

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii
Biomedycznej

Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania
Energii



AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

*Jednofazowy energetyczny filtr aktywny z zasobnikiem energii
do kompensacji wahań mocy czynnej w linii zasilającej*

MGR INŻ. KACPER SOWA

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg

Promotor pomocniczy:
Dr inż. Marcin Baszyński

Kraków 2018

Wstęp

Jednym z kluczowych problemów współczesnej energoelektroniki jest poprawa jakości energii elektrycznej, a zwłaszcza działania zmierzające do ograniczenia mocy aparatury dystrybucyjnej (transformatorów, przewodów, aparatury łączeniowej). Sprowadza się to m.in. do nadążnej kompensacji mocy biernej i filtracji harmonicznych prądu, generowanych przez nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej. Zadanie to może być realizowane przez kompensatory mocy biernej oraz energetyczne filtry aktywne [9], [12], [17] kompensujące składową nieaktywną prądu wg definicji S. Fryzego [6], [58], [22], lub chwilowej mocy biernej wg H. Akagi [1], [2].

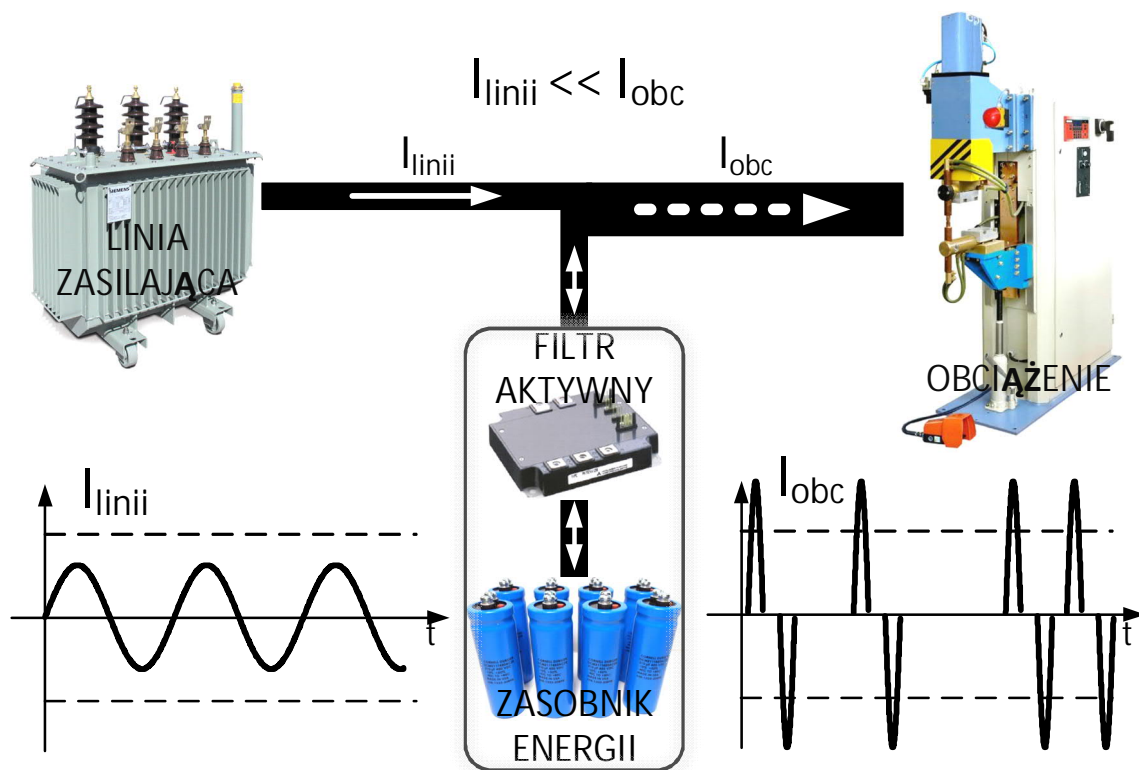
Wykorzystanie filtracji aktywnej (w porównaniu z filtracją pasywną LC) eliminuje zjawiska związane z możliwością wystąpienia rezonansu, jak również problemy wynikające z konieczności dostrajania do częstotliwości filtrowanych harmonicznych [5], [8]. Znaczącym ograniczeniem rozwiązań pasywnych jest ich dobór tylko do kilku z kolejnych harmonicznych o największej wartości, a skuteczność filtracji jest zależna od wartości kompensowanej mocy. Ponadto, procesy starzeniowe występujące w elementach pasywnych (w szczególności kondensatorach) mają znaczący wpływ na jakość pracy tego rodzaju układów. Istnieje również niebezpieczeństwo przekompensowania w miejscu dołączenia filtru, gdy jest on nadal (lub na stałe) dołączony do linii zasilającej, a kompensowany odbiornik został wyłączony lub pracuje z przerwami.

W przypadku odbiorników o pracy nieciągłej, w których czas pracy urządzenia w odniesieniu do czasu spoczynkowego jest relatywnie krótki, instalacja zasilająca (linia, aparatura rozdzielcza) jest projektowana dla obciążeń szczytowych. W celu zapewnienia poprawnych warunków pracy dla innych urządzeń zasilanych z tej samej linii, moc zwarciowa w punkcie przyłączenia musi być odpowiednio duża. Zastosowanie dodatkowego magazynu energii, pobierającego energię przy braku obciążenia przez odbiorniki i wspomagającego ich zasilanie podczas pracy, stwarza możliwość radykalnego zmniejszenia szczytowej wartości mocy, a tym samym wymagań stawianych m.in. instalacji zasilającej.

Dla zasilania pracujących w ten sposób, nieliniowych odbiorników jednofazowych zastosowanie energetycznego filtru aktywnego połączonego z zasobnikiem energii, umożliwi pobieranie energii przy mocy zbliżonej do jej średniej wartości w przyjętym przedziale czasu, lecz przy minimalnych jej wahaniami (poprzez ograniczenie wartości składowej zmiennej mocy średniej).

Ideę działania takiego układu przedstawiono na rys. 1. Układ dołączony do linii zasilającej, jest złożony z filtru aktywnego, zasobnika energii oraz niespokojnego odbiornika, załączanego w nieregularnych odstępach czasowych. Na rysunku zaznaczono również charakter prądu linii zasilającej (I_{linii}) oraz prąd odbiornika (I_{obc}).

Połączenia między elementami symbolizują możliwe drogi przepływu energii, realizowane przez odpowiednie funkcje układu, natomiast naniesione strzałki oznaczają możliwe kierunki oraz sposób jej przepływu (ciągły lub dorywczy). Pogrubione połączenie z obciążeniem symbolizuje wymagania stawiane aparaturze dystrybucyjnej, w celu sprostania tak znacznym przepływom generowanym przez obciążenie.



Rys. 1. Schemat poglądowy ilustrujący zasadę działania układu filtru aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii

Układ ma dążyć do utrzymania poboru energii przy ciągłym przepływie prądu I_{linii} , o wartości skutecznej wynikającej z energii dostarczanej w analizowanym przedziale czasu (stałej mocy), a w konsekwencji - wartości mocy wielokrotnie mniejszej niż chwilowo wymuszanej przez okresowo załączane obciążenie (I_{obc}).

W tym układzie energia nie jest dostarczana do obciążenia wyłącznie z linii, ale również przez zasobnik filtru aktywnego. Obniża to maksymalną moc od strony linii zasilającej, co w konsekwencji pozwala zaprojektować linię zasilającą na mniejsze prądy robocze [20], [21].

Ciągłość poboru energii z linii zasilającej, realizowana przez filtr oznacza konieczność magazynowania przez układ energii w czasie przerw w pracy obciążenia oraz jej zwracanie w trakcie jego pracy. Wspomagając tym samym pracę obciążenia i jednocześnie redukując szczytową wartość energii pobieranej z linii, kosztem energii uprzednio zgromadzonej.

Przy założeniu, iż czas pracy obciążenia jest wielokrotnie mniejszy od jego czasu spoczynkowego, odpowiednio dobrana skuteczna wartość prądu sinusoidalnego, o charakterze ciągłym i prawie stałym w czasie, jest w stanie kompensować okresowo występujące obciążenie, o wielokrotnie większej wartości.

