

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

Katedra Elektroniki

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Optymalizacja Parametrów Pracy Przetwornicy DC-DC z szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym

Mgr inż. Rafał Widórek

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Stanisław Kuta

Kraków, 2014

Wstęp

Przeważająca większość urządzeń elektrycznych używanych w dzisiejszych czasach stosuje jakąś formę konwertera mocy. Zastosowania znajdują miejsce od produktów konsumenckich (np. zasilacze do telewizorów, komputerów przenośnych, ładowarek baterii), przez produkty oświetleniowe (np. lampy LED) do przemysłu automotive (np. ładowarki do baterii w samochodach elektrycznych). Każda z tych dziedzin stale podwyższa wymagania na parametry i wymiary przetwornic energii. Wyższa sprawność energetyczna, mniejsza objętość, mniejsza masa, większa niezawodność, surowe wymogi kompatybilności elektromagnetycznej to tylko kilka z wymogów stawianych przy projektowaniu przetwornic mocy. Sprawność tradycyjnych rozwiązań stosujących topologie z twardym przełączaniem ograniczona jest przede wszystkim przez energię traconą przy przełączaniu. Najnowsze osiągnięcia [1], [2], [3] starają się zredukować straty przełączania poprzez wprowadzenie nowych topologii quasi-rezonansowych. Alternatywą są rezonansowe przetwornice mocy, pozwalające na prawie całkowitą eliminację strat przełączania. Najprostsze topologie przetwornic rezonansowych posiadają wiele wad tj.: szeroki zakres częstotliwości niezbędny do pokrycia całego zakresu zmiany obciążeń, czy szczególnie wrażliwość na stany zwarcia. Najpopularniejsza topologia LLC posiada wiele zalet (mała liczba elementów, wąskie pasmo pracy), ale jest wrażliwa na gwałtowne stany zwarcia oraz słabo nadaje się do konstrukcji o dużej częstotliwości pracy (>200kHz) ze względu na pasożytniczą pojemność uzwojeń transformatora. Rozwiązaniem tych problemów jest zmiana topologii na topologię LCLC, charakteryzującej się naturalną odpornością na stan zwarcia. Dodatkowo, pojemność pasożytnicza uzwojeń transformatora rezonansowego wchodzi w skład obwodu rezonansowego, co ułatwia konstrukcje przetwornic o wysokich częstotliwościach pracy.

Dyplom zawiera opis nowej metody sterowania basującej na patencie PCT/EP2012/064379 nazwanej Sequential Cycle Stealing (SCS). Opisywana metoda polepsza sprawność energetyczną poprzez selektywne wygaszanie impulsów sterujących kluczami. W czasie kiedy impulsy sterujące są generowane, kontroler zapewnia warunki przełączania z zerowym napięciem. Natomiast, w czasie wygaszenia impulsów sterujących jeden z kluczy (w przypadku półmostka) pozostaje włączony w celu umożliwienia swobodnych oscylacji obwodu rezonansowego. Zmniejsza to rezystancję szeregową widzianą przez obwód rezonansowy i pozwala na wydłużenia czasu swobodnych oscylacji, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie strat mocy w przetwornicy. Ważnym elementem kontrolera SCS jest właściwa synchronizacja pierwszego impulsu sterującego z prądem rezonansowym, po okresie wygaszenia. Stosując wyżej opisaną metodę, wykorzystanie elementów mocy przetwornicy jest wydajniejsze, co bezpośrednio przekłada się na poprawę parametrów przetwornicy. Algorytm SCS bazuje na metodzie opisanej w patentach [4] i [5] których właścicielem jest Akademia Górniczo-Hutnicza. Badania zostały przeprowadzone w ramach grantu 65010 – "Innowacyjny zasilacz rezonansowy dużej mocy do pojazdów hybrydowych i elektrycznych" we współpracy z firmą Fideltronik Poland Sp. z o.o..

Cele rozprawy są następujące:

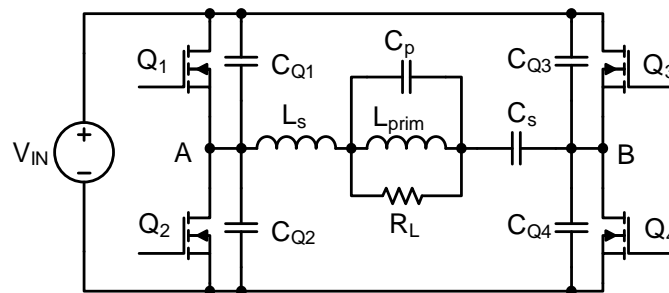
1.) Zaproponowana, nowa metoda sterowania rezonansowych przetwornic DC-DC, polegająca na selektywnym wygaszaniu impulsów sterujących tranzystorami rezonansowego stopnia mocy, zapewnia zwiększenie sprawności energetycznej przetwornicy z regulacją mocy wyjściowej

2.) Zaproponowany algorytm cyfrowego sterowania rezonansowych przetwornic DC-DC, dzięki zwiększeniu sprawności energetycznej stopnia mocy, umożliwi zintegrowanie wszystkich bloków funkcjonalnych przetwornicy w jednym module

3.) Selektywne wygaszanie impulsów sterujących tranzystory rezonansowego stopnia mocy, dzięki miękkiemu przełączaniu tranzystorów, zapewnia niską emisję zaburzeń elektromagnetycznych.

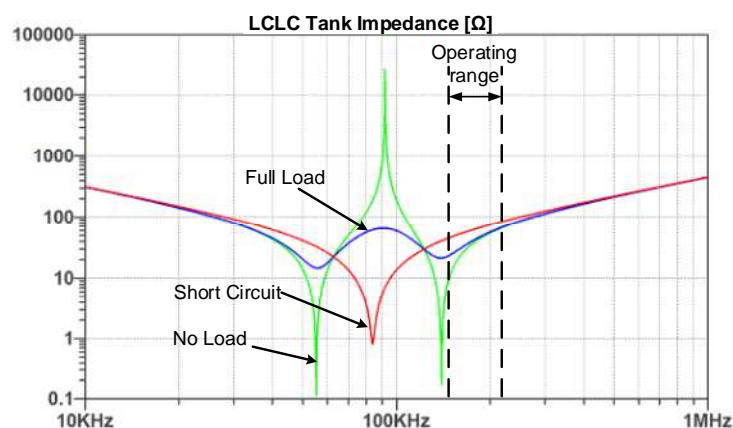
Rezonansowy inwerter LCLC

W celu bliższego zapoznania się z obiektem sterowania przedstawiony będzie krótki opis rezonansowego inwertera LCLC. Uproszczony schemat przetwornicy znajduje się na rys. 1



