

Filtr aktywny z dodatkowym zasobnikiem energii do kompensacji wahań moc czynnej – bilans energetyczny oraz praktyczna implementacja – część 2

Streszczenie. W artykule przedstawiono jednofazowy filtr aktywny z zasobnikiem energii dwukierunkowym przekształtnikiem DC/DC, dedykowanym do kompensacji udarów mocy czynnej generowanych przez nieliniowe obciążenia o pracy przerywanej. Jako obiekt kompensacji użyto jednofazową zgrzewarkę punktową. Praca zawiera kompleksową analizę pracy urządzenia, która umożliwiła opracowanie aparatu matematycznego wykorzystanego do wymiarowania zasobnika. Wysoką skuteczność rozwiązania potwierdzono w wyniku badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych na zrealizowanym modelu laboratoryjnym urządzenia. W części 2 artykułu przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, oraz rezultaty eksperymentu.

Abstract. This paper presents a single-phase power filter with an energy storage bidirectional DC/DC converter. The device is dedicated to the compensation of active power surges generated by nonlinear loads characterized by intermittent operation. As a compensated and filtered object, the single-phase spot welding machine was assumed. The work contains a comprehensive analysis of the device's operation, which enabled the development of storage sizing methodology. The high efficiency of the solution was confirmed during simulation and experimental approach, on especially developed laboratory model. Part 2 of the article presents the results of simulation studies and the results of the experiment. (**An active power filter with energy storage for power surge compensation- energy balance and practical implementation – Part 2.**)

Słowa kluczowe: filtr aktywny, zasobnik energii, udary mocy czynnej, zgrzewarka punktowa, jakość energii elektrycznej.

Keywords: active power filter, energy storage, power surges, spot welders, power quality.

Rezultaty badań symulacyjnych

Badania układu przeprowadzono w środowisku Matlab & Simulink [1, 2]. Schemat blokowy układu wraz z naniesionym podziałem na sekcje przedstawiono rys. 1. Procedurę rozruchową inicjuje załączenie głównego przełącznika Main_Relay.

Celem nadrzędnym opracowanego modelu było, aby w jak największym stopniu odpowiadał on układowi rzeczywistemu, a zwłaszcza pracy docelowego sterownika, o skończonej częstotliwości taktowania. Uwzględniono m.in. opóźnienia wnoszone przez tory pomiarowe, wpływ czasów martwych realizowanych przez modulatory PWM, jak również szybkość (częstotliwość) z jaką pracuje układ sterowania i regulacji)

Sygnały pomiarowe wykorzystywane przez układ sterowania i regulacji w trakcie pracy modelu (U_{linii} , I_{linii} , U_F , U_S oraz I_S) są próbkowane synchronicznie względem przebiegu trójkątnego, zastosowanego do generacji sygnału PWM tranzystorów filtru, w chwili, gdy osiąga on wartość minimalną -0.99 lub maksymalną +0.99 (ang. double-update sampling) [3]. Wyzwalanie przetworników następuje za pomocą wygenerowanego w ten sposób sygnału wyzwalającego - SoC (ang. start of conversion).

Działanie takie (próbkowanie sygnałów) ma własności uśredniające, ponadto eliminuje możliwość pomiaru oraz dostarczenia do układu regulacji próbki, w trakcie pomiaru której mogło wystąpić zakłócenie, wywołane przełączeniem tranzystorów, zaburzające wartość rzeczywistą próbkowanego sygnału.

Częstotliwość przebiegu trójkątnego wynosi 10 kHz, podczas gdy cały model wykonuje się z krokiem 2 μ s (500 kHz), natomiast częstotliwość próbkowania sygnałów wynosi 2fsw (20 kHz).

Wybór chwili próbkowania (dostarczania sygnałów do układu regulacji) odpowiada w rzeczywistości pracy z przetwornikami A/D. Układy te wymagają zewnętrznego sygnału SoC, inicjującego przetwarzanie sygnałów doprowadzonych na wejście przetwornika. Przetworniki powinny przetwarzać sygnały z możliwie dużą częstotliwością, aby w przypadku przekroczenia

dopuszczalnych wartości mierzonych sygnałów, autonomiczny układ kontroli i zabezpieczeń mógł dostatecznie szybko zareagować.

W celu poprawy dokładności opracowanego modelu, pojemności C_F oraz C_S zbocznikowano elementami rezystancyjnymi. Ich zadaniem jest rozładowywanie energii zgromadzonej w pojemnościach po zakończeniu pracy przez układ (zabezpieczenie przeciwporażeniowe).