Zagadnienie kompensacji wahań - udarów mocy czynnej jest zjawiskiem bardzo złożonym, ze względu na potrzebę magazynowania energii [4], [7], [26]. Opracowany układ sterowania i regulacji musi umożliwiać wyznaczenie takiej wartości prądu linii zasilającej, aby uzupełnić energię zgromadzoną w magazynie (w czasie gdy odbiornik nie pracuje) i jednocześnie, aby wartość zmagazynowanej energii była wystarczająca do

skompensowania udarowego zapotrzebowania na moc odbiornika w trakcie jego kolejnego załączenia. Algorytm wyznaczenia wartości prądu linii musi uwzględniać możliwe zmiany w cyklu pracy kompensowanego odbiornika, np. zmian czasu przerw i pracy.

Jako przykład kompensowanego i filtrowanego obiektu, dla którego dodatkowo będzie realizowane ograniczenie wahań mocy czynnej, wybrano jednofazową zgrzewarkę punktową z tyrystorowym regulatorem prądu, pracującą ze zmiennym czasem przerw.

Urządzenia tego typu wymuszającą w trakcie swojej pracy przepływ przez linie prądów odkształconych o dużej wartości składowej biernej, odpowiadającej za spadki napięcia na reaktancji linii zasilającej, a przede wszystkim na reaktancji transformatora sieciowego. Powstałe w ten sposób spadki napięcia niekorzystnie oddziałują na pracę wszystkich odbiorników dołączonych do tego samego węzła zasilającego. Zmniejszeniu ulega również moc czynna odbiorników (także zgrzewarki), co w konsekwencji niekorzystnie wpływa na efekt jej pracy, jakość zgrzewania.

Problem ten dotyczy również innych odbiorników o cyklicznym charakterze pracy np. napędu dźwigów i wind, a także trakcji prądu stałego, w której podczas hamowania odzyskowanej energii jest zwracana do sieci/trakcji. Powoduje to wzrost napięcia - jeśli w tym samym czasie nie znajdzie się inny obiekt, w którym energia mogłaby zostać wykorzystana np. podczas procesu rozruchu [23], [25]. Pomimo stosunkowo krótkich odcinków czasu przepływu prądu, linia zasilająca dla tego rodzaju odbiorników musi być projektowana na maksymalne wartości prądu.

Obecnie do niesymetrycznych i nieliniowych odbiorników pracujących cyklicznie, dołączane są kompensatory mocy biernej (lub filtry aktywne) [3], [11], [13], pozwalające na zmniejszenie spadków napięć na linii zasilającej, w trakcie przepływu prądów udarowych oraz zmniejszenie zawartości harmonicznym prądu. Rozwiązanie takie nie ogranicza jednak szczytowych wartości prądu linii i transformatora zasilającego, wynikających z udarów mocy czynnej.

Wyposażenie energoelektronicznego, równoległego filtra aktywnego w zasobnik o dużej gęstości gromadzonej energii z możliwością szybkiego jej oddania (układ o małej impedancji, przez który mogą przepływać prądy o dużej wartości) pozwala na ograniczenie negatywnego oddziaływania niespokojnych odbiorników na linię zasilającą. Umożliwia również uzyskanie przepływu prądu współfazowego z napięciem oraz ograniczenie zawartości harmonicznym prądu. Rozbudowując algorytm sterowania filtra aktywnego o funkcję pozwalającą na zwrot energii z zasobnika do niespokojnego odbiornika w czasie jego pracy oraz uzupełnienie energii magazynu, gdy odbiornik ten nie pracuje, umożliwia uzyskanie przepływu przez linię zasilającą prądu o stosunkowo małej (w odniesieniu do wartości prądu odbiornika) oraz stałej lub o niewielkich zmianach wartości (w przedziale kilkadziesiąt cykli pracy kompensowanego odbiornika).

Celem naukowym stawianym w pracy było opracowanie skutecznych topologii, algorytmów oraz metod sterowania przekształtnikiem energoelektronicznym (jednofazowym energetycznym filtrem aktywnym) wyposażonym w magazyn energii, który zniweluje lub znacznie ograniczy udary mocy czynnej oraz niekorzystne oddziaływanie tego rodzaju odbiorników na linię zasilającą. Dodatkowym celem było opracowanie metod kontroli pracy oraz transferu energii z zasobnika. Na magazyn

wybrano kondensator elektrolityczny zasilany przez dwukierunkowy przekształtnik DC/DC.

Opracowane przekształtniki energoelektroniczne, wraz z układami sterowania mogą znacząco poprawić pewność zasilania oraz jakość energii elektrycznej nieliniowych, niestacjonarnych odbiorników jednofazowych.

Cele badawcze i ich realizacja

Niniejsza praca naukowa składa się z badań teoretycznych, symulacyjnych oraz eksperymentalnych. W przyjętych założeniach, cel pracy nastawiony jest na zdobywanie nowej wiedzy z zakresu energoelektroniki oraz jakości energii elektrycznej. Wartość merytoryczna pracy przyczyni się do poszerzenia bazy informacji naukowych z dziedziny energoelektroniki, która będzie stanowić podstawę do rozwiązywania mogących wystąpić w przyszłości problemów technicznych i technologicznych.

W projekcie postawiono hipotezę, iż prąd jednofazowej linii zasilającej odbiornik nieliniowy o niskiej i zmiennej wartości współczynnika mocy dla podstawowej harmonicznej, pracujący dorywczo ze zmiennym czasem przerw (odbiornik niespokojny) może być sinusoidalny i współfazowy z napięciem linii zasilającej, a wartość skuteczna tego prądu może być znacznie mniejsza, niż wartość prądu samego odbiornika wynikająca z jego mocy czynnej. Można to osiągnąć, jeśli do odbiornika zostanie dołączony odpowiedni układ energoelektroniczny pełniący funkcję filtra aktywnego, który dodatkowo będzie wyposażony w magazyn energii.

Proces rozwiązywania postawionych w pracy celów badawczych złożony był z następujących etapów:

Etap I: Analiza koncepcyjna

W trakcie której opracowano topologię oraz algorytm sterowania jednofazowym filtrem aktywnym z zasobnikiem energii, tak aby układ spełniał wszystkie założone w projekcie cele (kompensatora wahań/udarów mocy czynnej, kompensatora mocy biernej oraz filtra harmonicznym generowanych przez analizowany typ odbiornika).

Zaproponowany algorytm umożliwia wyznaczenie minimalnej wartości prądu linii zasilającej, kontrolę przepływu energii pomiędzy linią zasilającą a filtrem oraz filtrem a zasobnikiem.

Trudność w opracowaniu takiego algorytmu wynikała z niemożliwości zastosowania zwykłego bilansu mocy, ponieważ cykl pracy odbiornika może być zmienny, a algorytm powinien być w stanie nadążać za zmianami zachowania odbiornika.

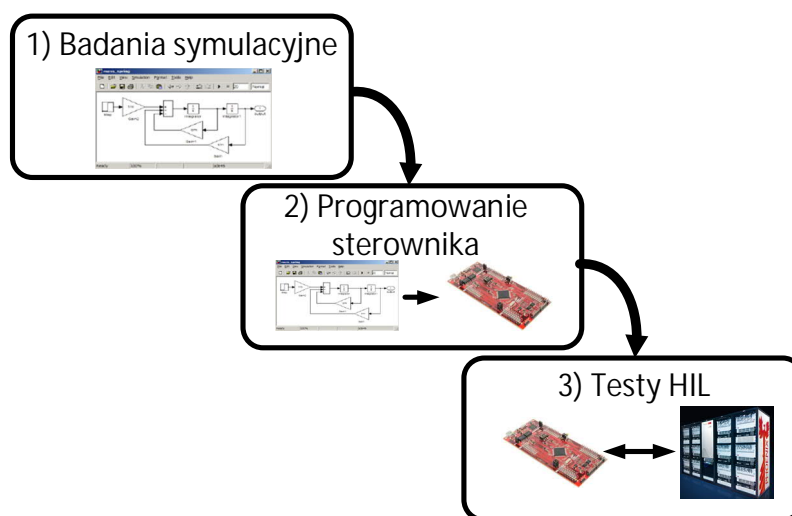
Etap II: Symulacje komputerowe

Podczas których zrealizowano model symulacyjny całego układu w środowisku Matlab & Simulink, na podstawie opracowanych metod sterowania oraz dobranej topologii obwodu mocy.

Przeprowadzone badania symulacyjne pozwoliły na wstępne sprawdzenie poprawności zaproponowanych algorytmów i układów sterownia oraz dokonanie niezbędnych korekt algorytmów.

Wyniki symulacji umożliwiły optymalizację dobranych parametrów elementów pasywnych: dławików ze względu na oczekiwaną wartość tętnień prądu oraz znajdujących się w układzie kondensatorów, których pojemność powinna pozwalać na poprawne zachowanie się kompensatora przy zmianie parametrów odbiornika np. zmianie wartości szczytowej prądu odbiornika, zmianie długości przerwy pomiędzy cyklami pracy, czy zmianie czasu pracy (w przyjętym zakresie wynikającym ze specyfiki pracy odbiornika).

