

Design and Impelementation of an Improved Quasi-Z-Source Inverter for PV Power System Application

Ali Parsa,¹ Farzad Sedaghati,^{2*} Seyed Reza Mousavi Aghdam,³ Majid Hosseinpour⁴

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, aliparsa@uma.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, farzad.sedaghati@uma.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, r.mousaviaghdam@uma.ac.ir

⁴Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, hoseinpour.majid@uma.ac.ir

Keywords:

inverter,
quasi Z-Source,
active quasi Z-Source,
high voltage gain,
PV systems.

Original Research Article

Paper History:

Received: 23/09/2024

Revise: 06/02/2025

Accepted: 21/03/2025

Abstract: With the environmental restrictions created for fossil fuels and the reduction of its resources, nowadays the trend towards renewable energy has significantly increased and developed. With the advancement of technology and power tools, the potential required for the exploitation of renewable energies such as solar, wind, water, and fuel cell energy has improved much. With the introduction of power converters, the ground was created for the exploitation of renewable energies; since impedance source and quasi-impedance source converters were one of the best options for renewable energies, they received special attention. In this research, a new topology is introduced that has a higher boost coefficient, input current stress, capacitor voltage stress, and less switch compared to the previously presented topologies. Also, this topology has the ability to operate with different modulation coefficients. The impedance source converter is able to solve some limitations of the usual voltage source and of current source inverters. It, also, has the ability to increase and decrease the voltage. The ability to reduce and increase voltage has made impedance source converters a powerful and practical interfaces for renewable energy use. However, as one of the biggest disadvantages of impedance source inverters, despite the input current and low current voltage, one can point out the discontinuity of the input current, the suddenness of the current at the moment of starting, and the high voltage stress of the capacitors, which cause the selection sensitivity and reduce the lifetime of the components.

How to cite this article: Parsa, A., Sedaghati, F., Mousavi Aghdam, R., Hosseinpour, M., "Design and Impelementation of an Improved Quasi-Z-Source Inverter for PV Power System Application", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 3, PP. 2-13, 2024. <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.255507.1088>
© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Research Aim

The most common topologies used today in energy conversion and drive systems of power electronic machines are impedance source and quasi-impedance source inverters. In this study, an improved structure for quasi-impedance source inverters is introduced, which has a higher boost factor, current stress, capacitor voltage stress, and lower key voltage stress than the previously presented structures. This structure also has the ability to operate with different modulation coefficients. The impedance source converter is able to overcome some of the limitations of conventional voltage source and current source inverters and also has the ability to increase and decrease voltage. The ability to decrease and increase voltage turns impedance source converters into a practical source for renewable energy applications. The impedance source inverter can overcome some of the limitations inherent in conventional inverters. It has the capability both to increase and to decrease voltage, making it a practical solution for renewable energy applications where voltage regulation is crucial. By leveraging the advantages of impedance source converters, this study aims to present a structure that enhances efficiency, reduces component count, and optimizes performance. Following the introduction of the proposed inverter, its operating principles will be thoroughly explained. A comparative analysis with existing topologies will then be provided, highlighting key advantages and improvements. To validate the theoretical discussions, computer simulations as well as practical measurement results of the inverter's performance will be presented.

Research method

The proposed inverter seeks to increase the conversion factor while maintaining input current continuity and a common ground. By ensuring the continuity of the input current, system efficiency can be improved, and voltage fluctuations can be minimized. Furthermore, an effort has been made to reduce the number of passive components in the impedance network while preserving the inverter's performance. This reduction in component count not only contributes to lower manufacturing costs but also enhances overall system reliability.

MATLAB/Simulink software was employed for simulation purposes to verify the performance of the proposed inverter. The simulations provided detailed insights into the behavior of the inverter under various operating conditions. Additionally, a prototype of the suggested converter was constructed, and

experimental measurement tests were conducted. These tests provided the real-world validation of the simulation results, ensuring that the proposed improvements translated into practical benefits.

Findings

The simulation results demonstrated that the proposed inverter structure achieves a higher conversion efficiency compared to traditional impedance and quasi-impedance source inverters. By optimizing the impedance network, the inverter exhibited improved voltage gain while minimizing current stress on components. The prototype implementation further confirmed these findings, with measurement results closely aligning with the simulation predictions. Key performance indicators such as efficiency, harmonic distortion levels, and voltage stress on components were all found to be improved in the proposed topology.

Conclusion

Previously presented inverters have exhibited several disadvantages, including low gain factors, switching dead time issues, high harmonic distortion, low output efficiency, inrushing input current, and economic inefficiencies. While impedance source inverters have addressed some of these challenges, their discontinuous input current and the voltage stress imposed on switches and elements still posed economic and technical concerns. The introduction of quasi-impedance source inverters marked a significant evolution in the field of boost inverters. These inverters successfully mitigated the limitations of both conventional boost inverters and impedance source inverters. Although initial quasi-impedance source inverters had lower amplification factors, advancements in passive and active elements led to substantial improvements in their performance. Further developments introduced inverters with active switches within the impedance network, which not only enhanced the amplification factor but also reduced the number of passive and active elements. In this research, a quasi-Z-source inverter of this nature was introduced and examined. Through targeted innovations and optimizations, the proposed topology achieved greater efficiency and productivity. The findings suggest that the improved quasi-impedance source inverter provides a more economically viable and technically superior solution for energy conversion applications, particularly in renewable energy systems.

طراحی و پیاده سازی یک اینورتر شبه منبع امپدانسی بهبود یافته برای بهره برداری از منابع تولید توان PV

علی پارسا^۱، فرزاد صداقتی^{۲*}، سید رضا موسوی اقدم^۳، مجید حسین پور^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

aliparsa@uma.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

farzad.sedaghati@uma.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

r.mousaviaghdam@uma.ac.ir

^۴ دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

hoseinpour.majid@uma.ac.ir

واژه های کلیدی:

اینورتر،

منبع امپدانس،

شبه امپدانس فعال،

بهره و ولتاژ بالا،

سیستم های فتوولتائیک.