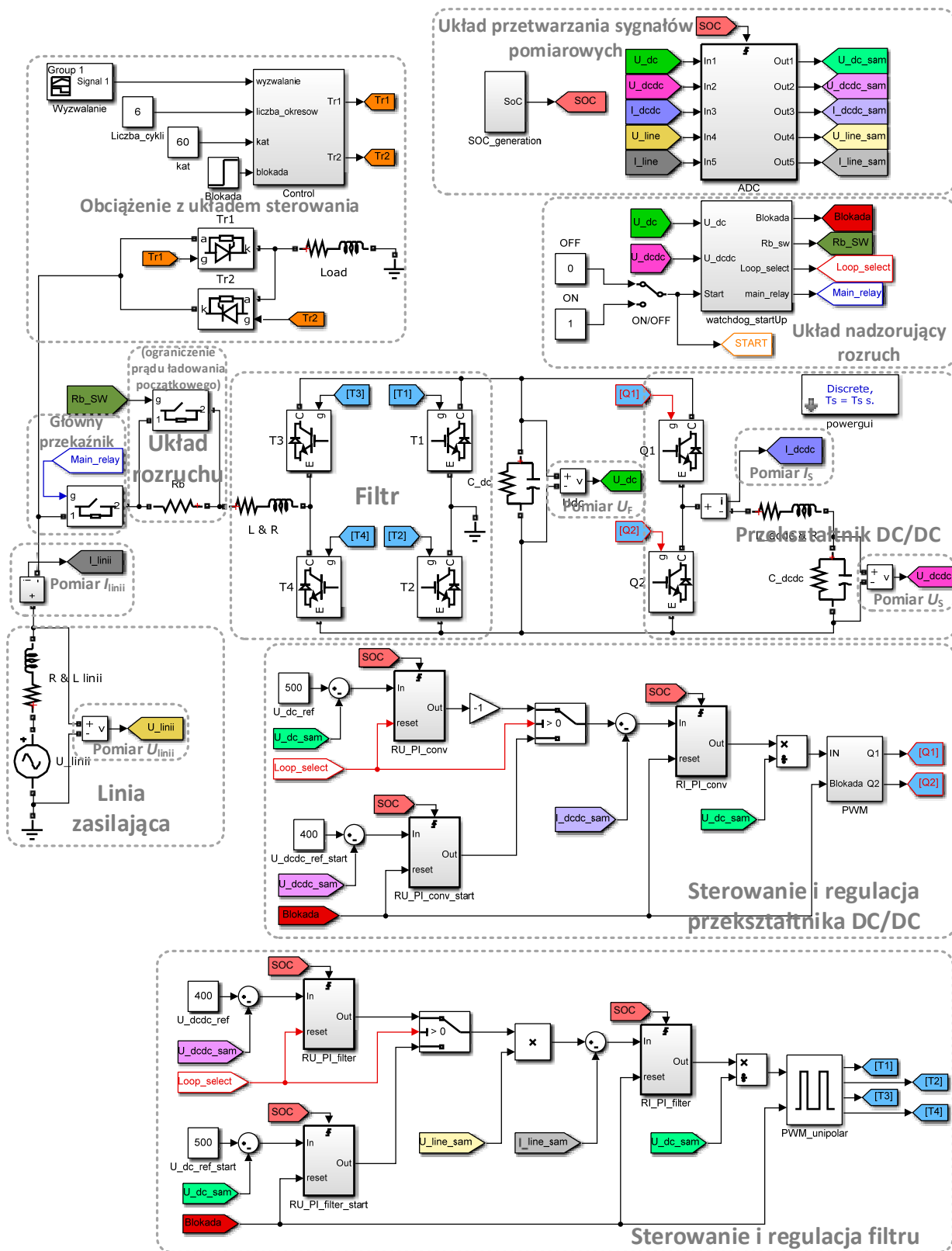
Wpływ na rozładowywanie pojemności (w przypadku układu rzeczywistego) mają również zastosowane pomiarowe przetworniki napięciowe typu LEM. Dla uzyskania maksymalnej dokładności wymagają one wymuszenia przepływu prądu o wartości 10 mA po stronie pierwotnej - dla założonej wartości napięcia znamionowego [4]. W trakcie normalnej pracy urządzenia, rezystancje są źródłem dodatkowych strat (zwiększając prąd upływu). W konsekwencji konieczna jest praca z większą wartością składowej aktywnej prądu, realizowanej przez filtr.

Na rys. 2 przedstawiono otrzymane w wyniku badań symulacyjnych przebiegi prądów linii zasilającej i przekształtnika (I_{linii} , I_S) oraz napięć obwodzie filtru i przekształtnika (U_F , U_S), zarejestrowanych podczas rozruchu opracowanego modelu układu. Start układu w chwili $t = 20$ ms. W dalszych rozważaniach proces rozruchu pominięto (układ już po czasie ok. 1,4 s uzyskuje pełną gotowość do pracy z obciążeniem).

W pierwszej fazie Rozruch(1/2) (rys. 2) następuje ładowanie kondensatora C_F poprzez diody w strukturze zastosowanych tranzystorów IGBT, a prąd linii jest w tym czasie ograniczony przez rezystor RB. Maksymalna wartość prądu nie przekracza w tym czasie wartości ok. 5,64 A (start układu w zerze napięcia linii zasilającej). W przypadku układu rzeczywistego chwila załączenia urządzenia ma charakter losowy W trakcie etapu Rozruch(2/2) napięcie na kondensatorze filtru C_F osiąga i jest stabilizowane na swoim poziomie referencyjnym wynoszącym 500 V. Prąd płynący z linii zasilającej ograniczono, przez nasycenie regulatora napięcia do poziomu ± 7 A. W tym samym czasie rozpoczyna się również praca przekształtnika DC/DC i ładowanie