Rys. 1. Rezonansowy inwerter LCLC pracujący w klasie DE

Zastosowana konstrukcja opisana została w [6]. Jeżeli dobierzemy odpowiednio wartości obwodu rezonansowego, to przetwornica będzie posiadała naturalną odporność na stan zwarcia. W tym stanie przetwornica zmienia swój charakter ze źródła napięciowego na źródło prądowe i ogranicza moc wyjściową wraz ze zmniejszającą się rezystancją obciążenia R_L . Mechanizm ten zostanie wytłumaczony przy użyciu przykładowej przetwornicy LCLC. Charakterystyka impedancji obwodu rezonansowego od częstotliwości przedstawiona jest na rys. 2. Zauważmy, że w momencie zwarcia częstotliwość rezonansowa zmienia swoją pozycję w kierunku niższych częstotliwości. Oddala się zatem od obszaru pracy. Dzięki temu zapewniony jest indukcyjny charakter obwodu rezonansowego, a zarazem miękkie przełączanie kluczy. Dodatkowo, impedancja obwodu rezonansowego w zakresie pracy wzrasta, co przekłada się na spadek prądu rezonansowego i zmniejszenie mocy wyjściowej. Dodatkową zaletą obwodu LCLC jest wąski zakres zmian częstotliwości kluczującej potrzebnej do pokrycia całego zakresu zmian obciążenia wyjściowego – od zwarcia do rozwarcia.



Rys. 2. Impedancja obwodu LCLC względem częstotliwości dla różnych obciążeń

Nowa metoda sterowania – Sequential Cycle Stealing

Ostatnie badania nad technikami modulacji gęstości impulsów (PDM) doprowadziły do ciekawych wyników: [7], [8], [9], [10], [11]. Jednakże, większość badań skupia się na topologiach przetwornic drugiego rzędu (LC) i trzeciego rzędu (LLC). W związku z dobrymi wynikami dla powyższych topologii zaproponowano zastosowanie metody PDM do obwodu czwartego rzędu (LCLC). Zaproponowana metoda bazuje na metodzie opisanej patentach [4] i [5] których właścicielem jest Akademia Górniczo-Hutnicza. Koncepcja metody SCS

Zasada działania metody SCS opiera się na regulacji parametru wyjściowego (napięcie, prąd, itp.) poprzez selektywne wygaszanie impulsów sterujących przetwornicą mocy. Im więcej cykli jest wygaszonych tym mniej mocy jest doprowadzone go wyjścia przetwornicy. Największą różnicą pomiędzy dotychczasowymi rozwiązaniami a zaproponowaną metodą jest mechanizm pozostawienia włączonego jednego z kluczy (dwóch w przypadku pełnego mostka) na czas wygaszenia impulsów sterujących. Dzięki temu zmniejszona zostaje rezystancja szeregową widziana w obwodzie rezonansowym, co pozwala na wydłużenie czasu swobodnych oscylacji. W ten sposób zachowana jest większa ilość energii w obwodzie rezonansowym, co znacząco zwiększy sprawność przetwornicy. Dodatkowo, w czasie swobodnych oscylacji zmniejsza się częstotliwość prądu rezonansowego, co bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie strat w obwodzie rezonansowym. Występują tutaj dwa mechanizmy. Z powodu mniejszej częstotliwości zmniejsza się rezystancja AC uzwojeń indukcyjności oraz transformatora poprzez zmniejszenie efektów naskórkowych i zbliżeniowych. Drugim mechanizmem jest zmniejszenie strat w rdzeniu ferromagnetycznym. W najprostszym przybliżeniu straty rdzenia możemy opisać przy pomocy równania Steinmetz'a:

$$P_{loss} = V_e \cdot K \cdot f^\alpha \cdot B_{pk}^\beta$$

V_e – objętość rdzenia

K, α, β – współczynniki materiałowe

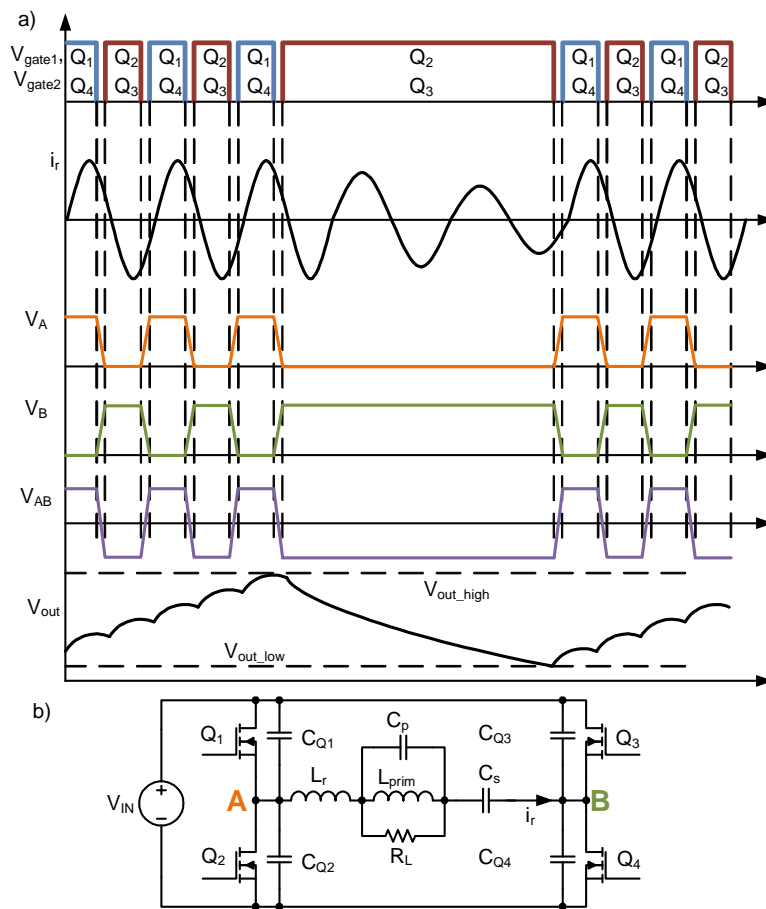
f – częstotliwość pracy

B_{pk} – szczytowa wartość indukcji magnetycznej

Zwykle α przyjmuje wartość pomiędzy 1.2, a 2, natomiast β przyjmuje wartość pomiędzy 2, a 3. Widać zatem, że nawet niewielkie zmniejszenie częstotliwości pracy, lub wartości szczytowej indukcji magnetycznej istotnie wpływa na ilość strat generowanych w rdzeniu.