چکیده: از مرسوم ترین ساختارهایی که امروزه در سیستم های تبدیل انرژی و درایو ماشین های الکتریکی استفاده می شود، اینورترهای منبع امپدانس و شبه منبع امپدانس هستند. در این پژوهش، ساختار بهبود یافته ای برای اینورترهای شبه منبع امپدانس معرفی می شود که دارای ضریب بوست بالاتر، تنش جریان، تنش ولتاژ خازن و تنش ولتاژ کلید کمتر نسبت به ساختارهای ارائه شده قبلی است. همچنین این ساختار قابلیت عملکرد با ضرایب مدولاسیون مختلف را نیز دارا می باشد. مبدل منبع امپدانس قادر به رفع برخی از محدودیت های اینورترهای منبع ولتاژ و منبع جریان معمول بوده و نیز قابلیت افزایش و کاهش ولتاژ را دارد. قابلیت کاهش و افزایش ولتاژ، مبدل های منبع امپدانس را به یک منبع کاربردی برای مصارف انرژی های تجدید پذیر تبدیل می کند. بعد از معرفی ساختار اینورتر پیشنهادی، اصول عملکردی آن تشریح می شود و سپس یک مقایسه کامل بین اینورتر پیشنهادی با ساختارهای مشابه ارائه می گردد. در نهایت، نتایج شبیه سازی کامپیوتری و همچنین نتایج اندازه گیری عملی عملکرد مبدل ارائه می گردد تا مباحث تئوری ارائه شده را تأیید نماید.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

۱. مقدمه

با محدودیت‌های زیست‌محیطی ایجادشده برای سوخت‌های فسیلی و کاهش میزان این منابع، امروزه گرایش به استفاده و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش چشمگیری یافته است. با پیشرفت فناوری‌ها و ادوات الکترونیک قدرت، پتانسیل لازم برای بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی‌های خورشیدی، بادی، آبی و پیل سوختی پیشرفت بسیاری کرده است. از آنجاکه مبدل‌های منبع امپدانس و شبه‌منبع امپدانس یکی از بهترین گزینه‌ها برای انرژی‌های تجدیدپذیر بودند، مورد توجه قرار گرفتند. این اینورترها ضمن حفظ قابلیت افزایش ولتاژ ورودی، تبدیل توان را ساده‌تر نموده و با ولتاژ ورودی مختلف قابلیت سازگاری دارند [۱ و ۲]؛ در نتیجه قابلیت اطمینان بالاتری را به سیستم ارائه می‌دهند. امروزه بیشترین کاربرد این اینورترها را برای درایوهای سرعت دارای قابلیت تنظیم [۳]، منابع تغذیه بدون وقفه (UPS) [۴]، ذخیره انرژی باتری یا ابرخازن [۵]، منابع تجدیدپذیر نظیر فوتولتائیک، انرژی بادی [۶] و ماشین‌های الکتریکی [۷] می‌توان اشاره کرد.

یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های اینورتر منبع امپدانس در مقابل اینورترهای منبع ولتاژ سنتی، قابلیت اتصال کوتاه هم‌زمان ساق‌های اینورتر است که این عمل با روشن شدن هم‌زمان کلیدهای موجود در ساق‌های بالایی و پایینی رخ می‌دهد [۸]. به عبارتی دیگر، اتصال کوتاه ساق‌های اینورتر در اینورترهای منبع ولتاژ سنتی موجب اتصال کوتاه، افزایش تلفات و کاهش شدید قابلیت اطمینان سیستم می‌شود که این مورد در اینورترهای منبع امپدانس برطرف شده است.

با به روی کار آمدن اینورتر شبه‌منبع امپدانس، معایب اصلی اینورتر منبع امپدانس نظیر عدم پیوستگی جریان ورودی و تنش ولتاژ زیاد روی المان‌ها بهبود یافته است، اما همچنان قدرت تقویت‌کنندگی کافی برای کاربردهای صنعتی را ندارد. همین امر باعث شده است تا ساختارهای متعدد دیگری نظیر اینورتر شبه‌منبع امپدانس مبتنی بر دیود و خازن [۹]، اینورتر منبع امپدانس با سلف سوئیچ‌شونده [۱۰]، اینورتر منبع امپدانس با سلف سوئیچ‌شونده و عناصر پسیو کمتر (SLBI) [۱۱-۱۲]، اینورتر منبع امپدانس بهبودیافته [۱۳] و ساختارهای مشابه ارائه شود.

اینورتر منبع امپدانس با سلف سوئیچ‌شونده با افزودن یک سلف و سه دیود به ساختار اینورتر در جهت افزایش ضریب بوسه ارائه شده است [۹]. این اینورتر در رده مبدل‌های دارای ضریب مدولاسیون بالا بوده و تنش ولتاژ کم خازن و کلید، کاهش زمان

اتصال کوتاه و غلبه بر جریان هجومی مخرب اولیه از ویژگی‌های آن است.

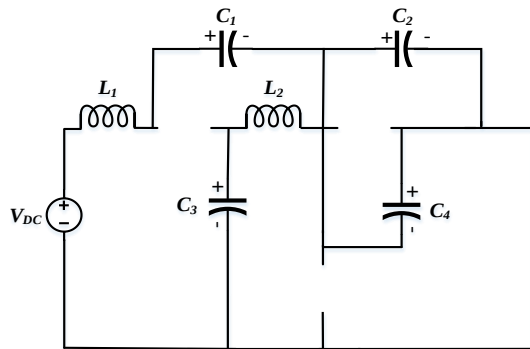
در سال‌های گذشته، اینورترهای متنوع منبع امپدانس و شبه‌منبع امپدانس با کلید فعال در شبکه امپدانس معرفی شده‌اند که ضریب افزایش‌دهی بهبودیافته‌ای را ارائه می‌کنند. در مرجع [۱۴] یک اینورتر شبه‌منبع امپدانس افزایش‌دهی بهبودیافته معرفی شده است که فاقد کلید فعال در شبکه امپدانس است. ریپل جریان ورودی نسبتاً پایین و حفظ زمین مشترک بین شبکه امپدانس و اینورتر از مزایا و تعداد المان پسیو نسبتاً زیاد از معایب این اینورتر است. ساختار ارائه‌شده در مرجع [۱۵] یک اینورتر شبه‌منبع امپدانس با یک کلید فعال است که با وجود حفظ مزایای ساختار قبلی تعداد المان کمتری نسبت به آن دارد. ضریب بوسه این اینورتر مقداری بالاتر از ساختار قبل است.