Następnie, opracowany układ sterownia został przeniesiony do docelowego układu sterowania DSP (alternatywą pozostaje opracowany sterownik FPGA). Wykorzystano w tym celu automatyczną generację kodu „Model Based Design” programując układ DSP bezpośrednio z środowiska Matlab & Simulink. Prace nad układem sterownika przeprowadzono zgodnie z procedurą przedstawioną na rys. 2.



Rys. 2. Metodyka wykorzystana podczas programowania i testów sterownika układu

Tak zaprogramowany układ sterownika został przetestowany na symulatorze czasu rzeczywistego Opal Phenix RTS (ang. Real Time Simulator) [15], w Laboratorium Nowych Technologii w Elektroenergetyce, udostępnionym dzięki uprzejmości Korporacyjnego Centrum Badawczego ABB w Krakowie.

Sterownik kontrolował pracę układu filtra z zasobnikiem, zaimplementowanym w strukturze układu RTS (tzw. Hardware in the loop). Istotą systemów symulacji HIL jest zastępowanie rzeczywistych urządzeń platformą symulacyjną wyposażoną w interfejs umożliwiający połączenie symulatora z innymi fizycznymi urządzeniami [24].

Etap III: Budowa stanowiska badawczego i testy na rzeczywistym urządzeniu

W trakcie tego etapu zaprojektowano i zbudowano stanowisko badawcze w celu weryfikacji poprawności opracowanego układu sterowania, sprawdzonego wcześniej na modelu czasu rzeczywistego.

Kompensowanym odbiornikiem jest opracowana na potrzeby eksperymentu jednofazowa zgrzewarka punktowa wyposażona w tyrystorowy regulator prądu, sterowana fazowo.

Opracowany w trakcie prac układ filtru aktywnego z zasobnikiem, umożliwia kompensację obciążenia załączanego przypadkowo w odstępach nie krótszych niż 5 s.

Maksymalną, przewidzianą wartość kompensowanego prądu obciążenia ograniczono do 20 A wartości szczytowej (dopuszczalna wartość prądu urządzenia). Układ wyposażono w specjalne gniazdo umożliwiające współpracę z innymi typami obciążenia jednofazowego.

Moc kompensowanego obciążenia nie przekraczała 1 kW, a zgromadzona w zasobniku energia o wartości 376 J, przy napięciu wynoszącym 400 V, daje bezpieczny zapas na kompensację maksymalnie 14 okresów, na które może zostać załączone obciążenie.

ETAP IV: Opracowanie wyników eksperymentu

Uzyskane w trakcie badań wyniki poddano analizie, która wykazała, iż opracowane metody sterowania przekształtnikiem sieciowym (filtrem aktywnym) oraz magazynem energii spełniają postawione założenia.

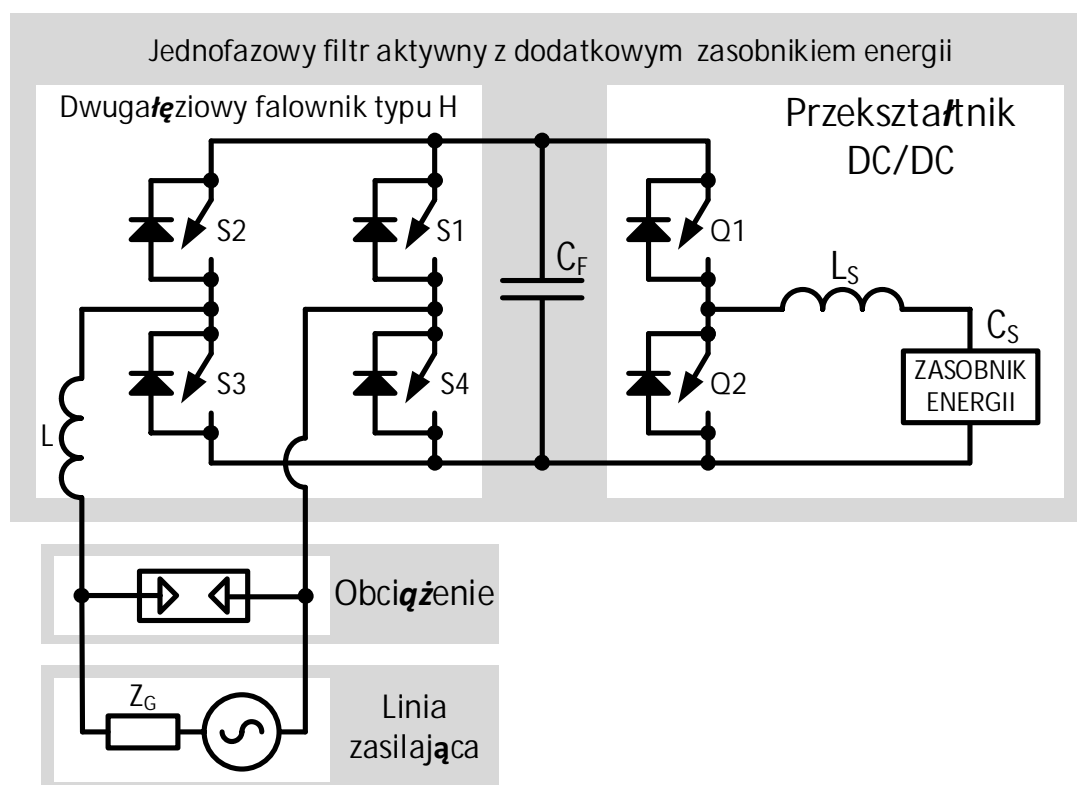
Podjęcie wymienionych celów niniejszego projektu badawczego oraz opracowanie uzyskanych wyników, przyczyni się do zwiększenia spektrum zastosowań jednofazowych filtrów aktywnych. Pogłębiły stan wiedzy dotyczący sposobów poprawy jakości energii elektrycznej. Projekt oraz konstrukcja laboratoryjnego układu prototypowego dały cały szereg informacji dotyczących słuszności postawionych tez i opracowanych koncepcji całego systemu kompensacji wahań mocy czynnej w linii zasilającej. Przedstawione cele badawcze zrealizowano i opisano w pracy.

Opracowane algorytmy będą mogły być użyte w przekształtnikach energoelektronicznych ograniczających negatywne oddziaływanie niespokojnych, nieliniowych odbiorników na linie zasilającą.

Przedstawione w projekcie rozwiązanie może mieć wymierne rezultaty ekonomiczne, poprzez zmniejszenie mocy przyłączeniowej niezbędnej do zasilania cyklicznie pracujących odbiorników oraz poprawienie wskaźników charakteryzujących jakość energii elektrycznej. W przyszłości opracowana metoda kompensacji udarów mocy czynnej pozwoli na elastyczne podejście do wymogów dotyczących mocy przyłączeniowej punktu, do którego dołączany jest pracujący cyklicznie odbiornik o dużej szczytowej wartości prądu (mocy pozornej).

Przeprowadzone badania oraz ich wyniki

Na rys. 3 przedstawiono schemat obwodu mocy filtru aktywnego z zasobnikiem energii, realizującego uprzednio przyjęte cele. Układ jest dołączony do jednofazowej linii zasilającej, równoległe z obciążeniem.