Ważnym aspektem sterowania SCS jest zagwarantowanie prawidłowego miękkiego przełączania kluczy. Rys. 3 zawiera przykładowe przebiegi przetwornicy pracującej z algorytmem SCS. Sygnał sterujący bramkami V_{gate1} podawany jest na klucze Q_1 i Q_4 , natomiast sygnał V_{gate2} podawany jest na klucze Q_2 i Q_3 . Przebieg i_r przedstawia prąd rezonansowy, V_{out} przedstawia wyprostowane napięcie wyjściowe (prostownik nie jest umieszczony na rysunku). Warto podkreślić, że częstotliwość prądu w obwodzie rezonansowym w trakcie kluczowania jest większa od częstotliwości w trakcie wygaszenia impulsów. Dzieje się tak z powodu tego, że własna częstotliwość rezonansowa obwodu jest mniejsza od częstotliwości kluczowania. Dodatkowo, częstotliwość swobodnych oscylacji nie jest stała i zmienia się w zależności od obciążenia, temperatury, itp. Zatem, w celu zagwarantowania miękkiego przełączania kluczy, niezbędny jest pomiar wartości chwilowej prądu rezonansowego i_r .

Dzięki temu uzyskamy informację na temat znaku i wartości bezwzględnej prądu rezonansowego. Umożliwi to wybranie właściwego momentu do miękkiego włączenia klucza. Jest to szczególnie istotne dla pierwszego włączenia klucza po okresie wygaszenia.



Rys. 3. Podstawowe przebiegi przetwornicy pracującej z algorytmem SCS a) przebiegi w przetwornicy, b) rezonansowa przetwornica klasy DE z obwodem LCLC

Algorytm SCS przebiega w następujący sposób. Załóżmy, że przetwornica jest w stanie ciągłego kluczowania. Napięcie wyjściowe V_{out} stopniowo narasta, aż osiągnie z góry określony próg V_{out_high} . W momencie osiągnięcia tego progu następuje zatrzymanie kluczowania, a ostatnio załączone klucze pozostają włączone. Obwód rezonansowy przechodzi w stan swobodnych oscylacji, natomiast amplituda prądu rezonansowego oraz wartość napięcia wyjściowego stopniowo zmniejszają się. Kiedy napięcie wyjściowe osiągnie próg V_{out_low} następuje synchronizacja do prądu rezonansowego i kluczowanie rozpoczyna się na nowo.

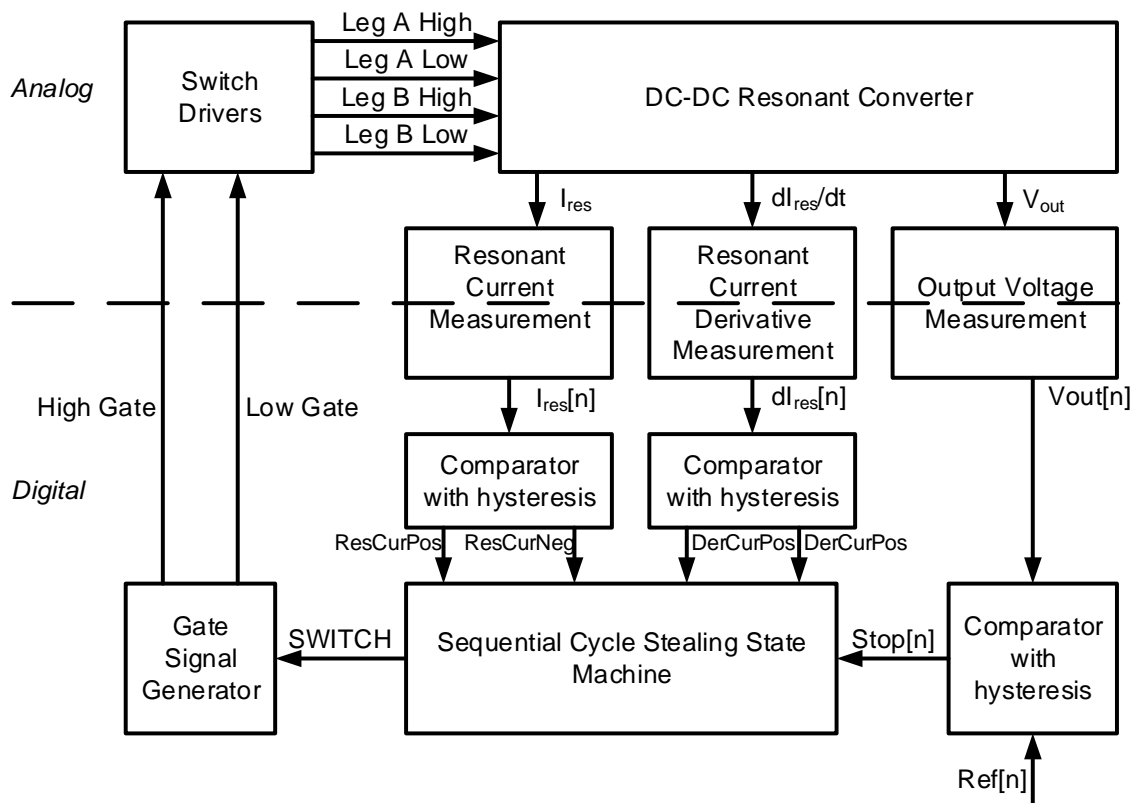
Istnieje ryzyko, że w czasie wygaszenia amplituda prądu rezonansowego spadnie do poziomu, kiedy nie będzie już możliwa prawidłowa synchronizacja w celu uzyskania miękkiego przełączenia. Aby temu zapobiec, dodano mechanizm podtrzymania prądu rezonansowego. Kontroler mierzy wartość RMS prądu rezonansowego i jeżeli spadnie ona poniżej zadanego progu, generowane jest pojedyncze przełączenie kluczy, które jest synchronizowane do prądu rezonansowego. Czynność jest powtarzana dopóki RMS prądu rezonansowego nie wzrośnie powyżej progu.

Warto podkreślić, że w przeciwieństwie do metody prezentowanej w [4] i [5] nie jest optymalnym pozostawianie włączonej tej samej pary kluczy na czas wygaszenia. Załóżmy, że

przetwornica pracuje z częściowym obciążeniem. W przypadku pozostawiania włączonej tej samej pary kluczy, przewodzą one prąd rezonansowy przez znacznie dłuższy czas niż pozostała para kluczy. Powoduje to nierównomierny wzrost temperatury pomiędzy dwoma parami kluczy. Skutkiem tego jest zmniejszona sprawność obwodu (zwiększenie strat tranzystorów MOSFET) i zmniejszenie niezawodności przetwornicy (kluczy pracują w wyższej temperaturze. Aby zbalansować obciążenie obu par kluczy wprowadzono mechanizm, który zmienia parę włączonych kluczy przy każdym wygaszeniu.