در مرجع [۱۳] یک اینورتر شبه‌منبع امپدانس با کلید فعال دارای المان پسیو کم معرفی شده است. از مزایای این اینورتر می‌توان به جریان ورودی پیوسته، تنش ولتاژ پایین روی کلیدها و زمین مشترک بین شبکه امپدانس و اینورتر اشاره کرد. در مرجع [۱۹] یک اینورتر شبه‌منبع امپدانس دارای کلید فعال و با بهره بسیار بالا ارائه شده است. این ساختار فاقد جریان هجومی بوده و تنش ولتاژ روی المان‌ها بسیار پایین است. از معایب این اینورتر می‌توان به نبود زمین مشترک بین شبکه امپدانس و اینورتر اشاره کرد. اینورتر شبه‌منبع امپدانس معرفی‌شده در مرجع [۲۰] یک اینورتر شبه‌منبع امپدانس با ریپل جریان کاهش‌یافته و جریان ورودی پیوسته است. این اینورتر نسبت به تعداد المان زیادی که دارد، ضریب بوسه قابل ملاحظه‌ای را ارائه می‌دهد.

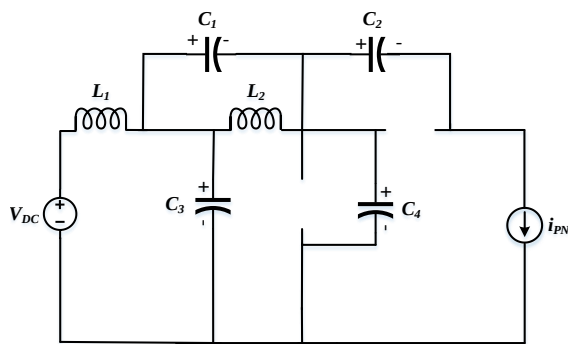
همان‌طور که از بررسی مبدل‌های ارائه‌شده قبلی می‌توان دریافت، محدودیت ضریب بوسه بالا در کنار محدود نگه داشتن تنش ولتاژ و یا جریان المان‌های مبدل و همچنین بحث محدودسازی جریان هجومی بالای این مبدل‌ها و یا تعداد بالا المان‌های مداری برای تأمین شرایط ذکرشده از معایب مبدل‌های ارائه‌شده قبلی است.

در ادامه مقاله به معرفی ساختار اینورتر شبه‌منبع امپدانس پیشنهادی پرداخته می‌شود و سپس اصول عملکردی آن بیان می‌گردد. همچنین محاسبات مربوط به تلفات توان مبدل پیشنهادی بیان می‌شود. به منظور ارزیابی مزایا و معایب اینورتر پیشنهادی، مقایسه کاملی بین اینورتر پیشنهادی و اینورترهایی با ساختارهای مشابه ارائه می‌گردد. در نهایت به منظور تأیید عملکرد اینورتر پیشنهادی و تحلیل‌های تئوری انجام‌گرفته، نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی استخراج شده است.

در مدار معادل حالت اتصال کوتاه شکل (۲ الف) و محاسبه پارامترهای مربوط به هر حلقه روابط مربوط به ولتاژ و جریان سلف‌ها و خازن‌ها در رابطه (۱) و (۲) به دست می‌آید.



(الف)



(ب)

شکل (۲): حالت‌های عملکردی اینورتر پیشنهادی: (الف) حالت اتصال کوتاه؛ (ب) حالت غیر اتصال کوتاه

$$\begin{cases} V_{L1} = V_{C4} + V_{C1} + V_{DC} \\ V_{L1} = V_{C2} + V_{C1} + V_{DC} \\ V_{L2} = V_{C3} + V_{C2} \\ V_{L2} = V_{C3} + V_{C4} \\ V_{PN} = 0 \end{cases} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} i_{C1} = -I_{L1} \\ i_{C2} = -I_{L1} - I_{L2} + i_{C4ST} \\ i_{C3} = -I_{L2} \\ i_{C4} = -I_{L1} - I_{L2} - i_{C2ST} \end{cases} \quad (۲)$$

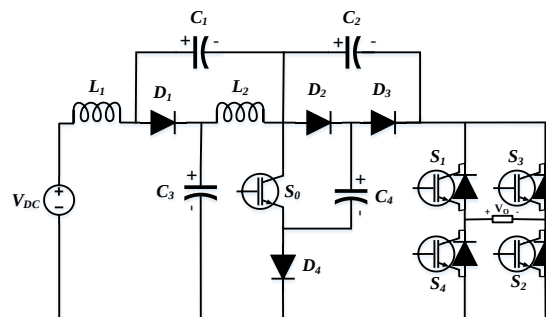
با توجه به روابط (۱) و (۲)، V_{L1} ، جریان سلف ۱، V_{L2} ، جریان سلف ۲، V_{C1} تا V_{C4} به ترتیب جریان خازن‌های ۱ تا ۴ و V_{PN} ولتاژ لینک DC است. همچنین i_{C1} تا i_{C4} به ترتیب جریان خازن‌های ۱ تا ۴ است.

۲.۳. عملکرد مبدل در حالت غیر اتصال کوتاه

با خاموش شدن کلید S_0 حالت عملکردی غیر اتصال کوتاه آغاز می‌شود. با توجه به ولتاژ قرار گرفته روی دیودهای D_1 ، D_2 و D_4 بایاس مستقیم شده و هدایت الکتریکی را انجام می‌دهند. از طرفی،

۲. ساختار اینورتر شبه منبع امپدانسی پیشنهادی

همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، در این مقاله یک ساختار بهبود یافته برای اینورتر شبه منبع امپدانسی دارای کلید فعال در شبکه امپدانسی ارائه شده است. شکل (۱) ساختار اینورتر پیشنهادی را نشان می‌دهد. این ساختار شامل چهار دیود، چهار خازن و دو سلف است. مدها و اصول عملکردی این اینورتر شبیه دیگر اینورترهای شبه منبع امپدانسی است. از مزایای این اینورتر می‌توان به جریان ورودی پیوسته، تنش ولتاژ پایین المان‌ها، ضریب افزایش ولتاژ بالا و بازده مناسب اشاره کرد. از دیگر مزایای ساختار پیشنهادی، وجود زمین مشترک بین بار و منبع توان ورودی است که این ساختار را به گزینه مناسبی برای بهره‌برداری از منابع توان PV تبدیل می‌کند، زیرا جریان نشتی را حذف می‌کند.