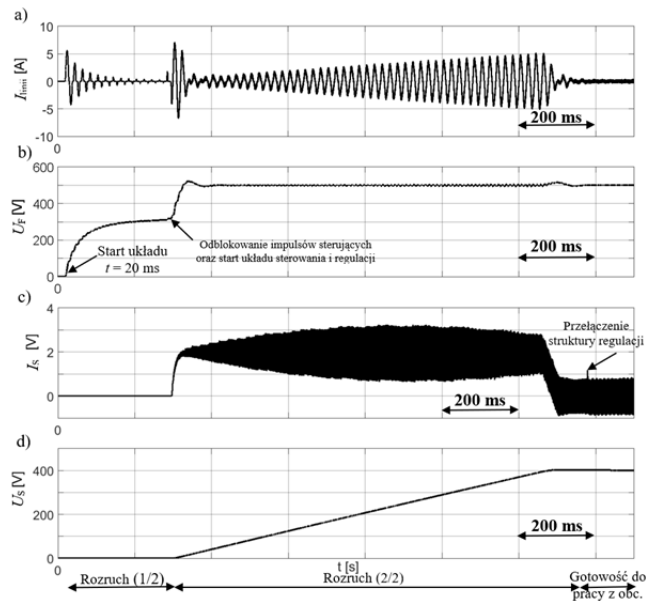
kondensatora C_S . W porównaniu z procesem ładowania kondensatora C_F , proces ładowania kondensatora C_S jest zdecydowanie wolniejszy, ze względu na wielokrotnie większą wartość pojemności C_S (prawie 12-krotnie większy

stosunek pojemności C_S/C_F). Prąd przekształtnika ograniczono do wartości nieprzekraczającej 2 A.

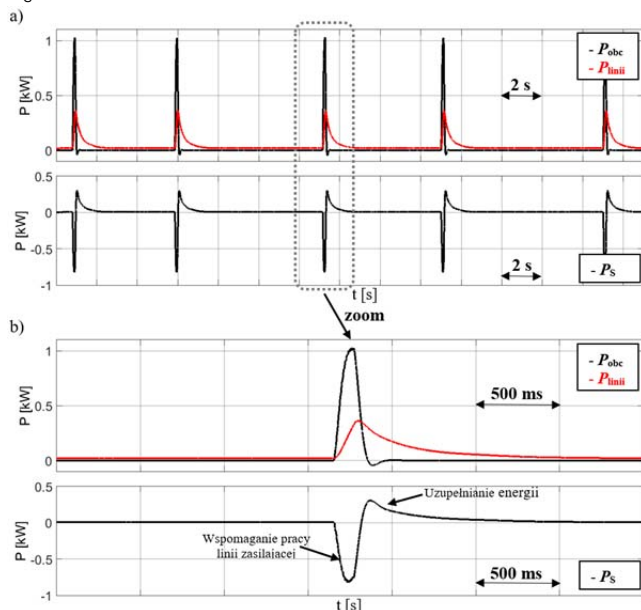


Rys. 1. Schemat blokowy układu zrealizowany w środowisku Matlab & Simulink z wyszczególnionym podziałem na sekcje w zależności od ich funkcjonalności (parametry modelu: częstotliwość z jaką wykonywany jest model - 500 kHz, częstotliwość z jaką wykonywany jest układ sterowania i regulacji - 20 kHz)

Wybór wartości maksymalnej prądu, z jakim podczas rozruchu pracuje przekształtnik DC/DC (wynikającej z ograniczenia regulatora), zapewnia iż napięcie na kondensatorze filtra C_F , będzie ze względu na wolny regulator napięcia filtra prawidłowo stabilizowane, a przebieg prądu linii odpowiednio kształtowany. Natomiast, wybór wartości prądu linii, generowanego przez filtr nie jest dla linii zasilającej źródłem negatywnych zjawisk (udarów mocy czynnej), do kompensacji których układ przewidziano. Przełączenie do docelowej struktury układu sterowania i regulacji następuje z opóźnieniem 100 ms względem chwili, gdy wartość napięcia U_S przekroczy 0.95 swojej wartości referencyjnej. Układ osiąga wtedy „Gotowość do pracy z obciążeniem”, a napięcia w układzie są stabilizowane na poziomie swoich wartości referencyjnych ($U_{F_ref} = 500$ V, $U_{S_ref} = 400$ V).



Rys. 2. Rozruch układu: a) przebieg prądu linii zasilającej I_{linii} ; b) napięcia w obwodzie pośredniczącym DC filtra U_f ; c) prądu w obwodzie przekształtnika I_s ; d) napięcia w obwodzie przekształtnika U_s



Rys. 3. Przebiegi mocy czynnej zarejestrowanej w wybranych punktach układu: linii zasilającej P_{linii} , obciążenia P_{obc} oraz obwodzie przekształtnika P_s , gdzie: a) przebiegi w szerokim horyzoncie czasowym (30 s); b) powiększenie przebiegów z rys. a) w chwili kompensacji obciążenia

Na rys. 3 przedstawiono pracę układu z obciążeniem, w trakcie której zarejestrowano przebiegi mocy średniej: linii zasilającej, obciążenia oraz w obwodzie przekształtnika DC/DC.