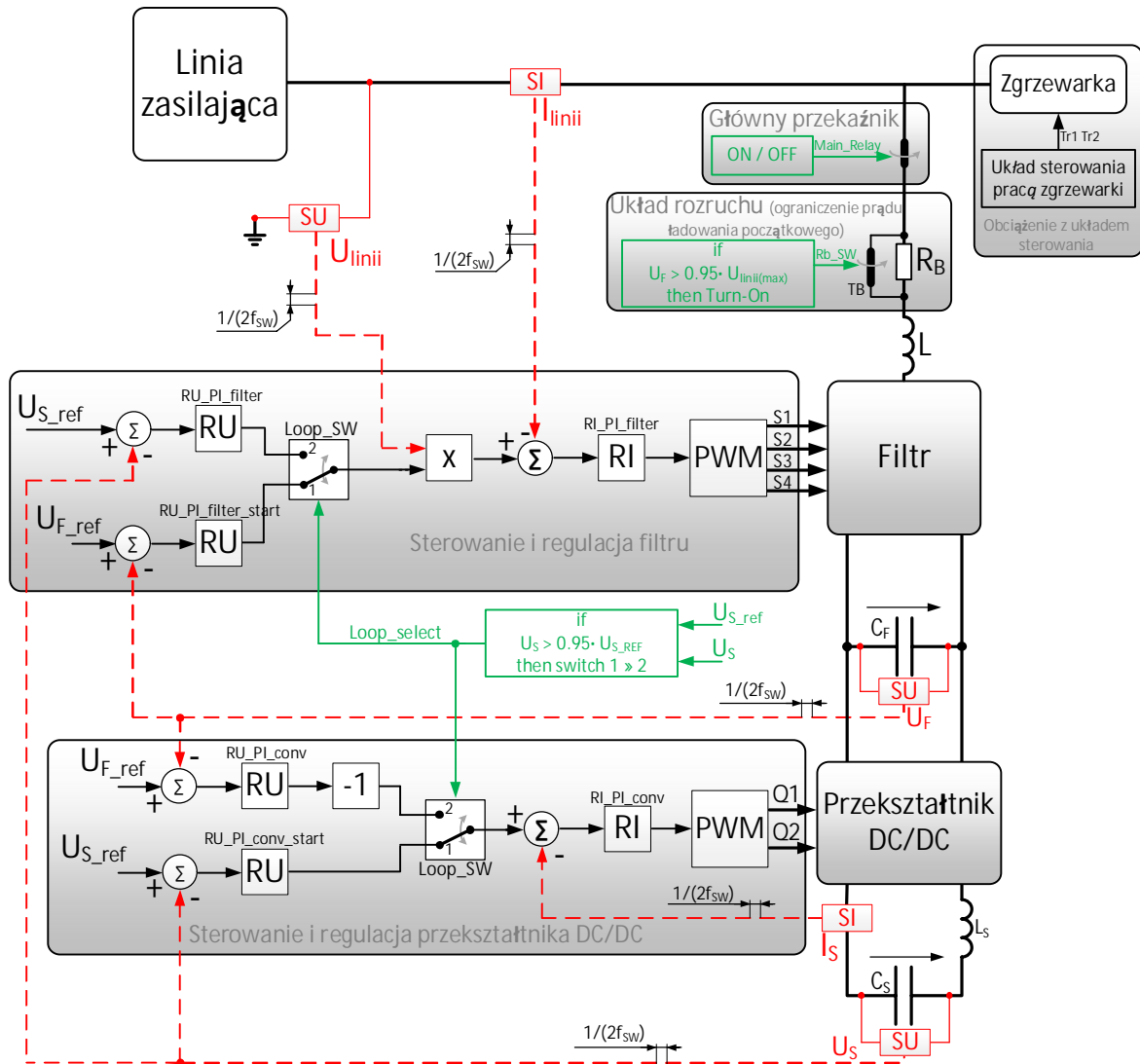
Rys. 3. Schemat jednofazowego filtra aktywnego z zasobnikiem energii; S1÷S4 łączniki wchodzące w skład struktury falownika, Q1-Q2 łączniki wchodzące w skład przekształtnika DC/DC, Z_G- impedancja wewnętrzna linii zasilającej

Analizowany jednofazowy energetyczny filtr aktywny to falownik napięcia w układzie mostka H z kształtowanymi poprzez modulację szerokości impulsów (PWM) przebiegami prądów [14], [17]. Do wyjścia DC falownika dołączono nieseparowany, dwukierunkowy przekształtnik DC/DC [10], [17], [19], [27] z dodatkowym zasobnikiem energii.

Wykorzystany w pracy zasobnik energii w postaci kondensatora elektrolitycznego wymaga zastosowania dodatkowego układu przekształtnika DC/DC w celu współpracy z szyną DC filtru.

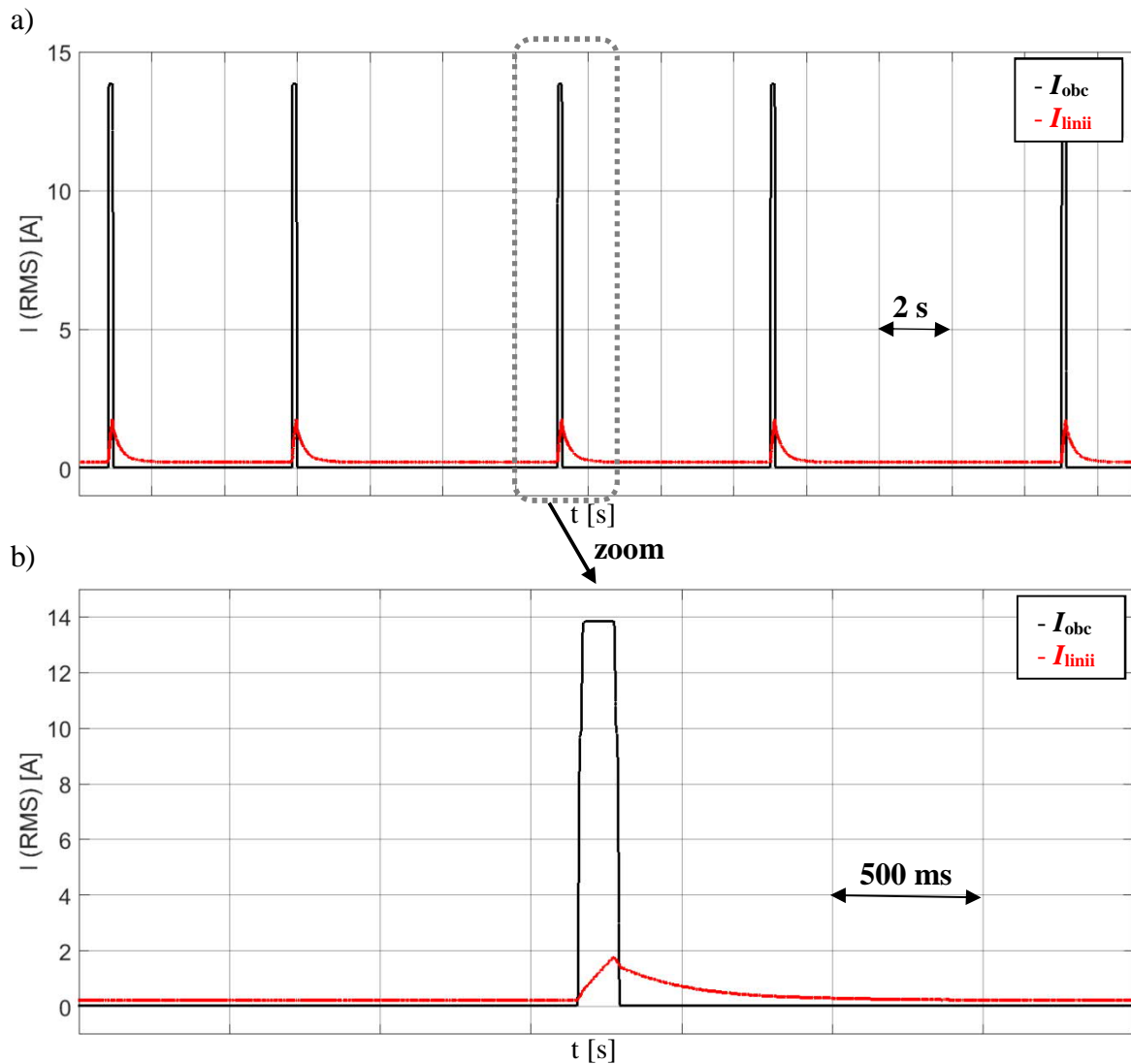
Rozwiązanie to mimo wykorzystania tylko dwóch łączników gwarantuje pełną realizację założonych celów. Łącząc w sobie maksimum funkcjonalności z minimalną liczbą koniecznych elementów półprzewodnikowych. Przekształtnik taki stanowi zatem właściwy wybór niezależnie od magazynu energii, który można zastosować na jego wyjściu (np. kinetyczny zasobnik energii w postaci silnika z masą wirującą, cewka nadprzewodząca, superkondensatory lub baterię akumulatorów etc.) [16], [18], [28].

Badania układu przeprowadzono w środowisku Matlab & Simulink. Schemat blokowy układu (wraz z naniesionym podziałem na sekcje), na podstawie którego opracowano model symulacyjny przedstawiono rys. 4. Kolorem czerwonym oznaczono sygnały pomiarowe niezbędne do działania układu, natomiast kolorem zielonym funkcje realizowane przez układ nadzorujący rozruch i pracę układu.