شکل (۱): اینورتر شبه منبع امپدانسی پیشنهادی دارای کلید فعال

۳. اصول و حالت‌های عملکردی اینورتر پیشنهادی

عملکرد این مبدل در دو حالت کاری اتصال کوتاه (ST) و غیر اتصال کوتاه (NST) بررسی می‌شود. مدار معادل ساختار پیشنهادی در حالت عملکردی اتصال کوتاه و غیر اتصال کوتاه به ترتیب در شکل (۲ الف) و (۲ ب) نشان داده شده است. جزئیات عملکرد اینورتر به همراه روابط بررسی شده از هر حالت در ادامه ارزیابی می‌شود.

۳.۱. عملکرد مبدل در حالت اتصال کوتاه

در حالت اتصال کوتاه، کلید S_0 روشن و عملیات هدایت را انجام می‌دهد. با توجه به ولتاژ روی دیودها، دیودهای D_1 ، D_2 و D_4 بایاس معکوس شده و خاموش می‌شوند. دیود D_3 بایاس مستقیم شده و هدایت جریان را بر عهده می‌گیرد. با هدایت کلیدهای اینورتر و کلید S_0 و اتصال کوتاه شدن لینک DC، خازن‌های C_1 و C_2 ضمن تشکیل حلقه با سلف L_1 ، دشارژ شده و باعث شارژ سلف L_1 می‌شوند. از طرفی، خازن‌های C_2 ، C_3 و C_4 با سلف L_2 تشکیل حلقه داده و موجب شارژ شدن سلف L_2 می‌شوند. با دشارژ شدن خازن‌ها و شارژ سلف‌ها، ولتاژ دو سر خازن‌ها کاهش می‌یابد. با اعمال قانون KVL

با توجه به رابطه (۷) برای ولتاژ خازن C_2 رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{C2} = \frac{1}{1-4D} V_{DC} \quad (12)$$

با جای‌گذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۸) برای خازن C_3 خواهیم داشت:

$$V_{C3} = \frac{(1-2D)}{1-4D} V_{DC} \quad (13)$$

با توجه به مدار معادل حالت غیراتصال کوتاه، ولتاژ V_{PN} برابر است با:

$$\begin{cases} V_{PN} = V_{C2} + V_{C4} \\ V_{PN} = \frac{2}{1-4D} V_{DC} \end{cases} \quad (14)$$

بنابراین می‌توان ضریب بوست اینورتر پیشنهادی را با حاصل شدن روابط (۱۱) و (۱۲) که ولتاژ خازن‌های C_2 و C_4 است، به دست آورد:

$$B = \frac{V_{PN}}{V_{DC}} = \frac{V_{C2} + V_{C4}}{V_{DC}} = \frac{2}{1-4D} \quad (15)$$

با توجه به اینکه $M = 1-D$ ، ضریب بهره (G) اینورتر شبه‌منبع امپدانس پیشنهادی برحسب شاخص مدولاسیون (M)، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = MB = \frac{2M}{4M-3} \quad (16)$$

۴. مقایسه ساختار پیشنهادی با ساختارهای مشابه

در این بخش برای بررسی کارایی اینورتر شبه‌منبع امپدانس پیشنهادی و ارزیابی مزایا و معایب آن، ساختار ارائه شده با چند نمونه از ساختارهای مشابه ارائه شده در سال‌های اخیر مقایسه شده است. به این منظور، ضریب بوست، ضریب بهره و تعداد المان‌های ساختارها مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه می‌شوند. قابل ذکر است که برای مقایسه صحیح، سعی بر این بوده است که ساختارهای که مقایسه می‌شوند، از لحاظ تعداد المان نزدیک به ساختار پیشنهادی باشد.

۴.۱. مقایسه ضریب بوست

در شکل (۳) نمودار مقایسه ضریب بوست اینورتر پیشنهادی با سایر ساختارهای مشابه در دوره اتصال کوتاه یکسان مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب بوست اینورتر شبه‌منبع امپدانس پیشنهادی در مقایسه با ساختارهای مشابه، در یک دوره اتصال کوتاه یکسان بیشتر از دیگر ساختارهاست.

دیود D_3 بایاس معکوس شده و خاموش می‌شود. در این حالت انرژی ذخیره شده در سلف‌ها بر روی خازن‌ها دشارژ می‌شوند و خازن‌ها توسط منبع ولتاژ ورودی و سلف‌ها شارژ و اختلاف پتانسیل دو سر آن‌ها افزایش می‌یابد. روابط مربوط به این مد کاری در رابطه (۳) ارائه شده است.

انرژی بار خروجی توسط سلف‌های L_1 و L_2 و منبع ورودی تأمین می‌شود. با اعمال قانون KVL در مدار معادل حالت غیراتصال کوتاه شکل (۲ ب) و محاسبه پارامترهای مربوطه، روابط مربوط به ولتاژ و جریان سلف‌ها و خازن‌ها در رابطه (۳) و (۴) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} V_{L1} = V_{C1} - V_{C4} + V_{DC} \\ V_{L1} = -V_{C3} + V_{DC} \\ V_{L2} = V_{C3} - V_{C4} \\ V_{L2} = -V_{C1} \\ V_{PN} = V_{C2} + V_{C4} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} i_{C1} = -I_{L1} + I_{L2} + i_{C3NST} \\ i_{C2} = -i_{PN} \\ i_{C3} = I_{L1} - i_{C4NST} - i_{PN} \\ i_{C4} = I_{L2} - i_{C1NST} - i_{PN} \end{cases} \quad (4)$$

۳.۳. تحلیل عملکرد اینورتر پیشنهادی در حالت دائمی

با توجه به قانون ولت-ثانیه، در حالت دائمی متوسط ولتاژ روی سلف برابر صفر است. با اعمال قانون ولت-ثانیه برای سلف‌های L_1 و L_2 روابط زیر حاصل می‌شود:

$$V_{C1} - (1-2D)V_{C4} + V_{DC} = 0 \quad (5)$$

$$V_{C1} + DV_{C2} - (1-D)V_{C4} + V_{DC} = 0 \quad (6)$$

که در آن (D) بیانگر دیوتی سایکل است. با جای‌گذاری رابطه (۵) در رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$V_{C4} = V_{C2} \quad (7)$$