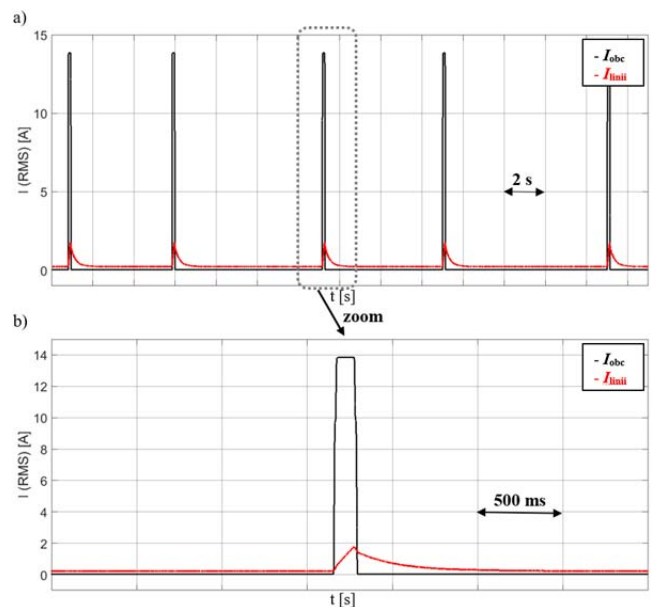
Maksymalna wartość średniej mocy czynnej obciążenia, wynosi ok. 1 kW. Załączone obciążenia następowało przypadkowo, na 6 okresów napięcia linii zasilającej, w odstępach nieprzekraczających 20 s, a minimalny czas między kolejnymi załączeniami wynosił 5 s (czas symulacji 30 s). Kąt opóźnienia załączenia tyrystorów w strukturze modelu zgrzewarki ($\alpha = 70^\circ$) dobrano tak, aby ograniczyć maksymalną wartość prądu obciążenia do 20 A. W trakcie dalszych badań sekwencja załączania obciążenia pozostała taka sama.

Podczas pracy układu moc obciążająca linię zasilającą uległa znacznemu obniżeniu, nie przekraczając w szczycie 0,37 kW (oznacza to aż 63% redukcję wartości szczytowej). W otrzymanym przebiegu mocy nie występują także znaczące wahania - udary, pochodzące od załączanego obciążenia.

Pomiaru mocy dokonano za pomocą operacji uśredniania przebiegu mocy chwilowej z wykorzystaniem filtra dolnoprzepustowego, drugiego rzędu o częstotliwości drgań własnych 10 Hz.

Przebiegi mocy P_s w obwodzie przekształtnika DC/DC (rys. 3) potwierdzają, iż załączenie obciążenia nie powoduje znaczącego zwiększenia mocy czynnej dostarczanej z linii zasilającej, a jedynie ubytek energii w obwodzie przekształtnika DC/DC, która po wyłączeniu obciążenia jest uzupełniana (rys. 3b). Oznacza to w praktyce brak konieczności dodatkowego pomiaru prądu odbiornika w celu oszacowania mocy obciążenia, stanowi to istotne uproszczenie podczas implementacji cyfrowej.

Zaprezentowany bilans mocy potwierdza wysoką skuteczność omawianego rozwiązania. Opracowany model filtra uwzględnia jedynie niewielkie straty przewodzenia na tyrystorach, wobec czego został on pominięty podczas analizy.



Rys. 4. Przebiegi wartości skutecznej prądu generowanego przez obciążenie I_{obc} oraz prądu linii zasilającej I_{linii} podczas działania układu filtra z zasobnikiem energii: a) w szerokim horyzoncie czasowym (30 s); b) powiększenie jednej z chwil załączenia i kompensacji obciążenia

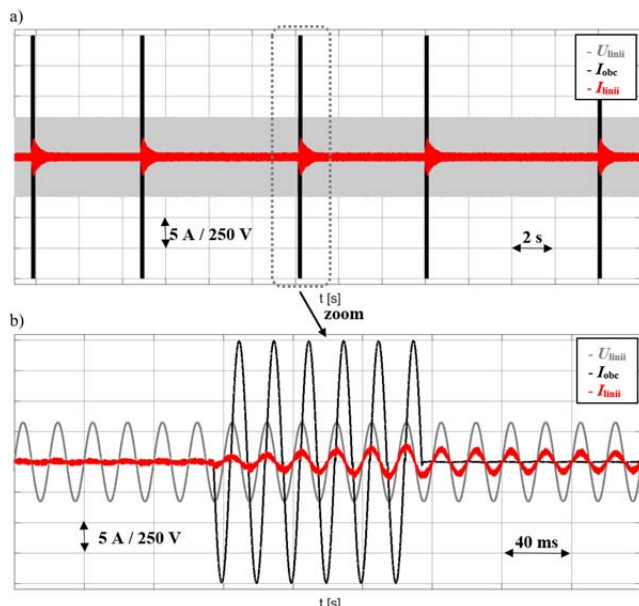
Potwierdzeniem skuteczności działania badanego układu są zaprezentowane na rys. 4 przebiegi wartości skutecznej prądów: wywołanego przez obciążenie (I_{obc})

oraz płynącego przez linię zasilającą (I_{linii}) podczas pracy filtru z zasobnikiem. Działanie układu ogranicza nagłe wzrosty wartości skutecznej prądu linii zasilającej spowodowane załączeniem obciążenia, co jest szczególnie widoczne na zamieszczonym w rys. 4b powiększeniu.

Wartość skuteczną sygnałów wyznaczono z wykorzystaniem zaimplementowanej w Matlab & Simulink funkcji (bloku) „True RMS” [5, 6].

Wartość skuteczną prądu wymuszanego przez załączany odbiornik (zgrzewarkę) wynosi ok. 14 A. Zastosowanie omawianego rozwiązania utrzymuje prąd na wielokrotnie niższym poziomie, nie przekraczającym 2 A. Oznacza to 7-krotną redukcję wartości prądu przepływającego przez linię zasilającą, przy przyjętych założeniach dotyczących częstotliwości włączania i czasu trwania pojedynczego zgrzewu oraz jego mocy, co było głównym założeniem podczas projektowania układu.