Rys. 4. Schemat blokowy układu filtru aktywnego z zasobnikiem wraz z układem sterowania i regulacji, na podstawie którego opracowano model symulacyjny w środowisku Matlab & Simulink, gdzie: RU- regulator napięcia; RI- regulator prądu; SU- czujnik pomiarowy napięcia; SI- czujnik pomiarowy prądu; Loop_SW- przełącznik konfiguracji układu sterowania

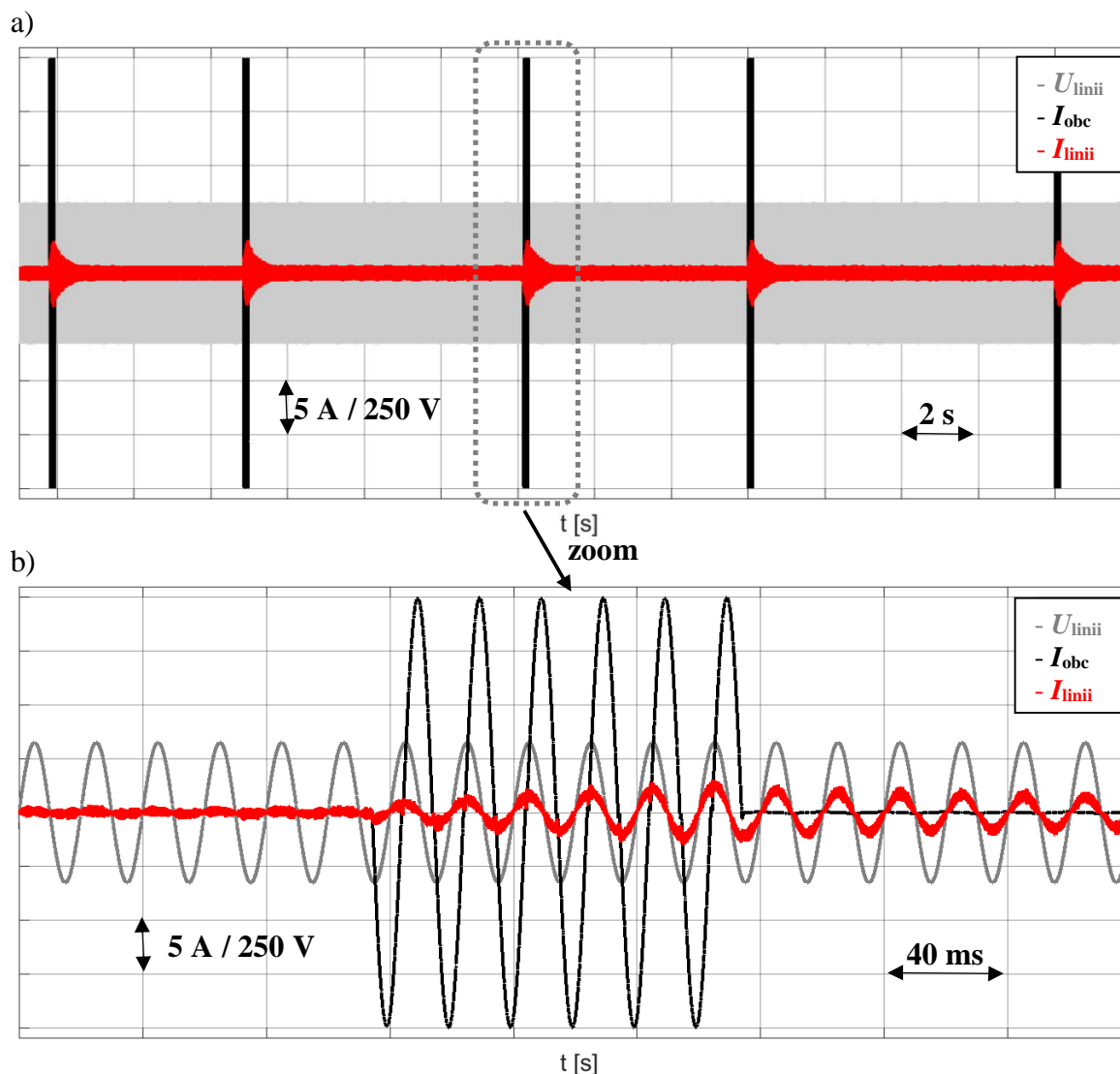
Potwierdzeniem skuteczności działania badanego układu są zaprezentowane na rys. 5 przebiegi wartości skutecznej prądów: wywołanego przez obciążenie (I_{obc}) oraz płynącego przez linię zasilającą (I_{linii}) podczas pracy filtru z zasobnikiem. Działanie układu ogranicza nagle wzrosty wartości skutecznej prądu linii zasilającej spowodowane załączeniem obciążenia, co jest szczególnie widoczne na zamieszczonym w rys. 5b powiększeniu.



Rys. 5. Przebiegi wartości skutecznej prądu generowanego przez obciążenie I_{obc} oraz prądu linii zasilającej I_{linii} podczas działania układu filtru z zasobnikami energii: a) w szerokim horyzoncie czasowym (30 s); b) powiększenie jednej z chwil załączenia i kompensacji obciążenia

Wartość skuteczna 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. 6. Prąd linii ma charakter sinusoidalny i współfazowy z napięciem linii, a załączenie obciążenia nie ma już znaczącego wpływu na zmianę jego wartości.

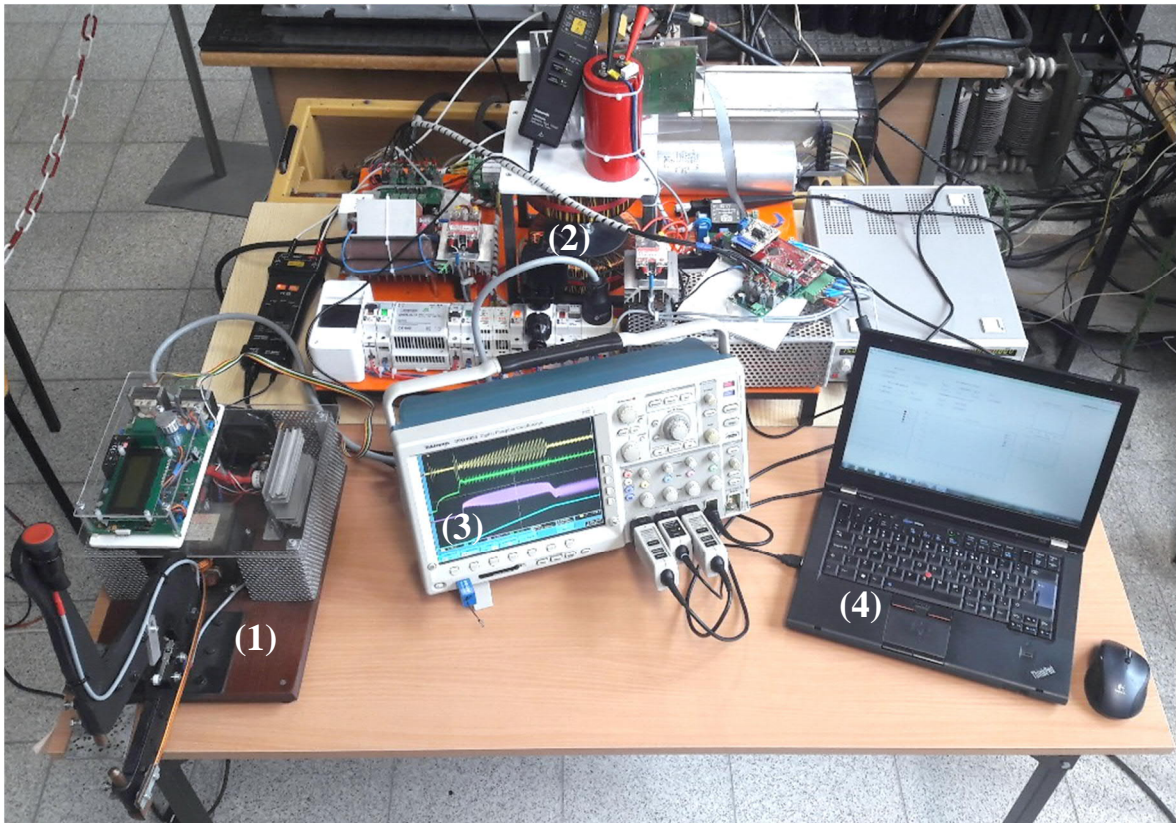


Rys. 6. Przebiegi prądu i napięcia linii zasilającej w chwili załączania obciążenia, podczas pracy filtra aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii

Główny nacisk podczas badań symulacyjnych, położono na jak najdokładniejsze odzwierciedlenie elementów układu, w szczególności sposobu działania sterowania układem, odzwierciedlającego rzeczywisty sterownik. Było to szczególnie istotne, ze względu na wykorzystywaną w pracy automatyczną generację kodu, podczas której zrealizowane w Simulink'u struktury sterowania i regulacji zostały bezpośrednio przeniesione na docelowy układ sterownika DSP.