با توجه به قانون ولت-ثانیه برای سلف L_2 و روابط (۱) و (۳) داریم:

$$V_{C3} = (1-2D)V_{C4} \quad (8)$$

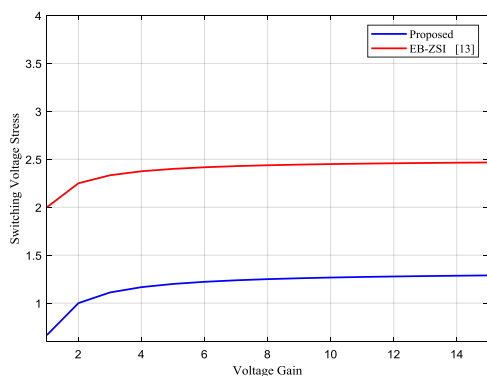
$$DV_{C4} + DV_{C3} - (1-D)V_{C1} = 0 \quad (9)$$

با جای‌گذاری رابطه (۹) در رابطه (۸) ولتاژ خازن C_1 حاصل می‌شود:

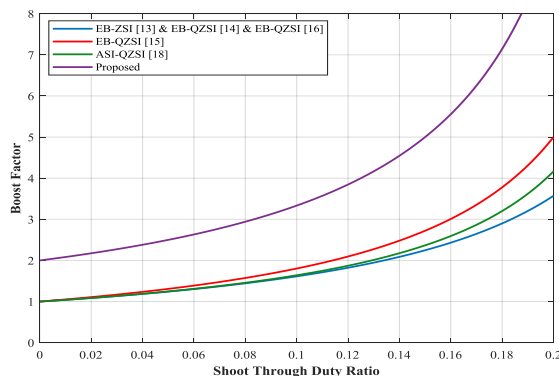
$$V_{C1} = 2DV_{C4} \quad (10)$$

با جای‌گذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۵) برای خازن C_4 خواهیم داشت:

$$V_{C4} = \frac{1}{1-4D} V_{DC} \quad (11)$$



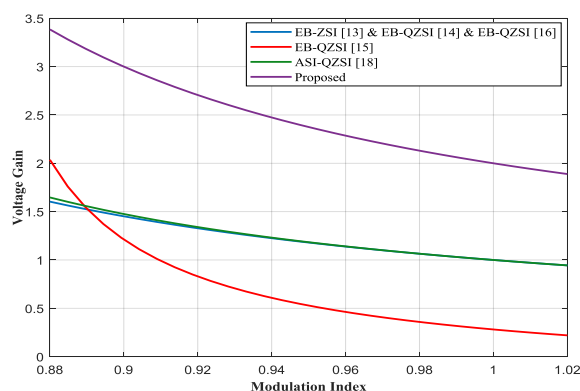
شکل (۵): مقایسه تنش ولتاژ کلید بر حسب بهره ولتاژ (G)



شکل (۳): مقایسه ضریب بوست اینورترها بر حسب دوره اتصال کوتاه

۲.۴. مقایسه ضریب بهره

شکل (۴) نمودار مقایسه بهره ولتاژ اینورتر پیشنهادی در مقایسه با سایر اینورترها را نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، ضریب بهره ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختارهای مراجع [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶] و [۱۸] بیشتر است.



شکل (۴): مقایسه بهره ولتاژ (G) بر حسب شاخص مدولاسیون

۳.۴. مقایسه تنش ولتاژ کلید

با توجه به اینکه تنش ولتاژ کلید ساختارهای ارائه شده در مراجع [۱۴]، [۱۵]، [۱۶] و [۱۸] مقدار خیلی بیشتری نسبت به ساختار پیشنهادی دارد، فقط تنش ولتاژ کلید ساختار ارائه شده در ساختار [۱۳] در این پژوهش ارائه شده است که مقدار تنش ولتاژ نزدیک تری به ساختار پیشنهادی دارد. شکل (۵) بیانگر نمودار مقایسه تنش ولتاژ کلید ساختار پیشنهادی با ساختار [۱۳] است. همانطور که قابل ملاحظه است، میزان تنش ولتاژ کلید ساختار پیشنهادی نسبت به ساختار مشابه کمتر است.

۴.۴. مقایسه تعداد المان‌های مداری

در جدول (۱) مقایسه تعداد المان‌های پسیو و اکتیو اینورتر شبه منبع امیدانسی با سایر ساختارها صورت گرفته است. همانطور که در این جدول قابل مشاهده است، ساختار پیشنهادی نسبت به ساختارهای مراجع [۱۳] تا [۱۵] تعداد المان کمتری دارد و در مقایسه با ساختارهای مراجع [۱۶] و [۱۸] تعداد المان بیشتری دارد.

جدول (۱): مقایسه تعداد المان‌های پسیو و اکتیو ساختارهای بررسی شده				
ساختار	سلف	خازن	دیود	کلید شبکه امیدانسی
EB-ZSI [۱۳]	۴	۴	۵	۱
EB-QZSI [۱۴]	۴	۴	۵	۱
EB-QZSI [۱۵]	۳	۳	۶	۱
EB-QZSI [۱۶]	۲	۲	۴	۱
ASI-QZSI [۱۸]	۳	۲	۴	۱
ساختار پیشنهادی	۲	۴	۴	۱