Układ zachował również funkcje filtru aktywnego. Potwierdzeniem tego są przebiegi wartości chwilowych prądu i napięcia linii zasilającej, podczas pracy układu w chwili załączenia obciążenia, przedstawione na rys. 5. Prąd linii ma charakter sinusoidalny i w fazie z napięciem linii, a załączenie obciążenia nie ma już znaczącego wpływu na zmianę jego wartości.



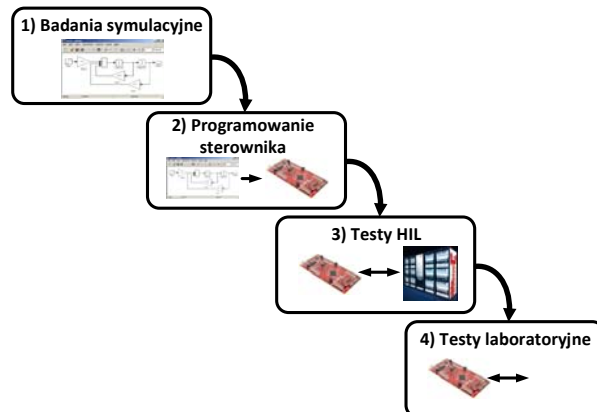
Rys. 5. Przebiegi prądu i napięcia linii zasilającej w chwili załączenia obciążenia, podczas pracy filtru aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii

Przeprowadzona w trakcie badań symulacyjnych weryfikacja działania układu, umożliwiła przejście do kolejnego etapu badań jaki było zaprogramowanie wybranego układu sterownika DSP (ang. Digital Signal Processor). Wykorzystano w tym celu automatyczną generację kodu „Model Based Design” programując układ DSP bezpośrednio z środowiska Matlab & Simulink, bez konieczności szczegółowej znajomości komend w języku obsługiwany przez procesor - „Język C”. Przyspieszyło to proces programowania, a także ograniczyło błędy, które mogły powstać podczas migracji algorytmu (z poziomu symulacji do formy akceptowanej przez docelowy sterownik).

Procedurę testową przedstawiono na Rys. 6.

Generacja kodu była możliwa poprzez wykorzystanie odpowiedniej z bibliotek przeznaczonych do współpracy zastosowanym typem procesora rodziny C2000 [7]. Szczegółowy opis procedury oraz testy HIL (ang. hardware in the loop) zaprogramowanego kontrolera na symulatorze

czasu rzeczywistego Opal Phenix RTS (ang. Real Time Simulator, Rys. 1-2.9 - krok 3) przedstawiono w [8]. Istotą systemów symulacji HIL jest zastępowanie rzeczywistych urządzeń platformą symulacyjną wyposażoną w interfejs umożliwiający połączenie symulatora z innymi fizycznymi urządzeniami [9].



Rys. 6. Ilustracja zastosowanej metodyki wykorzystanej podczas programowania i testów sterownika układu

Rezultaty badań w układzie rzeczywistym

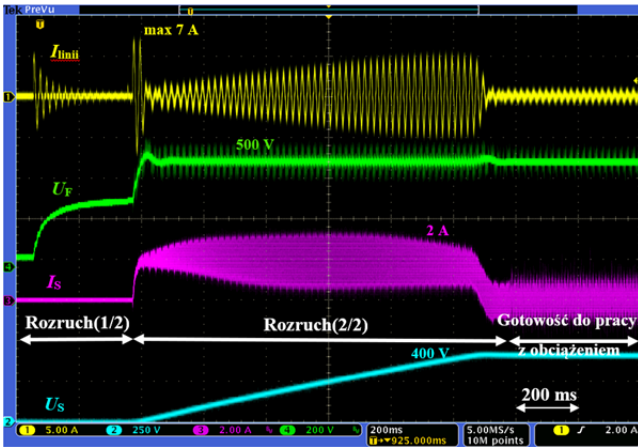
W trakcie badań laboratoryjnych na zrealizowanym układzie przeprowadzono analizę stanów ustalonych oraz stanów dynamicznych. Algorytmy realizujące koncepcje sterowania zostały zweryfikowane w pełnym zakresie przewidzianego obciążenia.

Kompletne stanowisko badawcze wykorzystywane podczas badań przedstawiono na rys. 7.



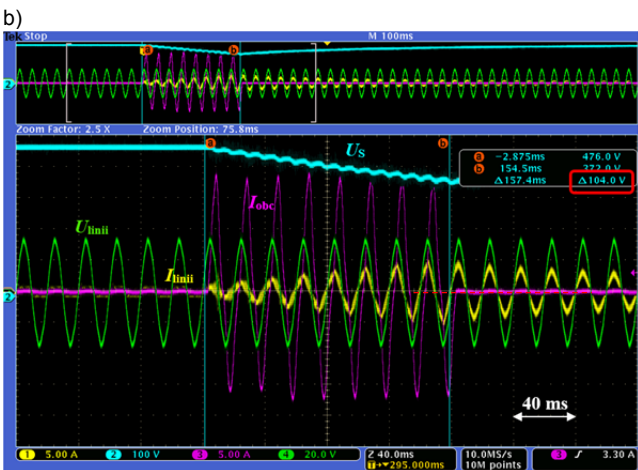
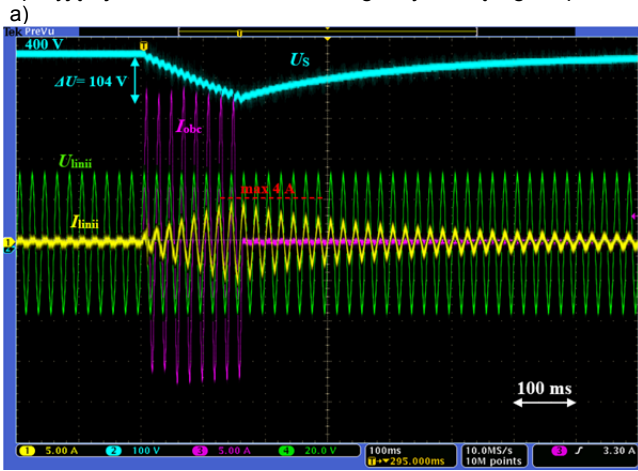
Rys. 7. Widok zrealizowanego stanowiska badawczego: (1)- obciążenie - zgrzewarka; (2)- filtr aktywny z dodatkowym zasobnikiem energii; (3)- oscyloskop TEK DPO4054; (4)- komputer z graficznym interfejsem użytkownika GUI