Zaprojektowany i skonstruowany na podstawie badań symulacyjnych i przeprowadzonych analiz układ filtra aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii - przekształtnikiem DC/DC przedstawiono na rys. 7.

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.

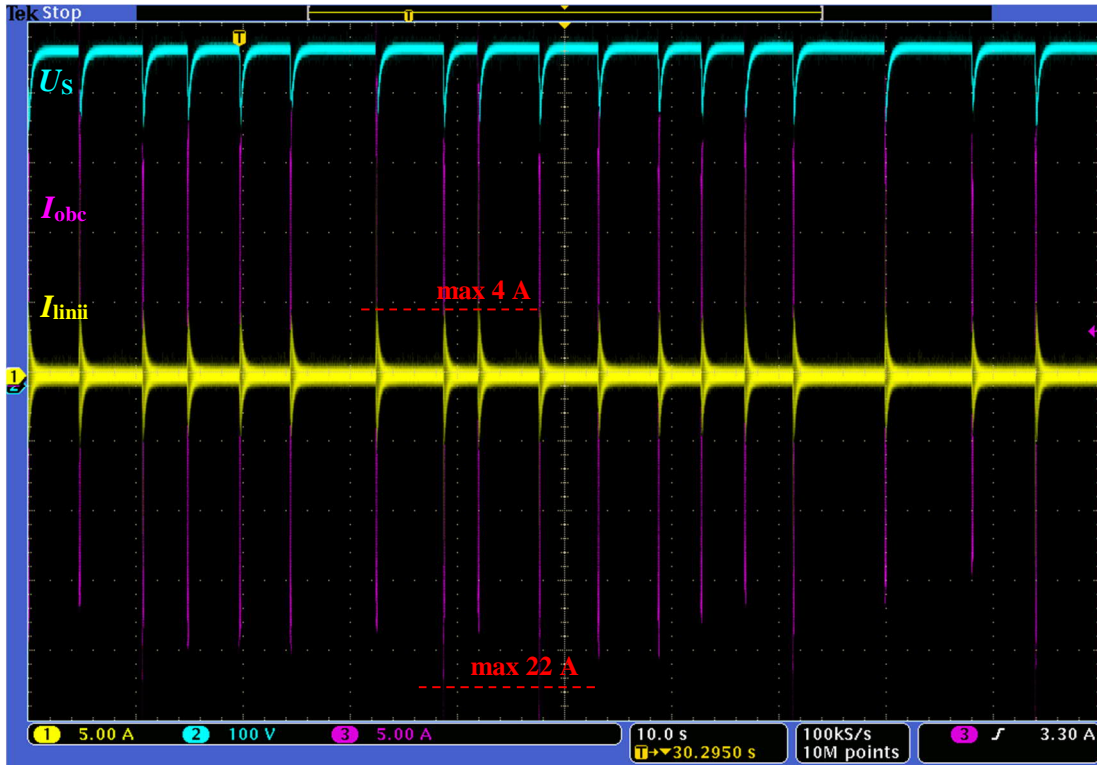


Rys. 7. Zrealizowane stanowisko badawcze podczas badań: (1)- obciążenie - zgrzewarka; (2)- filtr aktywny z dodatkowym zasobnikiem energii; (3)- oscyloskop; (4)- komputer z graficznym interfejsem użytkownika GUI

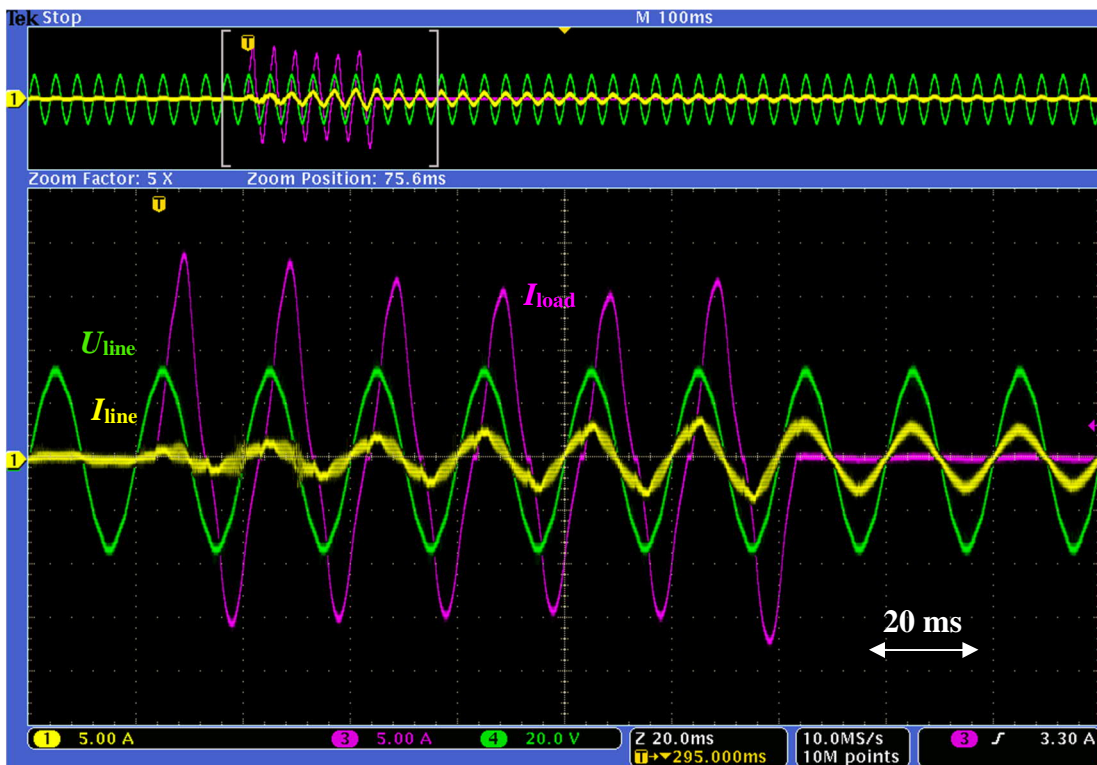
Jednym z badanych stanów dynamicznych był wpływ załączania obciążenia - jednofazowej zgrzewarki punktowej na prąd linii zasilającej podczas działania układu filtra aktywnego z zasobnikiem. W trakcie tego etapu prac, odzwierciedlono docelowe warunki pracy dla których projektowano układ. Kompensowano prąd przypadkowo załączonej zgrzewarki, pracującej ze stałym czasem zgrzewania ($t_1 = 6 \times 20$ ms) i ze stałą wartością kąta opóźnienia załączenia tyrystorów $\alpha = 70^\circ$. Zarejestrowane oscylogramy prądu linii zasilającej i obciążenia oraz napięcia w obwodzie przekształtnika DC/DC przedstawiono na rys. 8 (czas rejestracji przebiegów ograniczony do 100 s).

W wyniku pracy układu, wartość maksymalna prądu linii zasilającej nie przekroczyła 4 A, podczas gdy prąd wymuszany przez obciążenie dochodził w szczycie do ok. 22 A. Oznacza to ponad 80% redukcję wartości szczytowej prądu linii, a tym samym wymagań stawianych elementom doprowadzającym energię do kompensowanego obciążenia (np. przekrojowi przewodów).

a)