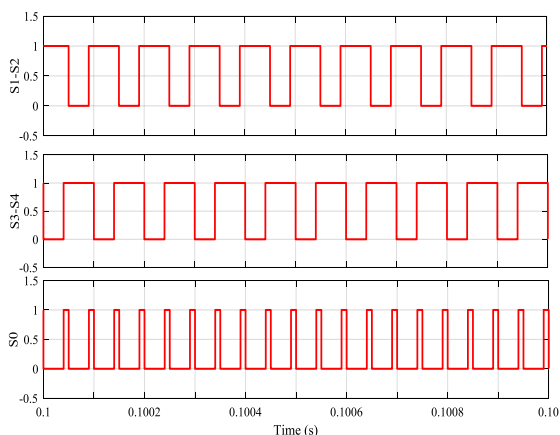
۵. بررسی تلفات توان ساختار ارائه شده

در این بخش تلفات توان المان‌ها، نمودار تلفات توان المان‌ها و راندمان اینورتر پیشنهادی بررسی می‌شود. محاسبات مربوط به تلفات توان همانند روش محاسبه شده در مراجع [۲۲] و [۲۳] انجام شده است. مقادیر پارازیتی المان‌های مداری مبدل در جدول (۲) ارائه شده است. تمامی این مقادیر در شبیه‌سازی عملکرد اینورتر پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB/Simulink لحاظ شده است. روابط مربوط به تلفات المان‌ها در رابطه (۱۷) بیان شده است. نمودار مربوط به تلفات المان‌ها در شکل (۶) و نمودار مربوط به راندمان خروجی در شکل (۷) ارائه شده است. با بررسی شکل (۷) مشاهده می‌گردد که مبدل پیشنهادی در ولتاژهای بالا عملکرد و راندمان بهتری را از خود نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}
 P_L &= 2rI_{L_{rms}}^2 \\
 P_C &= (I_{C_{1rms}}^2 + I_{C_{2rms}}^2 + I_{C_{3rms}}^2 + I_{C_{4rms}}^2)r_C \\
 P_D &= P_{D_{Oh}} + P_{D_{fd}} \\
 P_{S_0} &= r_S I_{S_{0RMS}}^2
 \end{aligned} \quad (17)$$

پیشنهادی در جدول (۳) آمده است.

برای تولید ولتاژ ۱۲۰ ولت در خروجی بایستی بازه اتصال کوتاه (D) مبدل پیشنهادی ۰/۱۷ در نظر گرفته شود و در نتیجه مطابق با رابطه (۱۵) ضریب افزایش مبدل پیشنهادی برابر با ۶/۲۵ و بهره ولتاژ برابر با ۵/۱۸ خواهد بود. اندازه ولتاژ DC خروجی (V_{PN}) برابر با ۱۲۰ ولت خواهد بود.



شکل (۸): پالس‌های کلیدزنی کلیدهای اینورتر پیشنهادی

در شکل (۹)، شکل موج ولتاژ خازن‌ها نمایش داده شده است. براساس روابط (۱۰) تا (۱۳) که مربوط به ولتاژ خازن‌های مبدل هستند، مقدار متوسط ولتاژ خازن‌ها در بازه اتصال کوتاه ۰/۱۷ درصد و ولتاژ ورودی ۲۰ ولت به ترتیب برابر ۱۹ ولت، ۶۱ ولت، ۴۱ ولت و ۵۹ ولت حاصل شده است.

در شکل (۱۰)، شکل موج ولتاژ دیودها نمایش داده شده است. مقدار پیک ولتاژ دیودها به ترتیب ۱۲۰ ولت، ۶۰ ولت، ۵۷ ولت و ۵۹ ولت، در بازه اتصال کوتاه ۰/۱۷ و ولتاژ ورودی ۲۰ ولت به دست آمده است.

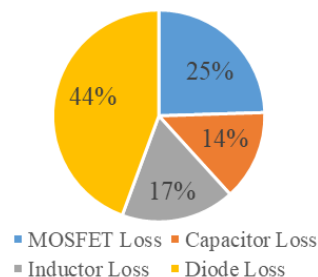
در شکل (۱۱)، شکل موج جریان سلف‌ها نشان داده شده است. مقدار متوسط جریان سلف‌ها در ولتاژ ورودی ۲۰ ولت و جریان ۲/۶۵ آمپر حاصل شده است.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مبدل پیشنهادی

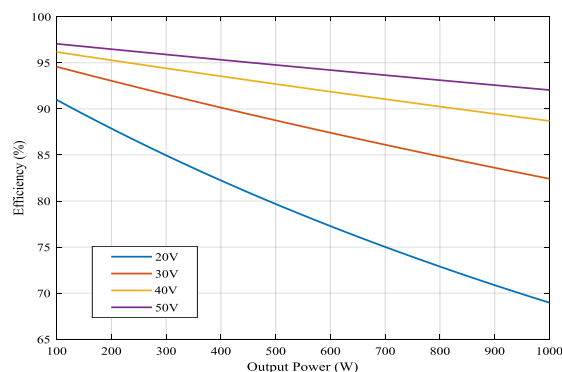
مقدار	پارامتر مبدل پیشنهادی
۲۰ ولت	ولتاژ ورودی (V_{DC})
۱۰ کیلوهرتز	فرکانس کلیدزنی (F_s)
۰/۸۳	ضریب مدولاسیون
۰/۱۷	بازه اتصال کوتاه (D)
۱۰۰ اهم	مقاومت بار خروجی (R_O)
۲۰ میلی‌هانی	سلف خروجی (L_O)
۲/۵ میلی‌هانی	سلف L_1 و L_2
۶۸۰ میکروفاراد	خازن C_1
۴۷۰ میکروفاراد	خازن C_2, C_3 و C_4

جدول (۲): مقادیر پارامتری المان‌ها

المان	نماد	مقدار
سلف	r_L	۲۰ میلی‌اهم
خازن	r_C	۱۰ میلی‌اهم
دیود	r_D	۸۰ میلی‌اهم
کلید	r_S	۴۰ میلی‌اهم



شکل (۶): نمودار دایره‌ای تلفات المان‌ها در ولتاژ ورودی ۲۰ ولت و بازه اتصال کوتاه ۰/۲



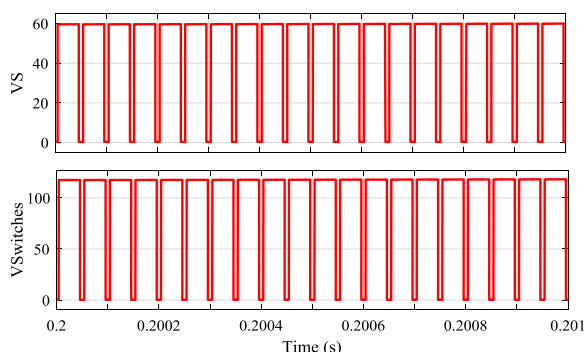
شکل (۷): نمودار راندمان مبدل پیشنهادی در ولتاژهای ورودی ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ولت

۶. مدولاسیون اینورتر پیشنهادی

برای کنترل کلیدهای نیمه‌هادی اینورترهای شبه‌منبع امیدانسی روش‌های متنوعی معرفی شده است؛ از جمله روش‌های استفاده شده در مراجع [۱]، [۳] و [۲۳]. در این مقاله برای اینورتر پیشنهادی روش PWM مرسوم به کار گرفته شده است. در شکل (۸) شکل موج پالس‌های کلیدها نشان داده شده است. برای کلیدهای S_1 و S_2 پالس یکسان و برای کلیدهای S_3 و S_4 پالس مشابه و براساس این دو پالس، پالس کلید S_0 تولید می‌شود.

