

Wielopoziomowe przekształtniki DC-DC z tranzystorami z azotku galu GaN

Streszczenie

Rezonansowe przekształtniki DC-DC o przełączanych kondensatorach stanowią grupę dynamicznie rozwijanych układów energoelektronicznych. Wciąż opracowywane są nowe topologie umożliwiające wielokrotne zwiększanie lub obniżanie napięcia przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej sprawności tego procesu. Wspomniane właściwości tego typu układów są szczególnie istotne w zastosowaniach, takich jak mikroinstalacje fotowoltaiczne czy systemy zasilania superkomputerów. Ponadto, dzięki wyeliminowaniu elementów indukcyjnych z procesu przekształcania energii, układy te charakteryzują się kompaktowymi wymiarami, niewielką masą oraz możliwością pracy w szerokim zakresie temperatur otoczenia. Wspomniane właściwości układów rezonansowych o przełączanych kondensatorach istotnie zwiększają ich potencjał aplikacyjny i czynią je konkurencyjnymi dla klasycznych przekształtników, których podstawę działania stanowią właściwości wykorzystywanych do ich budowy elementów indukcyjnych.

Pierwszym etapem prac związanych z przygotowaniem niniejszej rozprawy doktorskiej było opracowanie innowacyjnej topologii wielopoziomowego przekształtnika HVGDC (ang. *High Voltage Gain Direct Current Converter*) charakteryzującego się sześciokrotnym wzmocnieniem napięciowym, możliwością siedmiostopniowej regulacji napięcia wyjściowego, relatywnie niewielką liczbą zastosowanych tranzystorów oraz niskimi wartościami napięć występujących na poszczególnych łącznikach. Ponadto, zaproponowany przekształtnik cechuje wysoka sprawność realizacji procesu przekształcania energii, a wprowadzenie go w tryb pracy ZVS (ang. *Zero Voltage Switching*) umożliwia dalsze ograniczenie strat poprzez minimalizację tych związanych z występowaniem pojemności wyjściowej tranzystorów (C_{oss}).

W ramach prowadzonych prac badawczych dokonano analizy porównawczej dwóch przekształtników o topologii HVGDC. Do budowy pierwszego z porównywanych układów wykorzystano tranzystory typu CoolMOS, a drugi wykonano na podstawie projektu zakładającego zastosowanie w obwodzie mocy przekształtnika tranzystorów typu CoolGaN. Celem wspomnianej analizy było wykazanie różnic w pracy wielopoziomowych przekształtników o przełączanych kondensatorach, wynikających z zastosowania różnego typu łączników do ich budowy, ujawniających się w przebiegach prądów i napięć poszczególnych komponentów oraz charakterystykach sprawności badanych układów. Opracowana topologia przekształtnika została szczegółowo przeanalizowana w ramach prowadzonych prac analitycznych, czego efektem było opracowanie jej teoretycznego modelu sprawności. Na jego podstawie wykreślono charakterystyki przedstawiające zależność ilości strat występujących w poszczególnych elementach przekształtnika od jego mocy wyjściowej, a także teoretyczną krzywą sprawności analizowanego układu.

Dla każdej z badanych wersji przekształtnika HVGDC w środowisku Matlab-Simulink opracowano model symulacyjny, na podstawie którego przeprowadzono weryfikację koncepcji działania zaprojektowanego układu. Przedmiotem badań symulacyjnych prowadzonych na modelach przekształtników HVGDC-CoolMOS oraz HVGDC-CoolGaN była weryfikacja poprawności ich działania oraz porównanie ilości strat występujących w poszczególnych elementach obu opracowanych układów. Badania symulacyjne podsumowano poprzez wykreślenie charakterystyk sprawności zarejestrowanych dla obu modeli, pracujących w trybie

ZCS oraz ZVS z obciążeniem, którego wartość w czasie trwania symulacji zmieniała się w szerokim zakresie. W czasie tej serii badań symulacyjnych wykorzystano modele tranzystorów uwzględniające zarówno ich parametry statyczne, jak i dynamiczne, przy czym parametry dynamiczne zdefiniowano w formie kompletnych charakterystyk zaczerpniętych z dokumentacji technicznej rzeczywistych łączników. Symulacje przeprowadzono w środowisku Matlab-Simulink z użyciem pakietu „Parallel Computing Toolbox”.