Kontroler składa się z komparatora napięcia wyjściowego, maszyny stanów SCS oraz generator przebiegów sterujących kluczami. Uproszczony schemat zasilacza wraz z kontrolerem SCS przedstawiony jest na rys. 4. Napięcie wyjściowe (po spróbkowaniu) podawane jest na komparator z histerezą, który generuje sygnał STOP. Sygnał STOP przyjmuje wartość '1' kiedy napięcie wyjściowe jest powyżej progu komparatora i '0' w przeciwnym przypadku. Kiedy sygnał STOP jest równy '1', to przetwornica kluczuje. Kiedy STOP='0' to przetwornica przechodzi w stan wygaszenia i pozostawiona jest włączona jedna z par kluczy.

W celu znalezienia odpowiedniego momentu włączenia kluczy potrzebne są cztery sygnały sterujące: ResCurPos (prąd rezonansowy ma wartość dodatnią), ResCurNeg (prąd rezonansowy ma wartość ujemną), DerCurPos (pochodna prądu rezonansowego ma wartość dodatnią) oraz DerCurNeg (pochodna prądu rezonansowego ma wartość ujemną). Sygnały te są generowane przy użyciu komparatorów z regulowaną histerezą.

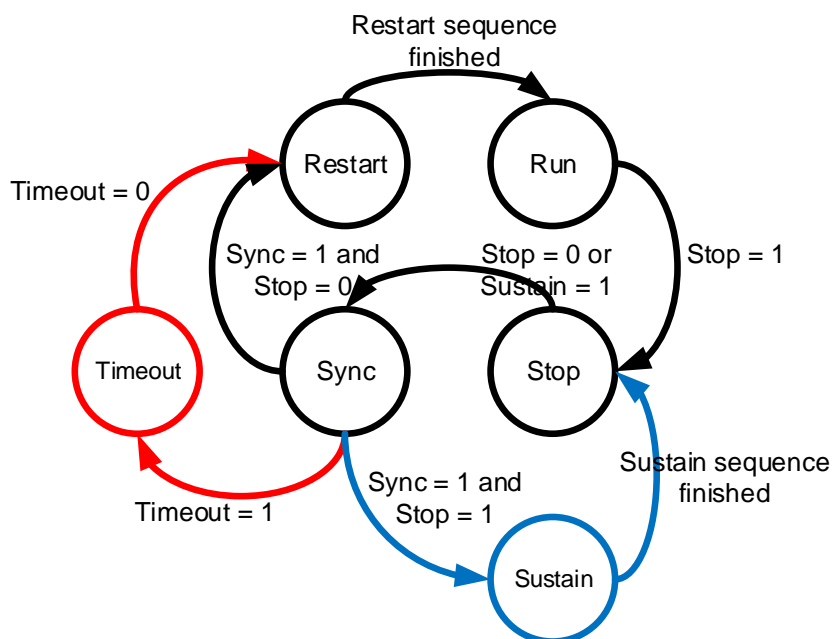


Rys 4. Schemat blokowy implementacji kontrolera SCS w układzie FPGA

Maszyna stanów kontrolera SCS przedstawiona jest na rys. 5. Może ona przyjąć jeden z 6 stanów:

- Run,
- Stop,
- Sync,
- Restart,
- Sustain,
- Timeout.

W stanie Run kontroler generuje sygnały sterujące kluczami na wybranej stałej częstotliwości. W tym stanie dostarczana jest energia do obwodu wyjściowego. Kiedy napięcie wyjściowe przekroczy górny próg komparatora sygnał STOP zmienia wartość na '1', maszyna stanów przechodzi do stanu Stop i kluczkowanie zostaje wstrzymane. Są dwa możliwe wyjścia z tego stanu. Pierwsze wystąpi kiedy napięcie wyjściowe opadnie poniżej progu komparatora. Maszyna przejdzie wtedy do stanu Sync. Drugie wystąpi kiedy wartość RMS prądu rezonansowego spadnie poniżej zadanego progu. Maszyna przejdzie wtedy do stanu Sync. W stanie Sync kontroler czeka aż wystąpią warunki poprawnej synchronizacji. Przyjęte kryteria są następujące. Wartość bezwzględna prądu rezonansowego jest powyżej progu (sygnał ResCurPos lub ResCurNeg = '1') oraz pochodna prądu jest ujemna dla przejścia półmostka Niski-Wysoki lub jest dodatnia dla przejścia półmostka Wysoki-Niski. Jeśli warunki te są spełnione maszyna przechodzi do stanu Sustain w przypadku gdy STOP = '1' lub przechodzi do stanu Restart gdy STOP = '0'; W stanie Restart dokonywana jest ustalona sekwencja przełączeń, składająca się z kilku synchronizowanych przełączeń oraz kilku przełączeń o stałym czasie włączenia. Złożona sekwencja ma na celu zagwarantowanie poprawnego przełączania kluczy w czasie restartu kluczkowania. Kiedy sekwencja startowa się zakończy maszyna samoistnie przechodzi do stanu Run. W stanie Sustain kontroler dokonuje pojedynczego przełączenia i wraca do stanu Stop. Ostatni stan to Timeout. Występuje on wtedy gdy z jakichś przyczyn kontroler nie zdołał zsynchronizować się poprawnie do prądu rezonansowego. W stanie tym wszystkie klucze są wyłączone na określony czas, a następnie kontroler przechodzi do stanu Run. W trakcie normalnej pracy kontroler nie wchodzi do stanu Timeout.