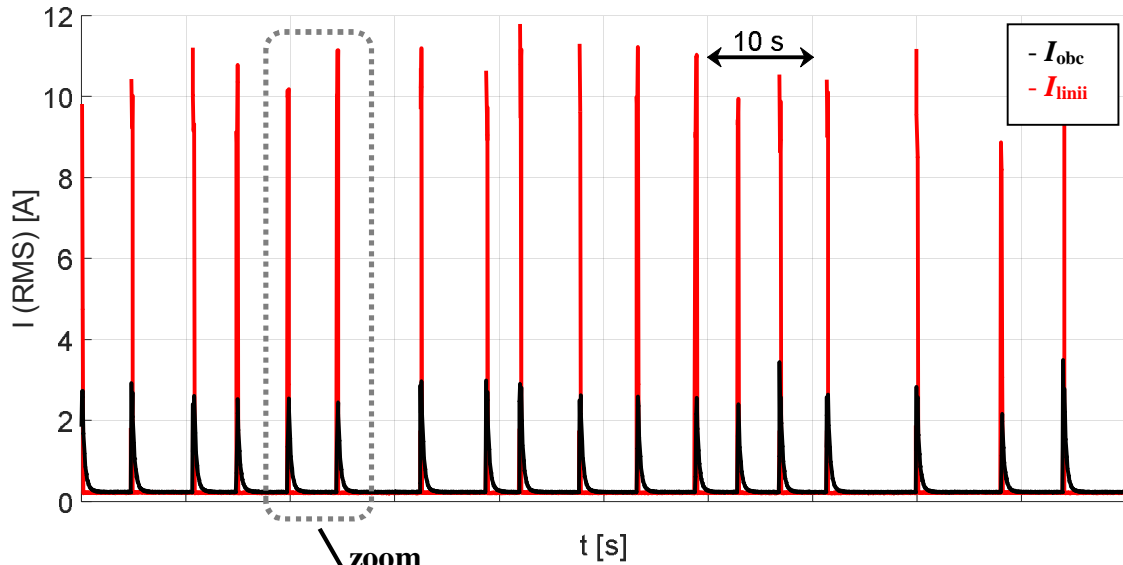
b)



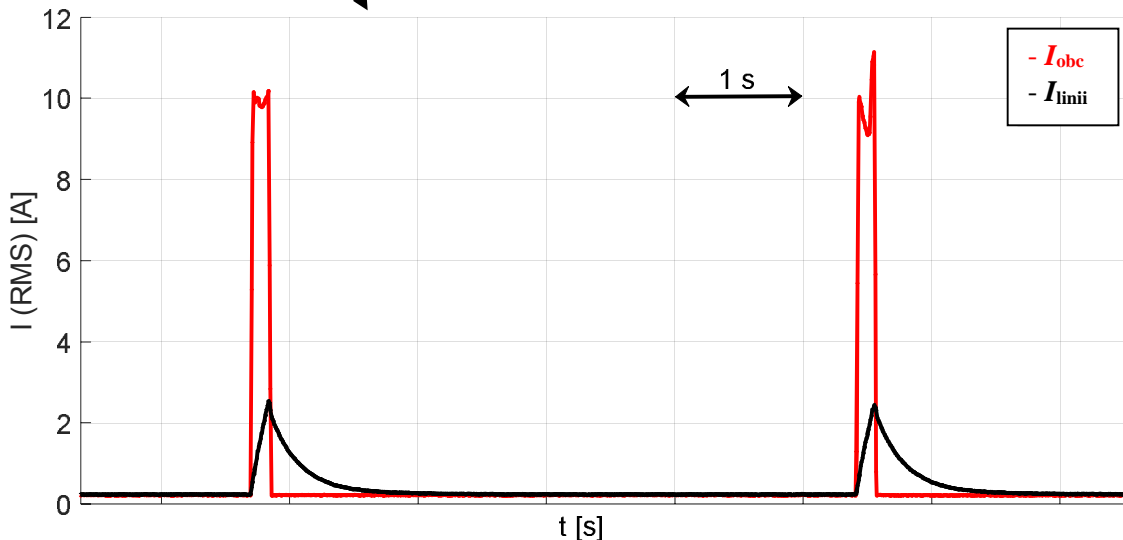
Rys. 8. Przebieg prądu obciążenia (I_{obc}), prądu linii zasilającej (I_{linii}) oraz napięcia w obwodzie przetwornicy DC/DC (U_s) podczas kompensacji obciążenia - zgrzewarki, załączanej przypadkowo na 6 okresów napięcia linii zasilającej (6x20 ms) z kątem opóźnienia załączenia tyrystorów wynoszącym 70° :
 a) szerszy horyzont czasowy obrazujący rozkład prądu linii zasilającej w czasie (100 s);
 b) powiększenie pojedynczego załączenia obciążenia

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądu linii zasilającej oraz prądu obciążenia, przedstawionych na rys. 8 wyznaczono wartości skuteczne (RMS) tych sygnałów. Wykres otrzymanych przebiegów w analizowanych horyzoncie czasowym przedstawiono na rys. 9.

a)



b)



Rys. 9. Przebiegi wartości skutecznej prądu linii zasilającej (I_{linii}) oraz prądu obciążenia (I_{obc}) podczas pracy układu: a) szeroki horyzont czasowy (100 s); b) powiększenie dwóch przykładowych chwil załączania kompensowanego obciążenia

Wartość skuteczna prądu obciążenia waha się w przedziale 10÷12 A, nawet mimo zachowania stałego kąta opóźnienie załączenia tyrystorów w układzie zgrzewarki. Działanie układu ogranicza wartość skuteczną prądu linii do ok. 2.5 A (prawie pięciokrotna redukcja wartości skutecznej prądu linii zasilającej). Potwierdza to zatem pełną realizację założonych celów stawianych urządzeniu.

Podsumowanie pracy oraz kierunki dalszych badań

W pracy przedstawiono idee działania układu filtru aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii. Zaprezentowano również metodykę doboru znajdujących się w układzie elementów pasywnych, ze zwróceniem szczególnej uwagi na uzasadnienie doboru zastosowanych zasobników energii, mających kluczowe znaczenie dla podejmowanych w pracy zagadnień, które bezpośrednio wpływają na jakość działania układu. W związku z tym, iż filtr musi zapewniać wsparcie dla kompensacji składowej nieaktywnej prądu, generowanej przez obciążenie, a zintegrowany z nim układ przekształtnika DC/DC jest odpowiedzialny za dostarczanie i absorpcje składowej aktywnej prądu.

Na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych opracowano model symulacyjny układu w środowisku Matlab & Simulink, który w dalszej kolejności posłużył realizacji praktycznej stanowiska laboratoryjnego. Zaprezentowane wyniki zilustrowały podstawowe stany pracy urządzenia oraz poprawną realizację stawianych mu celów. Umożliwiły ponadto analizę różnych scenariuszy testowych (np. dobór odpowiedniego sposobu rozruchu oraz optymalizację sterowania dla badanego typu obciążenia).

Przetestowany podczas badań symulacyjnych algorytm sterowania układem został wykorzystany do bezpośredniego zaprogramowania układu sterownika DSP (automatyczna generacja kodu). Poprawność działania tak zaprogramowanego sterownika została wstępnie sprawdzona z wykorzystaniem symulatora czasu rzeczywistego RTS.

Otrzymane w wyniku badań symulacyjnych oraz eksperymentu rezultaty w pełni potwierdzają, realizację postawionej w pracy tezy, do której głównych założeń zaliczono:

- ograniczenie wartości skutecznej prądu linii zasilającej, która dzięki działaniu układu jest znacznie mniejsza, niż wartość prądu samego odbiornika wynikająca z jego mocy czynnej (czterokrotna redukcja);
- otrzymanie sinusoidalnego (o dominującej podstawowej harmonicznej) i współfazowego z napięciem linii zasilającej prądu.

Praca przedstawia dwa charakterystyczne stany układu, jakimi są:

- rozruch układu - w wyniku którego znajdujące się w układzie pojemności są ładowane do swoich poziomów referencyjnych napięcia;
- docelowa praca układu - polegająca na kompensacji prądu zgrzewarki załączonej w przypadkowych odstępach czasu, ze stałym kątem zgrzewania.

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.

Bardzo istotnym zagadnieniem w trakcie badań nad tego typu układami, ze względu na stawiane im wymagania jest bilans energetyczny. Analiza przebiegów rzeczywistych prądów, podczas procesu zgrzewania oraz otrzymane na ich podstawie

zbieżne przebiegi symulacyjne umożliwiły m.in. zwymiarowanie elementów pasywnych występujących w strukturze jaki i przetestowanie skuteczności badanego rozwiązania.

Ze względu na losowe załączenia obciążenia oraz ich dowolny charakter, dalsza optymalizacja pracy omawianej konstrukcji będzie wymagała udoskonalenia sterowania, poprzez opracowanie zaawansowanego algorytmu zadawania prądu, umożliwiającego predykcję jego wartości w szerokim horyzoncie czasowym, na podstawie uprzednio zarejestrowanych zachowań obciążenia.