Pozytywne wyniki badań symulacyjnych skłoniły autora niniejszej rozprawy doktorskiej do podjęcia decyzji o budowie modeli eksperymentalnych obu analizowanych przekształtników i kontynuowaniu prac badawczych na rzeczywistych układach. W ramach przeprowadzonych prac laboratoryjnych zarejestrowano liczne oscylogramy, przedstawiające przebiegi kluczowe dla analizy zasady działania badanych przekształtników oraz oceny zjawisk komutacyjnych zachodzących w układach pracujących zarówno w trybie ZCS, jak i ZVS. Końcowym etapem badań laboratoryjnych dla każdego z analizowanych przekształtników była rejestracja jego charakterystyki sprawności, zarówno w czasie, gdy pracował on w trybie ZCS, jak i ZVS.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych stwierdzono, że opracowana topologia działa zgodnie z założeniami przyjętymi w fazie prac koncepcyjnych, a sam przekształtnik charakteryzuje się sześciokrotnym współczynnikiem wzmocnienia napięciowego, obniżonymi wartościami napięć blokowanych przez poszczególne łączniki oraz wysoką sprawnością. Dodatkowo, po przeanalizowaniu oscylogramów zarejestrowanych w czasie badań obu przekształtników, stwierdzono, iż w przebiegach prądów płynących w układzie, którego obwód mocy zbudowano z wykorzystaniem tranzystorów CoolGaN, występuje zdecydowanie mniej oscylacji związanych z ładowaniem i rozładowywaniem pojemności wyjściowych (C_{oss}) tranzystorów, a ich amplitudy są znacznie niższe niż te obserwowane w przypadku przekształtnika zbudowanego z wykorzystaniem tranzystorów typu CoolMOS.

Szymon Folmer

27.05.2025

Gallium Nitride Transistors (GaN) Based Multilevel DC-DC Converters

Abstract

Resonant switched-capacitor DC-DC converters represent a dynamically evolving class of power electronic devices. Novel topologies are continuously being developed, providing not only high voltage gain but also its effective attenuation capabilities, while maintaining high efficiency of this process. These characteristics are particularly significant in applications such as micro photovoltaic installations and supercomputer power systems. Moreover, by eliminating inductive components from the energy conversion process, these converters feature compact dimensions, low weight, and the capability to operate over a wide ambient temperature range. The aforementioned properties of resonant switched-capacitor converters significantly enhance their application potential and make them competitive with conventional converters, whose operation relies on the properties of inductive components used in their construction.

The first stage of work related to the preparation of this doctoral dissertation involved the development of an innovative topology of a multilevel high voltage gain direct current converter (HVGDC). This converter is characterized by a sixfold voltage gain, the ability to regulate the output voltage in seven discrete steps, a relatively low number of transistors, and low voltage stress on individual switches. Moreover, the proposed converter exhibits high energy conversion efficiency, and its operation in Zero Voltage Switching (ZVS) mode further reduces losses by minimizing those associated with the output capacitance (C_{oss}) of the transistors.

As part of the conducted research, a comparative analysis was carried out on two units of converters that were built according to the developed topology of a high voltage gain direct current converter (HVGDC). The first of the examined converters were built using CoolMOS transistors, while the second was designed based on the implementation of CoolGaN switching devices in the power circuit. The aim of this analysis was to identify differences in the operation of multilevel resonant switched-capacitor converters resulting from the use of different types of transistors. Those differences were observed in the current and voltage waveforms of individual components and the efficiency characteristics of the examined DC-DC converters.

For each analyzed version of the HVGDC converter, a simulation model was developed in the Matlab-Simulink environment to verify the operational concept of the designed system. The simulation studies conducted on the HVGDC-CoolMOS and HVGDC-CoolGaN models focused on validating their functionality and comparing the power losses occurring in individual components of both developed systems. The simulation analysis was summarized by plotting the efficiency characteristics recorded for both models operating in zero current switching (ZCS) and zero voltage switching (ZVS) modes, with a load value that varied over a wide range throughout the simulation time. During this series of simulations, advanced transistor models were employed that accounted for both their static and dynamic parameters. The dynamic parameters were defined using complete characteristics extracted from the technical documentation of real switching devices. The simulations were performed in the Matlab-Simulink environment using the "Parallel Computing Toolbox" package.

The positive results of the simulation studies led the author of this doctoral dissertation to decide on the construction of experimental models for both analyzed converters and to continue

research on physical systems. As a part of the conducted laboratory work, numerous oscillograms were recorded, illustrating waveforms crucial for analyzing the operating principles of the investigated converters and assessing the switching phenomena occurring in systems operating in both zero current switching (ZCS) and zero voltage switching (ZVS) modes. The final stage of the laboratory studies for each analyzed converter involved recording its efficiency characteristics while operating in both ZCS and ZVS modes.

As a result of the conducted research, it was determined that the developed topology operates in accordance with the assumptions established during the conceptual phase. The converter itself exhibits a sixfold voltage gain factor, reduced voltage stress on individual switches, and high efficiency. Additionally, an analysis of the oscillograms recorded during the testing of both converters revealed that the current waveforms in the system utilizing CoolGaN transistors demonstrate significantly fewer oscillations associated with the charging and discharging of the transistors' output capacitances (C_{oss}). Moreover, the amplitude of these oscillations is considerably lower compared to those observed in the converter built with CoolMOS transistors.

Szymon Falmer

27.05.2025