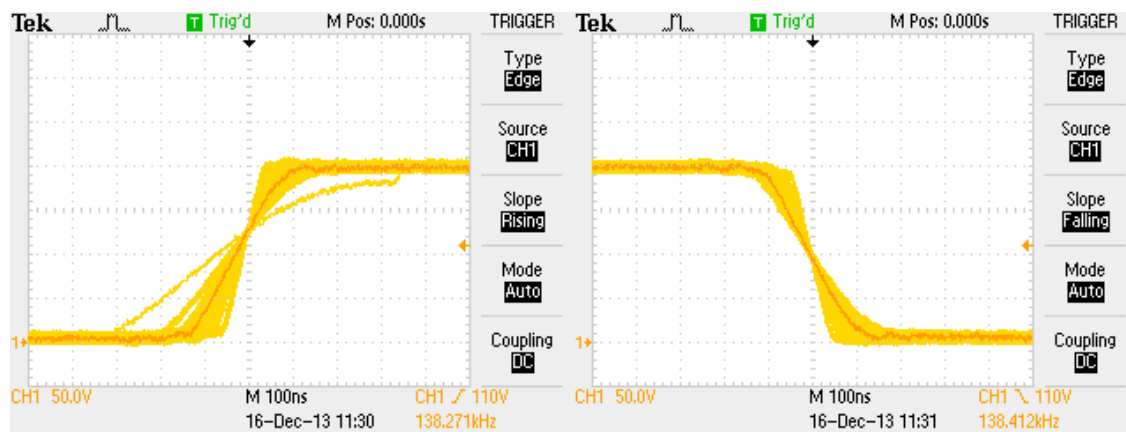


Rys. 5. Maszyna stanów kontrolera SCS

Wyniki Pomiarów

Pomiar przebiegów został wykonany przy obniżonym napięciu zasilania do 200V ze względów bezpieczeństwa. Doświadczenie pokazuje że przetwornica LLC zachowuje podobne właściwości przy napięciu 200V i 400V. Należy jedynie przeskalować napięcie wyjściowe do wartości o połowę mniejszej (z 48V na 24V). Zmniejszy się także o połowę prąd wyjściowy (z 60A na 30A) oraz czterokrotnie moc wyjściowa (z 3000W na 750W).

Najważniejszym pomiarem jest weryfikacja miękkiego przełączania kluczy mostka. Ze względu na symetrię mostka, wystarczą pomiary w jednej gałęzi. Rys 6 zawiera przebiegi napięcia w środku półmostka dla obciążenia 85% przy sterowaniu SCS.

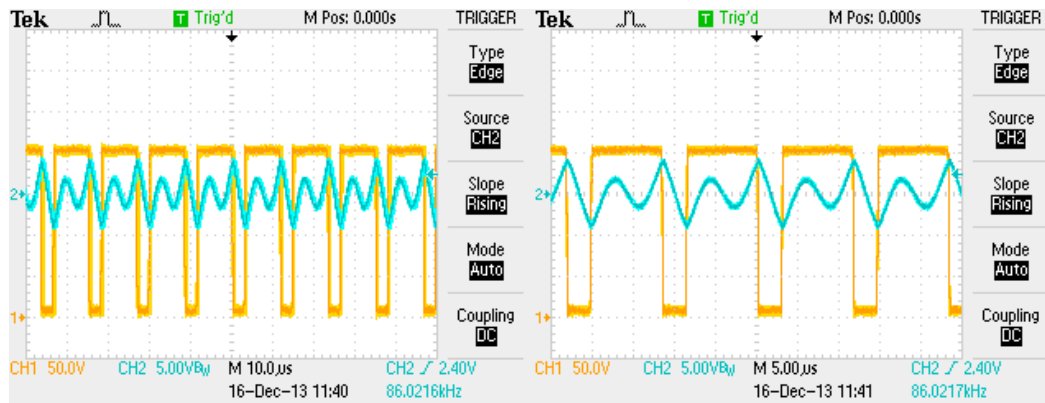


Rys. 6. Kontrola SCS; Narastające zbcze (lewy) i opadające zbcze (prawy) w jednej z gałęzi mostkaw warunkach: $I_{oad} = 26.6A$ (85% mocy), $V_{out} = 23.44V$

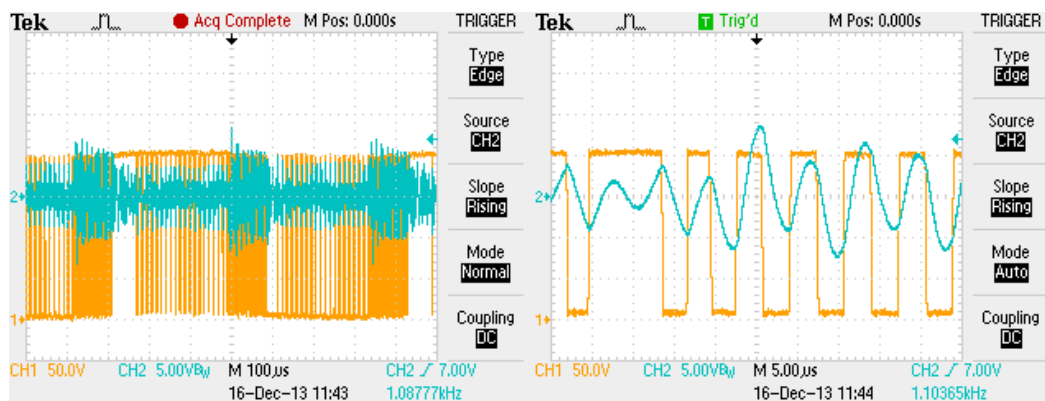
Jak można zauważyć, znacząca większość przełączeń jest miękka. Tylko niektóre przełączenia są pół-twarde, przełączając ok. 10% napięcia zasilania. Pomiary wykazały, że Miękkie przełączanie zachowane jest w całym zakresie zmian obciążenia wyjściowego.

Kolejnym pomiarem jest pomiar przebiegów napięcia na środku półmostka oraz prądu rezonansowego. Wyniki pomiarów przedstawione są na rys. 7 do rys. 9. Rys. 7 przedstawia sytuację bez obciążenia. W tym przypadku można zaobserwować działanie mechanizmu podtrzymania prądu rezonansowego. Kontroler kluczuje okresowo w celu utrzymania wartości RMS prądu rezonansowego na zadanym poziomie. Z rysunku można odczytać, że średnia częstotliwość pracy jest ok. 2 razy niższa od normalnej częstotliwości pracy. Pomimo, że kluczowanie nadal występuje relatywnie często, to obniżenie średniej częstotliwości o połowę nadal poprawi sprawność przetwornicy.