Pierwszym z analizowanych stanów dynamicznych badanego układu był rozruch. Zarejestrowane podczas niego oscylogramy prądu i napięcia linii zasilającej (I_{linii} , U_{linii}), napięcie U_F , U_S , oraz prądu I_S przedstawiono na rys. 8. W pierwszym kroku ma miejsce załączenie układu oraz wstępne ładowanie pojemności filtra C_F . Po osiągnięciu przez napięcie U_F wartości 310 V, następuje zwarcie rezystora ograniczającego prąd ładowania RB oraz doładowanie pojemności do wartości maksymalnej napięcia w linii zasilającej (maksymalna wartość prądu ładowania początkowego nie przekracza 6 A).



Rys. 8. Rozruch układu: a) przebiegi prądu linii zasilającej I_{linii} , napięcia w obwodzie pośredniczącym DC filtru U_F , prądu w obwodzie przekształtnika I_S oraz napięcia przekształtnika U_S

Równocześnie z ładowaniem pojemności filtra C_F rozpoczyna się dużo dłuższy proces ładowania pojemności przekształtnika C_S . Niewielkie wzmocnienie regulatora napięcia gwarantuje odpowiednie tłumienie trzeciej harmonicznej w generowanym prądzie linii zasilającej, a nieciągłość prądu w okolicach przejścia przez zero, wynika z przyjętej wartości czasu martwego wynoszącego 3 μs .

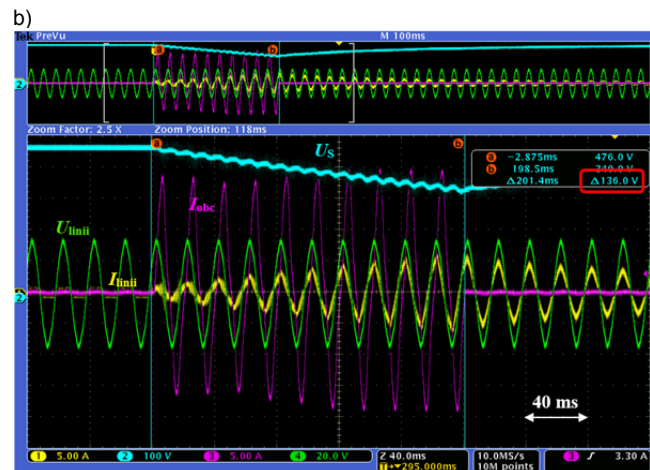
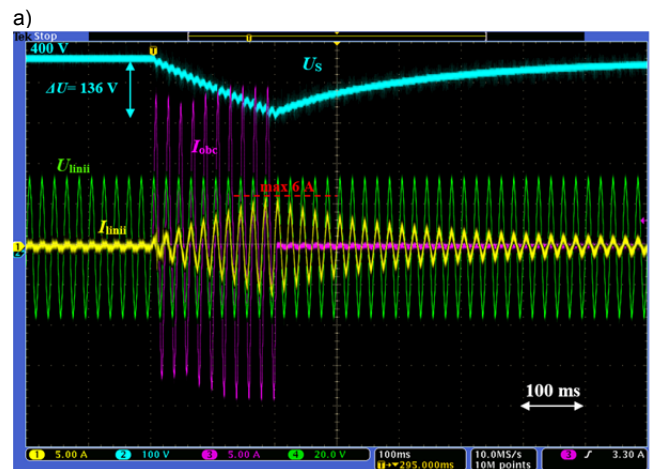


Rys. 9. Przebieg prądu obciążenia (I_{obc}), prądu i napięcia linii zasilającej (I_{linii} , U_{linii}) oraz napięcia w obwodzie przetwornicy DC/DC (U_S) podczas kompensacji obciążenia - zgrzewarki, załączanej na 8 okresów napięcia linii zasilającej (8x20 ms) z kątem opóźnienia załączenia tyrystorów wynoszącym 70° : a) szerszy horyzont czasowy obrazujący rozkład prądu linii zasilającej w czasie oraz spadek napięcia U_S ; b) powiększenie chwili załączenia obciążenia i jego wpływ na prąd linii zasilającej i napięcie U_S

Mała wartość wzmocnienia regulatora napięcia ma wpływ na wydłużenie procesu ładowania pojemności w układzie. Ładowanie pojemności przekształtnika DC/DC odbywa się z prądem ograniczonym do 2 A, co zapewnia prawidłową stabilizację napięcia U_F przez wolny układ regulacji filtru. Prąd ładowania ograniczono do 7 A.