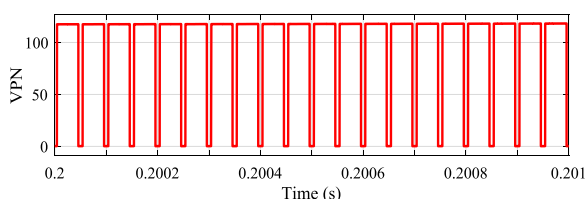
۷. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری

برای صحت‌سنجی روابط به دست آمده از بخش‌های قبل و تحلیل عملکرد اینورتر پیشنهادی، شبیه‌سازی آن در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام می‌شود. ضریب مدولاسیون در شبیه‌سازی برابر ۰/۸۳ در نظر گرفته شده و مقادیر پارامترهای ساختار

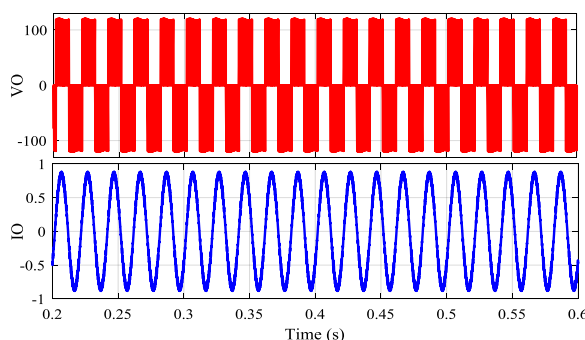


شکل (۱۲): شکل موج ولتاژ کلیدها

در شکل (۱۴) نیز به ترتیب شکل موج ولتاژ و جریان خروجی اینورتر پیشنهادی نشان داده شده است. شبکه شبه منبع امپدانسی ارائه شده ولتاژ DC خروجی را به ۱۷۸ ولت متناوب در خروجی مبدل تبدیل کرده و ولتاژ مؤثر ۱۲۵ ولت با جریان مؤثر ۰/۸۵ آمپر در خروجی به دست آمده است. توان خروجی مبدل در این شرایط برابر ۱۰۶ وات است. شکل موج های تولیدی به دست آمده با تمامی روابط ارائه شده در بخش های تحلیلی منطبق بوده و صحت روابط ارائه شده را تأیید می کند.



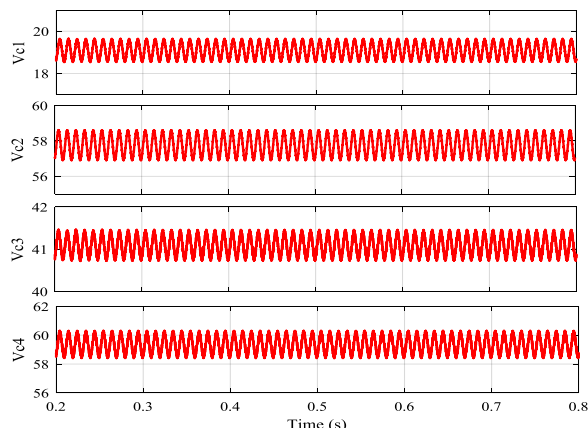
شکل (۱۳): شکل موج ولتاژ DC خروجی



شکل (۱۴): شکل موج ولتاژ و جریان خروجی

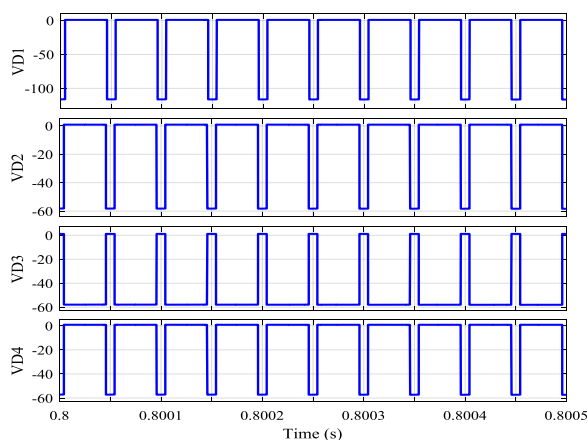
۸. نتایج آزمایشگاهی

در شکل (۱۵) نمونه آزمایشگاهی ساخته شده نشان داده شده که متشکل از دو سلف ۲/۵ میلی هانری، سه خازن به ظرفیت ۴۷۰ میکروفاراد، یک خازن ۶۸۰ میکروفارادی و چهار دیود است. مقادیر پارامترهای ساختار پیشنهادی در جدول (۴) ارائه شده است. مشخصات المان های مورد استفاده نیز در جدول (۵) آمده است.