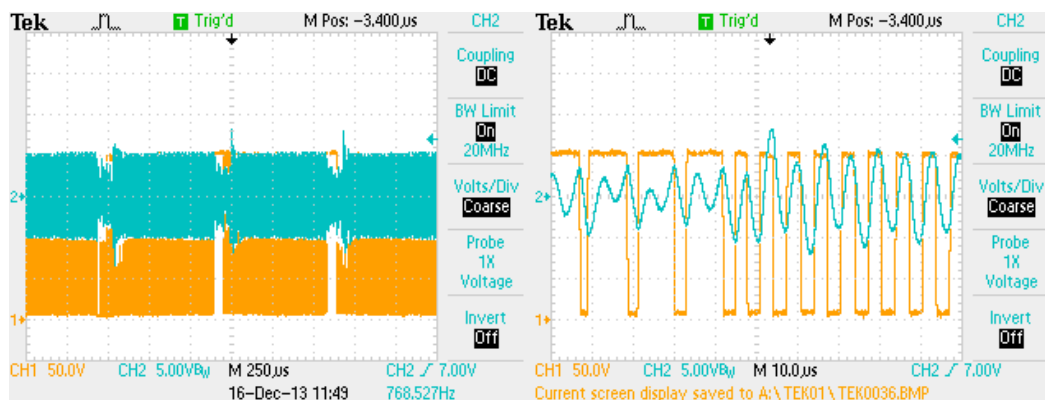
Przebiegi dla 25% obciążenia przedstawione są na rys. 8. Z przebiegów łatwo można rozróżnić poszczególne stany pracy przetwornicy z algorytmem SCS, tj Run, Stop oraz Sustain. W momencie kiedy amplituda prądu rezonansowego jest największa przetwornica pracuje w stanie Run. W momencie kiedy amplituda prądu jest mniejsza kontroler na przemian znajduje się w stanie Stop i Sustain. Z przebiegów można także odczytać, że w przetwornicy występują „paczki” przełączeń. Jak się okazało podczas pomiarów, paczki te odpowiadają za powstanie słyszalnych dźwięków generowanych przez elementy indukcyjne przetwornicy. Kolejna wersja kontrolera powinna skupić się nad rozproszeniem „paczek” w celu redukcji poziomu generowanych dźwięków.



Rys. 7. Przebiegi SCS: (1) napięcie jednej z gałęzi mostka, (2) prąd rezonansowy w warunkach $I_{load} = 0A$ (0% load), $V_{out} = 26.48V$

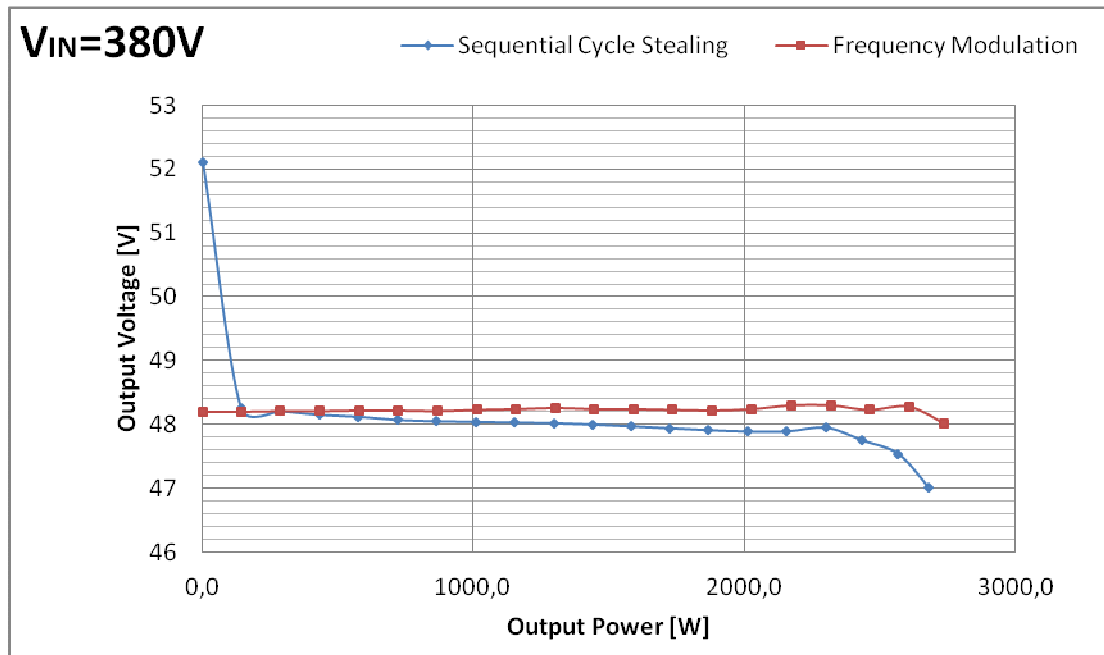


Rys. 8. Przebiegi SCS: (1) napięcie jednej z gałęzi mostka, (2) prąd rezonansowy w warunkach: $I_{load} = 7.8A$ (25% load), $V_{out} = 23.52V$



Rys. 9. Przebiegi SCS: (1) napięcie jednej z gałęzi mostka, (2) prąd rezonansowy w warunkach: $I_{load} = 26.6A$ (85% load), $V_{out} = 23.44V$

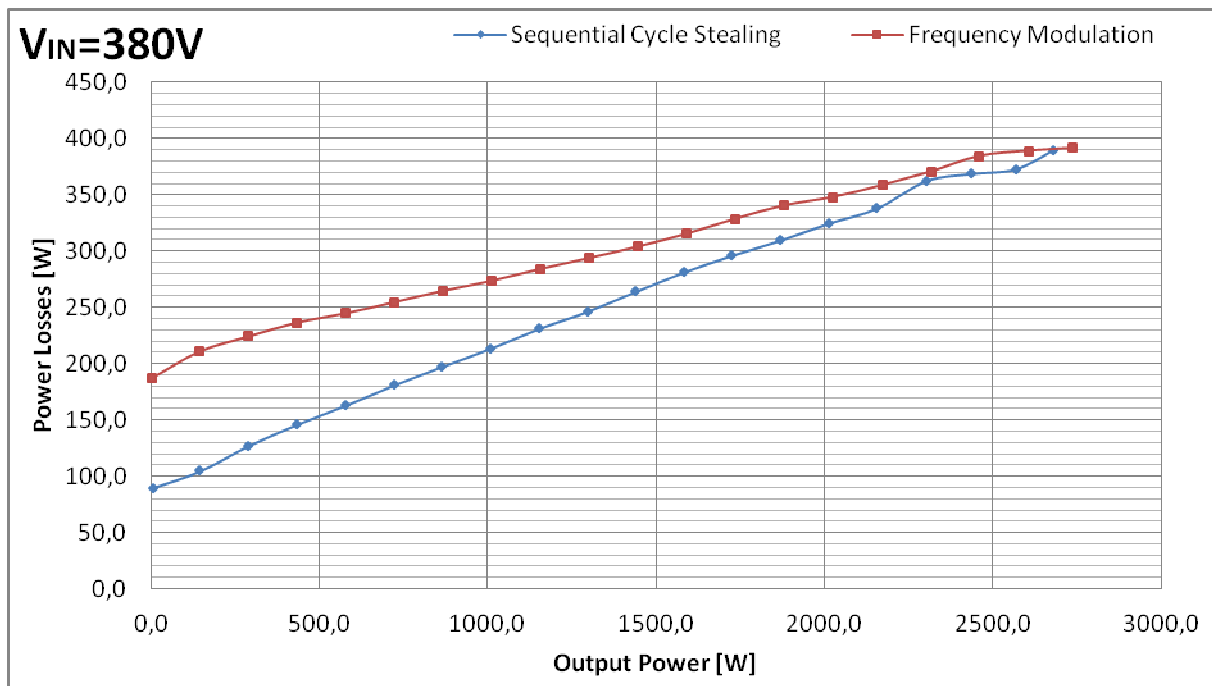
Kolejnym pomiarem jest weryfikacja stabilności napięcia wyjściowego w zależności od obciążenia. Wyniki pomiarów napięcia wyjściowego od mocy wyjściowej zamieszczone są na rys. 10.