Po przekroczeniu przez napięcie U_S wartości 380 V (spełnienie warunku $U_F = 500 V$ oraz $U_S > 380 V$), następuje przełączanie struktury regulacji, z opóźnieniem wynoszącym 100 ms. Układ rozpoczyna pracę z niewielką wartością prądu gwarantującą podtrzymanie zadanych poziomów napięć. Możliwa jest już praca z obciążeniem (kompensacja jego wpływu na linie zasilającą). Pełną gotowość do pracy z obciążeniem układ osiąga już po około 1,4 s.

W trakcie drugiego z analizowanych stanów pracy urządzenia (rys. 9 do 11) miała miejsce kompensacja prądu zgrzewarki pracującej ze zmiennym czasem zgrzewania, wynoszącym m.in. 8, 10, 12 okresów napięcia linii zasilającej, załączanej ze stałą wartością kąta opóźnienia załączenia tyrystorów $\alpha = 70^\circ$.



Rys. 10. Przebieg prądu obciążenia (I_{obc}), prądu i napięcia linii zasilającej (I_{linii} , U_{linii}) oraz napięcia w obwodzie przetwornicy DC/DC (U_S) podczas kompensacji obciążenia - zgrzewarki, załączanej na 10 okresów napięcia linii zasilającej (10x20 ms) z kątem opóźnienia załączenia tyrystorów wynoszącym 70° : a) szerszy horyzont czasowy obrazujący rozkład prądu linii zasilającej w czasie oraz spadek napięcia U_S ; b) powiększenie chwili załączenia obciążenia i jego wpływ na prąd linii zasilającej i napięcie U_S

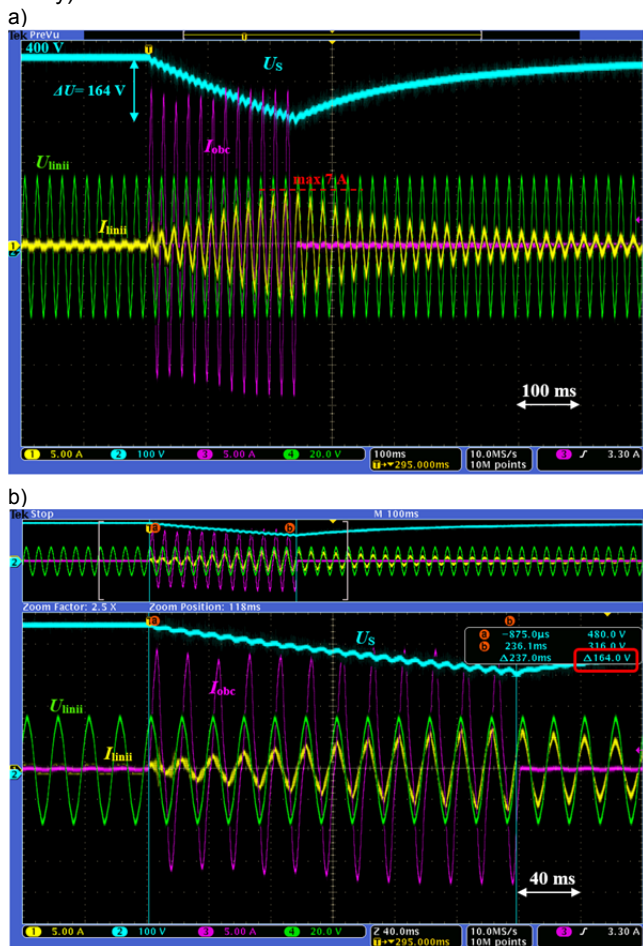
Celem badań przeprowadzonych w trakcie tego etapu, była weryfikacja poprawności doboru magazynów energii w układzie (zwłaszcza pojemności zasobnika energii C_S) oraz

określenie maksymalnej dopuszczalnej liczby okresów, na które może zostać załączona zgrzewarka, bez utraty możliwości kompensacji udarów mocy czynnej przez opracowany układ.

Załączanie obciążenia na sześć okresów napięcia linii zasilającej (założenie dla którego projektowano układ) powodowało obniżenie wartości napięcia U_S o 104 V. Oznacza to, iż w trakcie kompensacji obciążenia, pojemność zasobnika została rozładowana do poziomu 58% w odniesieniu do energii magazynowanej w znamionowych warunkach pracy, przy napięciu $U_{S_ref} = 400$ V, ($C_S = 4700$ μ F).

Czas na który załączane jest obciążenie ma również wpływ na wartość maksymalną prądu linii zasilającej, wypracowaną przez układ, wzrasta ona wraz ze zwiększaniem czasu, na który załączane jest obciążenie.

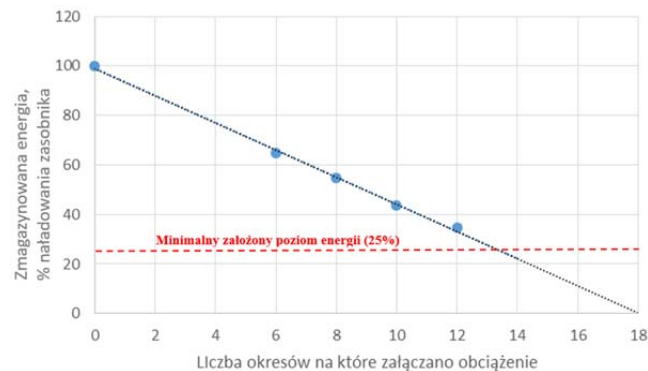
Wzrost prądu linii w trakcie załączania obciążenia (rozkład wartości maksymalnej prądu w czasie) wynika z nastaw zastosowanych regulatorów, które dobrano tak, aby podczas odbudowy napięcia przekształtnika U_S nie dochodziło do przeregulowań (wymuszających niepotrzebną cyrkulację energii w układzie zwiększając straty).



