakter stanowiska układ zasilono z dodatkowego transformatora wielouwojowego tak, aby pracował przy napięciu obniżonym do 100 V. Zastosowano symetryczny odbiornik liniowy o $R=33 \Omega$ i $L=5$ mH. Stanowisko laboratoryjne umożliwia wytwarzanie zapadów napięcia przez bezprzerwowe przełączenie zasilania modelu laboratoryjnego na zacsep transformatora pomocniczego o niższym napięciu znamionowym.

Układ sterowania zaimplementowano wykorzystując system szybkiego prototypowania dSPACE, model DS1103. Jest to urządzenie zawierające procesor Power PC 750GX, oraz m.in. 20 analogowych 16. bitowych wejść i 32 wyjścia binarne. Układ dSPACE współpracuje bezpośrednio z pakietem Matlab umożliwiając automatyczną kompilację i uruchomienie modeli zbudowanych w Simulinku. Dodatkowo dostępne oprogramowanie umożliwia stworzenie graficznego interfejsu użytkownika umożliwiającego inicjalizację, obsługę i podgląd wyników działania układu dSPACE.

Na kolejnych rysunkach zaprezentowano wyniki kompensacji jednofazowego zapadu napięcia. Na rysunku 7a przedstawiono przebiegi napięcia zasilania i odbiornika w fazie L1. Zapad napięcia zaznaczono pionowymi liniami. Układ szeregowy utrzymuje amplitudę napięcia odbiornika na poziomie 127 V przy zadanej wartości wzorcowej 131 V. Rysunek 7b pokazuje zdolność do kompensacji odkształcenia napięcia. W napięciu zasilania dominuje 3. i 5. harmoniczna (wynika z warunków zasilania w laboratorium) – w widmie napięcia odbiornika wartość amplitudy tych harmonicznych jest mniejsza. Na rysunku 8a przedstawiono przebiegi napięcia DC i mocy czynnej układu szeregowego. Ujemna wartość mocy -37.79 W odpowiada zasilaniu odbiornika, co ma miejsce podczas trwania zapadu napięcia – napięcie DC maleje z poziomu 100V do ok. 87V. Dodatnia wartość mocy maks. 29.95W oznacza ładowanie kondensatorów DC do wartości wzorcowej 100V. Wartość ustalona ok. 20W odpowiada stratom mocy w modelu laboratoryjnym układu szeregowego. Na rysunku 8b przedstawiono przebieg kąta rozsunęcia σ i kąty fazowe napięć odbiornika i zasilania zmierzone z interwałem 20 ms – różnica kątów zmierzonych odpowiada wartości kąta rozsunęcia, co potwierdza realizację strategii krokowej PAS.



Rys. 7. Kompensacja zapadu napięcia w modelu laboratoryjnym: przebiegi napięć fazy L1: zasilania – rys. górny oraz odbiornika – rys. dolny (a); porównanie zawartości harmonicznych i odkształcenia napięć zasilania i odbiornika (b).



Rys. 8. Kompensacja zapadu napięcia w modelu laboratoryjnym: przebieg napięcia DC – rys. górny, oraz mocy czynnej układu szeregowego – rys. dolny (a); przebieg zmian kąta rozsunienia σ (wartość zarejestrowana przez dSPACE) – rys. górny, oraz zmierzone wartości kątów przesunięcia fazowego napięć zasilania i odbiornika – rys. dolny (b).

Podsumowanie

Przedstawioną w pracy doktorskiej tezę udało się udowodnić. W szczególności opracowano model i zaimplementowano regulator zapewniający realizację wymienionych funkcji kompensacyjnych charakteryzujący się: zastosowaniem strategii PAS realizowanej krokowo, stabilizacją napięcia DC falownika (w tym ładowanie początkowe), wykorzystaniem pomiaru napięć: zasilania i odbiornika, oraz napięcia DC falownika (łącznie 7 przetworników pomiarowych dla układu trójfazowego), zastosowaniem estymatora do obliczenia wartości prądu kondensatora filtru LC. Opracowane modele: symulacyjny i laboratoryjny kompensowały równocześnie kilka zaburzeń napięcia w szczególności symetryczne i asymetryczne zapady napięcia, stabilizowały wartość skuteczną, symetryzowały i kompensowały odkształcenie napięcia zasilania.

Realizacja przedstawionej wyżej tezy wymagała przeprowadzenia następujących prac:

1. opracowania regulatora napięcia falownika z trzema pętłami sprzężeń z wykorzystaniem estymatora prądu kondensatora filtru LC w celu zmniejszenia liczby pomiarów w obwodzie rzeczywistym,

2. opracowania i implementacji generatora wzorcowego napięcia odbiornika w oparciu o strategię PAS realizowaną krokowo, w którym kąt rozsunienia wskazów napięć: zasilania i odbiornika jest funkcją poziomu energii kondensatorów DC (napięcia DC),
3. wykonania modelu symulacyjnego i laboratoryjnego układu szeregowego kompensującego równocześnie zapad, asymetrię i odkształcenie napięcia zasilania.

Publikacje doktoranta

- [1] Krzysztof Piątek: Dynamic Voltage Restorer Based On A Three-Phase Inverter With Hysteresis Current Controller Proc. of Compatibility in Power Electronics CPE Gdansk 28-30 May 2003.
- [2] Krzysztof Piątek: Sliding mode control of DVR with minimised energy injection, Proc. of 11th European Conference on Power Electronics and Applications, 11 – 14 September 2005, Dresden, Germany.
- [3] Z. Hanzelka, W. Łoziak, M. Mróz, K. Piątek, *et al.*: Parametry jakościowe napięcia zasilającego 15kV po przyłączeniu farm wiatrowych – analiza przypadku; Materiały 3. Konferencji Jakość Energii Elektrycznej w

- Sieciach Elektroenergetycznych w Polsce; 08-09 listopada 2005, Wisła.
- [4] Krzysztof Piątek: A three phase DVR with progressive phase advance injection strategy, Proc. of 12th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP2006 1-5 Oct. 2006, Cascais, Portugal.
- [5] Zbigniew Hanzelka, Maciej Mróz, Ryszard Pawelek, Krzysztof Piątek: Quality parameters of 15 kV supply voltage after connection of wind farms – case study, Proc. of 12th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP2006 1-5 Oct. 2006, Cascais, Portugal.
- [6] Krzysztof Piątek: A new approach of DVR control with minimised energy injection, Proc. of 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC2006 30 Aug. - 1 Sep. 2006, Portoroz, Slovenia.
- [7] Krzysztof Piątek: Series voltage restoration under distorted supply condition Proc. of IX Conference-Seminar; International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation ISNCC 2008, 10-13 June 2008, Łagów, Poland.
- [8] Krzysztof Piątek: Series voltage restoration under distorted supply condition Przegląd Elektrotechniczny, nr 1, rok 2009.
- [9] Krzysztof Piątek: Laboratory Tests of a Dynamic Voltage Restorer Model Using Estimation of the Filter Capacitor Current, Proc. of 10th Jubilee International Conference Electrical Power Quality and Utilisation, 15-17 September, Lodz, Poland.
- [10] Kowal, K. Piątek, *et al.*: Koszty złej jakości energii elektrycznej – analiza przypadku, Materiały Międzynarodowego Kongresu Górnictwa Rud Miedzi, 24-26 września 2009, Lubin.