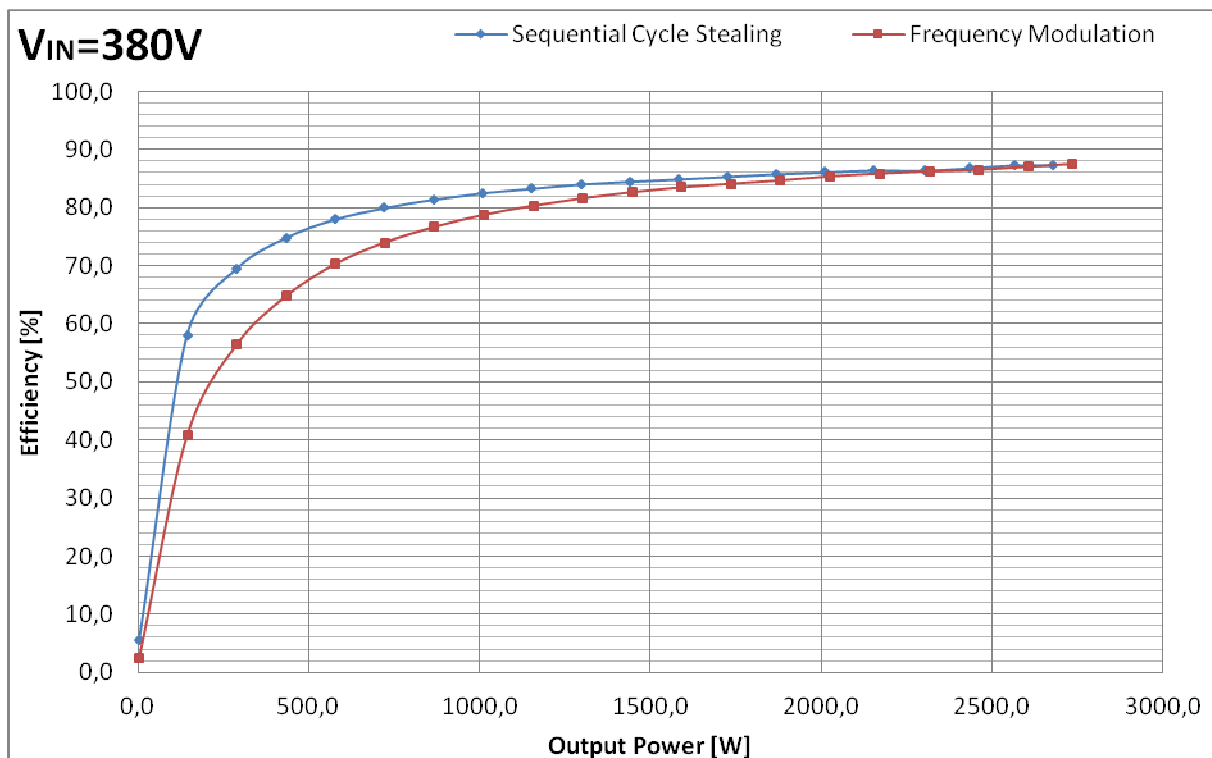
Rys. 10. Napięcie wyjściowe w zależności od mocy wyjściowej dla napięcia zasilania 390V

Modulacja FM charakteryzuje się lepszą stabilizacją napięcia wyjściowego. Bieżąca wersja kontrolera SCS charakteryzuje się spadkiem napięcia wyjściowego wraz ze wzrostem mocy wyjściowej.

Jednym z istotniejszych parametrów przetwornicy jest sprawność energetyczna. Pomiarów dokonano razem z aktywnym układem korekcji współczynnika mocy (PFC) oraz filtrem wejściowym z zasilaniem z sieci 230V. Pomiarów uwzględniają pobór mocy przez zasilacz pomocniczy dla układu PFC oraz dla przetwornicy rezonansowej, natomiast nie zawierają poboru mocy przez płytę sterującą. Wyniki pomiarów strat mocy przedstawiono na rys. 11 sprawności na rys. 12.



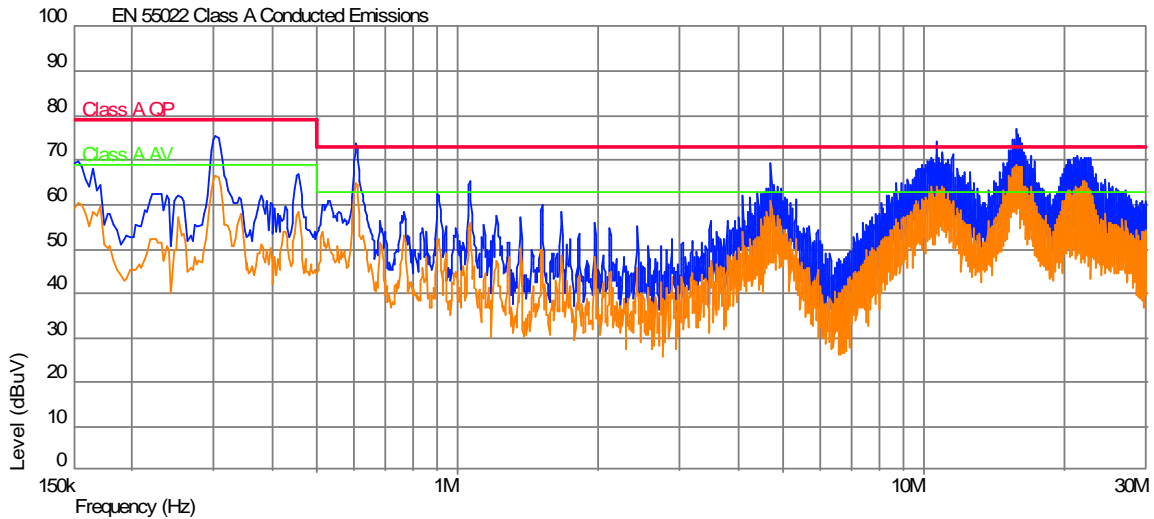
Rys. 11. Straty mocy w przetwornicy w zależności od mocy wyjściowej