Do najbardziej istotnych i oryginalnych osiągnięć przeprowadzonych prac badawczych należy zaliczyć:

- opracowanie koncepcji działania układu oraz metodyki doboru znajdujących się w układzie elementów pasywnych;
- opracowanie modelu symulacyjnego ze szczególnym naciskiem na jak najdokładniejsze odzwierciedlenie elementów układu, co umożliwiło bezpośrednio zaprogramowania układu sterownika DSP (automatyczna generacja kodu);
- opracowanie układu sterownika przetestowanego na stanowisku symulatora czasu rzeczywistego RTS;
- opracowanie stanowiska laboratoryjnego (np. projekt i wykonanie płytek PCB, dwóch wersji sterownika, dławików, układu zasilania i zabezpieczeń) na podstawie przeprowadzonych analiz i badań symulacyjnych;
- opracowanie wyników eksperymentu potwierdzających wysoką skuteczność rozwiązania.

LITERATURA

- [1] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., „*Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits*”, Proceeding. of the International Power Electron. Conference, (JIEE IPEC), Tokyo/Japan, pp. 1375-1386, 1983
- [2] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., „*Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components*”, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-2, no. 3, pp. 625-631, 1984
- [3] Alcalá J., Cárdenas V., Miranda H., Pérez-Ramírez J., „*A three-phase back-to-back converter for reactive power compensation, current harmonic filtering and active power compensation*”, Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 2371-2377, 2013
- [4] Araujo Ribeiro R. L., Azevedo C. C., Sousa R. M., „*A Robust Adaptive Control Strategy of Active Power Filters for Power-Factor Correction, Harmonic Compensation, and Balancing of Nonlinear Loads*”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 2, pp. 718-730, 2012
- [5] Beres R. N., Wang X., Liserre M., Blaabjerg F., Bak C. L., „*A Review of Passive Power Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage-Source Converters*”, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 4, no. 1, pp. 54-69, 2016
- [6] Czarnecki L. S., „*Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005
- [7] Grabarek M., Strzelecki R., „*A novel approach to energy safety improvement in the marine power plants with active power surge compensator*”, 2 nd Annual Southern Power Electronics Conference, Auckland, pp. 1-6, 2016
- [8] Izhar M., Hadzer C. M., Syafrudin M., Taib S., Idris S., „*Performance for passive and active power filter in reducing harmonics in the distribution system*”, Power and Energy Conference PECon, Kuala Lumpur, pp. 104-108, 2004
- [9] Karuppanan P., Mahapatra K. K., Jeyaraman K., Viji J., „*Fryze power theory with adaptive-HCC based active power line conditioners*”, Power and Energy Systems, Chennai, 2011, pp. 1-6
- [10] Kazimierczuk M. K., „*Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*”, John Wiley & Sons, 2015
- [11] Lam C., et al., „*Design and Performance of an Adaptive Low-DC-Voltage-Controlled LC-Hybrid Active Power Filter With a Neutral Inductor in Three-Phase Four-Wire Power Systems*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 6, pp. 2635-2647, 2014
- [12] Maciążek M., Grabowski G., Pasko M., „*Active power filters – optimization of sizing and placement*”, Bulletin of the Polish Academy of Science Technical Science, vol. 61, no. 4, pp. 847- 853, 2013
- [13] Marrouchi S., Chebbi S., „*Active and reactive power compensation through a preventive defense strategy based on FACTS devices*”, Electrical Engineering and Software Applications, International Conference on, pp. 1-5, 2013
- [14] Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P., „*Power Electronics: Converters, Applications, and Design*”, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2003
- [15] Opal-RT Technologies, December 2016, <http://www.opal-rt.com/>
- [16] Parchomiuk M., Strzelecki R., Zymmer K., Domino A., „*Modular power converter with superconducting magnetic energy storage for electric power distribution system - Analysis and simulation*”, 19 th European Conference on Power Electronics and Applications,

Warsaw, pp. 1-6, 2017

- [17] Piróg S., „*Energoelektronika: układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*”, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, 2006.
- [18] Punchard W., „*A 300 kJ pulsed superconducting energy storage coil*”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 11, no. 2, pp. 508-511, 1975
- [19] Richelli A., Comensoli S., Kovacs Z. M., „*A DC/DC Boosting Technique and Power Management for Ultralow-Voltage Energy Harvesting Applications*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, pp. 2701-2708, 2012
- [20] Sowa K., Baszyński M., Piróg S., „*Jednofazowy energetyczny filtr aktywny z zasobnikiem energii do kompensacji wahań mocy czynnej w linii zasilającej*”, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 93, no. 3, pp. 260-266, 2017
- [21] Sowa K., Baszyński M., Piróg S., „*One phase active filter with energy storage for active power surge compensation in feed line*”, Archives of Electrical Engineering, vol. 65, no. 2, pp. 221-234, 2016
- [22] Staudt V., „*Fryze - Buchholz - Depenbrock: A time-domain power theory*”, International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, Lagow, 2008, pp. 1-12
- [23] Steiner M., Klohr M., Pagiela S., „*Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles*”, Power Electronics and Applications, European Conference on, pp. 1-10, 2007
- [24] Szkolny S., Małyszko O., „*Symulator typu hardware-in-the-loop do testowania generatorów turbin wiatrowych*”, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, vol. 103, no. 3, 2014
- [25] Xiao-li Ch., Da-qiang L., Wei-dong Z., „*Braking energy recovery for electric traction based on super-capacitor and Bidirectional DC-DC converter*”, Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), vol. 2, pp. 879-883, 2012
- [26] Xie H., Ängquist L., Nee H. P., „*Active Power Compensation of Voltage Source Converters with Energy Storage Capacitors*”, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, pp. 1012-1019, 2006
- [27] Zhang X., Tong D., Ding H., Xu D., „*Research of digital control bidirectional DC/DC converter based on ultra-capacitor*”, Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), vol. 3, Harbin, China, pp. 1545-1549, 2012
- [28] Zhou Z., Benbouzid M., Charpentier J. F., Scuif F., „*Energy storage technologies for smoothing power fluctuations in marine current turbines*”, Industrial Electronics (ISIE), Hangzhou, pp. 1425-1430, 2012

WYBRANE PUBLIKACJE DOKTORANTA

Czasopisma:

1. Stosur M., **Sowa K.**, Piasecki W., Płatek R., Balcerek P., „*Encapsulation of power electronics components for operation in harsh environments*”, Archives of Electrical Engineering, vol. 66, iss. 4, s. 855–866, 2017
2. **Sowa K.**, Baszyński M., Piróg S., „*Jednofazowy energetyczny filtr aktywny z zasobnikiem energii do kompensacji wahań mocy czynnej w linii zasilającej*”, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 93, no. 3, pp. 260-266, 2017
3. Stosur M., Szewczyk M., **Sowa K.**, Dawidowski P., Balcerek P., „*Thermal behaviour analyses of gas-insulated switchgear compartment using thermal network method*”, IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10,iss. 12, s. 2833-2841, 2016
4. **Sowa K.**, Baszyński M., Piróg S., „*One phase active filter with energy storage for active power surge compensation in feed line*”, Archives of Electrical Engineering, vol. 65, no. 2, pp. 221–234, 2016
5. Dawidowski P., **Sowa K.**, Stosur M., Szewczyk M., Balcerek P., „*Reduction of THD by switching frequency optimization in three-level NPC inverter*”, Przegląd Elektrotechniczny, R. 90 nr 8, s. 18–21, 2014
6. Dawidowski P., **Sowa K.**, Stosur M., Szewczyk M., „*Impact of power-cable length on operation of NPC inverter fed induction motor drive for various LC filter*”, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 89, no. 9, pp. 200-204, 2013

Konferencje:

1. Stosur M., **Sowa K.**, Kuczek T., Chmielewski T., Ruszczyk A., Koska K., Janisz K., „*Overvoltage protection of solid state switch for low voltage applications – simulation and experimental results*”, European EMTP-ATP conference, Kiel - Germany, 2017
2. Grecki F., Polit A., **Sowa K.**, „*Saturation impact on inductance value of cylindrical reactor*”, INDEL 2016 International Symposium on Industrial Electronics IEEE, Banja Luka, pp. 1-6, 2017
3. Stosur M., Kuczek T., Chmielewski T., Ruszczyk A., **Sowa K.**, „*Overvoltage protection of solid state switch - simulation and analysis*”, European EMTP-ATP conference, United Kingdom - Birmingham, pp. 184-195, 2016
4. Stosur M., Dawidowski P., Szewczyk M., Balcerek P., **Sowa K.**, „*Thermal studies for HV GIS compartment design*”, European EMTP-ATP conference, Grenoble – France, 2015
5. Stosur M., Dawidowski P., Szewczyk M., Balcerek P., **Sowa K.**, „*Modeling and simulation of thermal behavior within typical GIS busduct using ATP-EMTP program*”, European EMTP-ATP conference, Cagliari – Italy, 2014