Rys. 11. Przebieg prądu obciążenia (I_{obc}), prądu i napięcia linii zasilającej (I_{linii} , U_{linii}) oraz napięcia w obwodzie przetwornicy DC/DC (U_S) podczas kompensacji obciążenia - zgrzewarki, załączanej na 12 okresów napięcia linii zasilającej (12x20 ms) z kątem opóźnienia załączenia tyrystorów wynoszącym 70° . a) szerszy horyzont czasowy obrazujący rozkład prądu linii zasilającej w czasie oraz spadek napięcia U_S ; b) powiększenie chwili załączenia obciążenia i jego wpływ na prąd linii zasilającej i napięcie U_S

Załączenia obciążenia na maksymalną badaną liczbę 12 okresów napięcia linii zasilającej (czas dwukrotnie dłuższy od zakładanego), spowodowało rozładowanie zasobnika do ok. 35% (poprawne warunki pracy układu nadal zapewnione mimo tak niskiego poziomu energii zasobnika).

Wykres ilustrujący stopień rozładowania zasobnika w funkcji czasu, na jaki załączano obciążenie (liczby okresów) przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Ubytek energii w zasobniku (kondensatorze C_S) w funkcji liczby okresów, na które załączane jest obciążenie

Sposób rozładowywania zasobnika w zależności od liczby okresów, na które załączano obciążenie ma charakter liniowy. Ze względów bezpieczeństwa oraz zaimplementowane zabezpieczenia maksymalny czas zgrzewania ograniczono podczas badań do 12 okresów napięcia linii (z przewidzianych 14).

Otrzymane rezultaty potwierdzają prawidłowy dobór pojemności zasobnika, Zmagazynowana energia zapewnia prawidłowe działanie układu podczas kompensacji obciążenia załączanego na czas dwukrotnie dłuższy niż zakładany w trakcie badań teoretycznych, a zmiany napięcia U_S mieszczą się w dopuszczalnym przedziale.

Wnioski

W artykule przedstawiono koncepcję działania jednofazowego filtra aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii. W obu układach o oddzielnych obwodach pośredniczących napięcia stałego zastosowano kondensatory elektrolityczne. Rozwiązanie takie zapewnia dobrą dynamikę kompensacji oraz umożliwia redukcję rozmiaru kondensatora filtra.

Opracowane urządzenie jest dedykowane do kompensacji obciążeń jednofazowych np. zastosowanej w trakcie badań zgrzewarki punktowej, będącej doskonałym przykładem obciążeń nieliniowych, charakteryzują się przerywaną pracą.

Na podstawie analizy teoretycznej opracowano model symulacyjnego w środowisku Matlab & Simulink, a następnie przystąpiono do realizacji układu laboratoryjnego, którego działanie potwierdziło wysoką skuteczność prezentowanego rozwiązania.

Wartość skuteczna prądu linii zasilającej została ograniczona w znacznym stopniu (wartość prądu dużo mniejsza niż wynikająca z mocy obciążenia). Prąd linii zasilającej pozostaje sinusoidalny (dominująca podstawowa harmoniczna) i w fazie z napięciem linii.

Zaproponowane i przebadane w pracy rozwiązanie może mieć wymierne rezultaty ekonomiczne, poprzez zmniejszenie mocy przyłączeniowej niezbędnej do zasilania cyklicznie pracujących odbiorników oraz poprawienie wskaźników charakteryzujących jakość energii elektrycznej.

Autorzy:

dr hab. inż. Marcin Baszyński, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 31-038 Kraków, E-mail: mbaszyn@agh.edu.pl;

dr inż. Kacper Sowa, ABB Technology Center, Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, Poland, E-mail: kacper.sowa@pl.abb.com;

prof. dr hab. inż. Stanisław Pirog, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 31-038 Kraków, E-mail: pirog@agh.edu.pl

LITERATURA

- [1] Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J., High Performance Control of AC Drives with Matlab/Simulink Models, 1st ed. (2012), John Wiley & Sons
- [2] Senderski A., Formułowanie modeli symulacyjnych układów energoelektronicznych, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne (2013)
- [3] Hoffmann N., Fuchs F., Dannehl J., Models and effects of different updating and sampling concepts to the control of gridconnected PWM converters - A study based on discrete time domain analysis, 14th European Conference on Power Electronics and Applications (2011), Birmingham, pp. 1-10
- [4] LEM industry current & voltage transducers, Datasheet LV 25-P/SP5 (2013)
- [5] Bień A., Systemy pomiarowe w elektroenergetyce, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne (2013)
- [6] Zieliński T. P., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań, 2nd ed., Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ (2007)
- [7] Texas Instruments, TMS320F2837xS Delfino Microcontrollers Technical Reference Manual (2016)
- [8] Sowa K., Baszynski M., Pirog, S., Single-phase active filter with an energy storage system used for compensation of active-power fluctuations - HIL tests on real time simulator RTS, Przegląd Elektrotechniczny (2019) 95, 200–207
- [9] Szkolny S., Małyszko O., Symulator typu hardware-in-the-loop do testowania generatorów turbin wiatrowych, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 103 (2014), 3