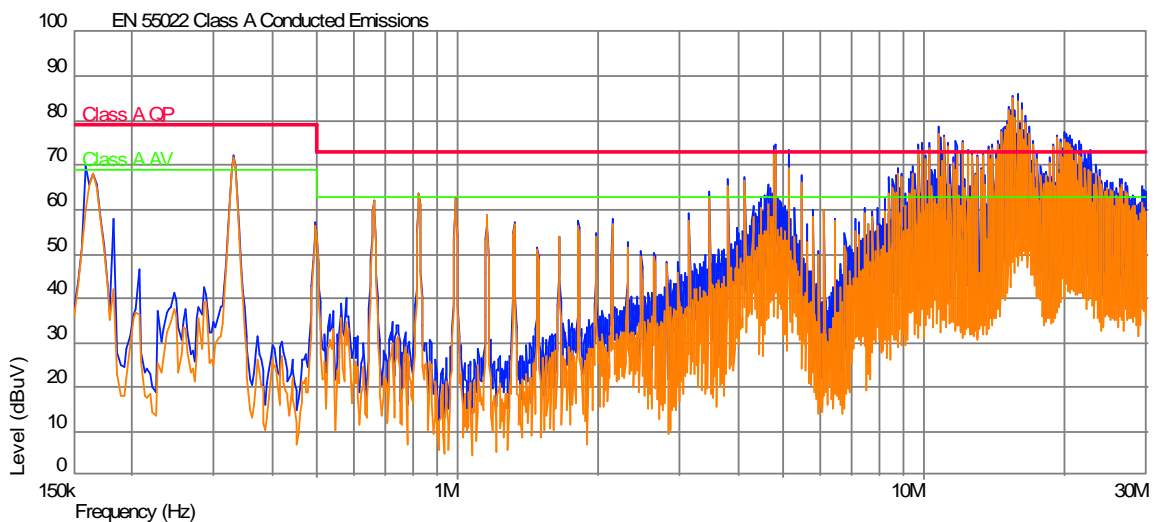
Rys. 12. Sprawność przetwornicy w zależności od mocy wyjściowej

Metoda SCS charakteryzuje się znaczącą poprawą sprawności w zakresie poniżej 50% obciążenia. Sprawność zrównuje się z metodą FM dla obciążeń powyżej 60%.

Dokonano także pomiarów generowanych przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych przez przetwornicę rezonansową. Pomiarów dokonano przy 30% obciążenia przy zasilaniu sieciowym 230V. Wyniki przedstawione są na rysunkach 13 oraz 14.



Rys. 13 Pomiar zaburzeń przewodzonych dla SCS



Rys 14. Pomiar zaburzeń przewodzonych dla FM

Wyraźne rezonanse znajdujące się na 4MHz i ok 15MHz są wynikiem niezoptymalizowanego filtra wejściowego. Warto zauważyć że w przypadku metody FM wartość średnia ma zbliżony poziom do wartości quasi-szczytowej. W przypadku metody SCS poziom wartości średniej jest znacznie niższy od wartości quasi-szczytowej.

Podsumowanie

Dysertacja skupiła się na znalezieniu metody pozwalającej na poprawę parametrów pracy przetwornicy rezonansowej z szeregowo-równoległym obwodem rezonansowym LCLC. Praca zawiera opis nowej metody Sequential Cycle Stealing wywodzącej się z metod PDM. W bieżącej wersji napięcie wyjściowe jest stabilizowane przy pomocy komparatora z histerezą. Z tego powodu metoda ta dziedziczy wszystkie wady sterowania komparatorem z histerezą. W przyszłości pożądane jest

znalezienie lepszej metody stabilizacji napięcia wyjściowego. Metoda SCS została usprawniona o mechanizm podtrzymania prądu rezonansowego oraz o poprawiony mechanizm synchronizacji z prądem rezonansowym. Dzięki wykorzystaniu cech metody SCS możliwa jest poprawa sprawności przetwornicy oraz zmniejszenie emisji przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych.

Pomiary wykazują na znaczącą poprawę sprawności dla małych obciążeń sięgającej 14%. Dodatkowo zaburzenia przewodzone zostały obniżone o ok. 10dB. Umożliwia to na użycie mniejszych filtrów wejściowych. Podsumowując, cele pracy doktorskiej zostały spełnione

Bibliografia

- [1] H. Youn, K. Park, H. Seong, G. Moon and M. Youn, "PWM Positive Buck-Boost Converter with Reduced Switching Loss employing Quasi-Resonant Operation," in IEEE Energy Conversion Congress and Exposition ECCE'10, Atlanta, 2010.
- [2] G. Huang, T. Liang and K. Chen, "Losses Analysis and Low Standby Losses Quasi-Resonant Flyback Converter Design," in IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS'12, Seoul, 2012.
- [3] I. Barbi, J. Bolacell, D. Martins and F. Libano, "Buck Quasi-Resonant Converter Operating at Constant Frequency: Analysis, Design and Experimentation," in Power Electronics Specialists Conference PESC'89, Milwaukee, 1990.
- [4] C. Worek, "A method for controlling a resonant-mode power supply and a resonant-mode power supply with a controller". International Patent PCT/EP2012/064379, 2013.
- [5] C. Worek, "Sposób sterowania zasilaczem rezonansowym i zasilacz rezonansowy ze sterownikiem". Poland Patent PL395844, 2011.
- [6] C. Worek, R. Widórek and S. Ligenza, "Integrated Magnetic Component in a 2kW Resonant Power Supply," in European Conference on Power Electronics and Applications EPE'2013, Lille, 2013.
- [7] J. T. Matysik, "The Current and Voltage Phase Shift Regulation in Resonant Converters With Integration Control," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007.
- [8] J. T. Matysik, "A New Method of Integration Control With Instantaneous Current Monitoring for Class D Series-Resonant Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006.
- [9] H. Fujita and H. Akagi, "Pulse-Density-Modulated Power Control of a 4 kW, 450 kHz Voltage-Source Inverter for Induction Melting Applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, 1996.
- [10] S. W. H. D. HAAN, "A New Integral Pulse Module for the Series-Resonant Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1984.
- [11] D. J. Tschirhart and P. K. Jain, "Variable Frequency Pulse Density Modulation for Efficient High Frequency Operation of Series Resonant Converters Operating as Voltage Regulators," in Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010.