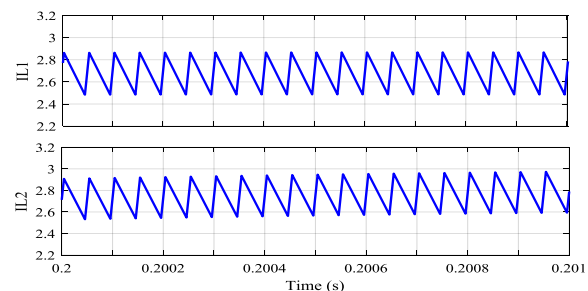


شکل (۹): شکل موج ولتاژ خازن ها

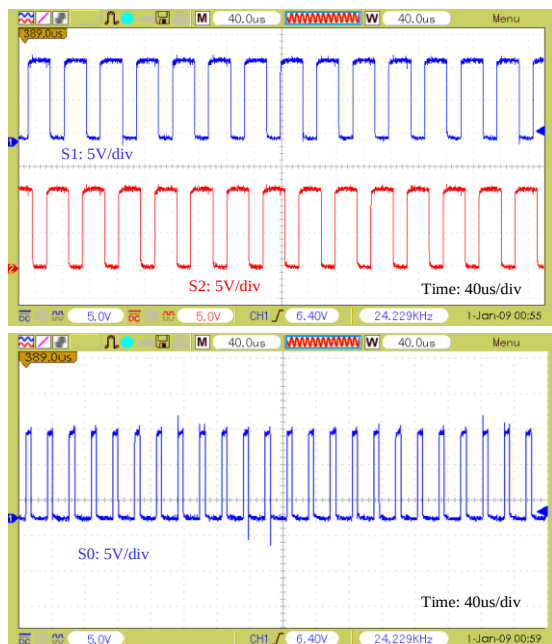
با توجه به شکل موج غیرهجومی جریان ورودی و نیز پیوستگی آن می توان نتیجه گرفت که مبدل پیشنهادی برای کاربردهای فتوولتائیک گزینه بسیار مناسبی خواهد بود. در شکل (۱۲) ولتاژ کلیدها و در شکل (۱۳) شکل موج ولتاژ DC خروجی در بازه اتصال کوتاه ۰/۱۷ و ولتاژ ورودی ۲۰ ولت نشان داده و مقدار آن ۱۲۰ ولت است. با توجه به رابطه (۱۴) که رابطه مربوط به ولتاژ لینک DC است، می توان نتیجه گرفت مقدار ولتاژ لینک DC و رابطه (۱۴) یکدیگر را تصدیق می کنند.



شکل (۱۰): شکل موج ولتاژ دیودها

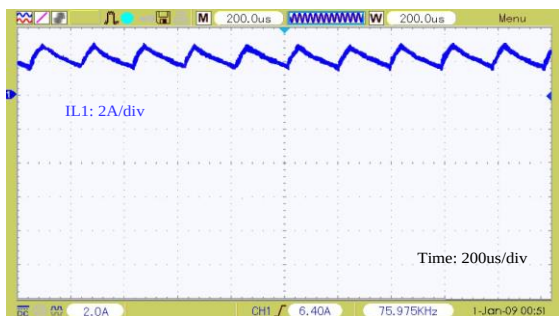


شکل (۱۱): شکل موج جریان سلف ها

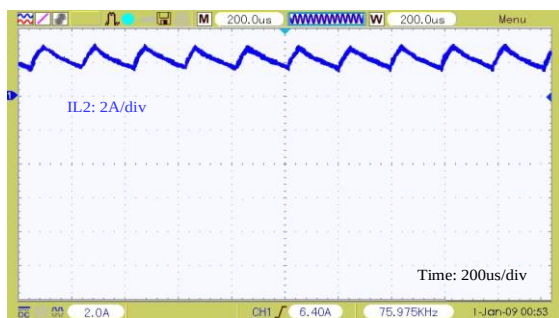


شکل (۱۶): پالس‌های گیت کلیدها

در شکل (۲۰) شکل موج ولتاژ و جریان خروجی نشان داده شده است. شبکه شبه‌منبع امیدانسی ارائه شده، ولتاژ DC ورودی ۲۰ ولتی را به ۱۲۰ ولت متناوب در خروجی مبدل تبدیل و ولتاژ مؤثر ۸۴ ولت با جریان مؤثر ۰/۶ آمپری در خروجی حاصل شده است. شکل موج‌های تولیدی با تمامی روابط ارائه شده منطبق بوده و صحت روابط ارائه شده را تأیید می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل (۱۷): جریان سلف‌های (الف): L_1 ، (ب): L_2

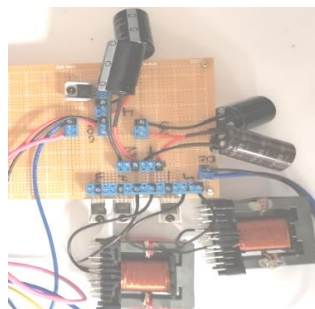
در شکل (۱۶) شکل موج پالس‌های ورودی مبدل با روش مدولاسیون پهنای پالس نشان داده شده است. در شکل (۱۷) به ترتیب، شکل موج جریان سلف‌ها نشان شده است. مقدار متوسط جریان سلف‌ها در ولتاژ ورودی ۲۰ ولت ۲/۶۵ آمپر حاصل شده است.

شکل (۱۸) شکل موج ولتاژ DC خروجی در بازه اتصال کوتاه ۰/۱۷ و ولتاژ ورودی ۲۰ ولت را نشان می‌دهد که مقدار آن ۱۲۰ ولت است.

جدول (۴): مقادیر پارامترهای مبدل پیشنهادی

پارامتر مبدل پیشنهادی	مقدار
ولتاژ ورودی (V_{DC})	۲۰ ولت
فرکانس کلیدزنی (F_s)	۲۰ کیلوهرتز
ضریب مدولاسیون	۰/۸۳
بازه اتصال کوتاه (D)	۰/۱۷
مقاومت بار خروجی (R_O)	۷۵ اهم
سلف خروجی (L_O)	۱ میلی‌هانری
سلف L_1 و L_2	۲/۵ میلی‌هانری
خازن C_1	۶۸۰ میکروفاراد
خازن C_2 ، C_3 و C_4	۴۷۰ میکروفاراد

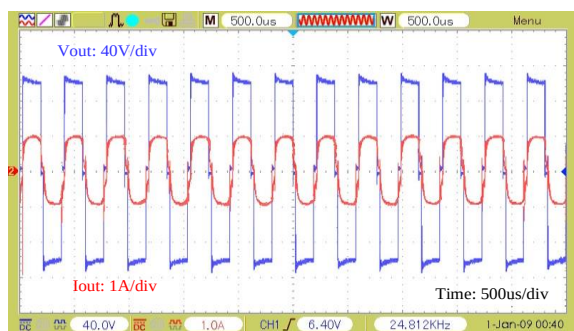
با توجه به رابطه (۱۴) که رابطه مربوط به ولتاژ لینک DC است، می‌توان نتیجه گرفت مقدار ولتاژ لینک DC و رابطه (۱۴) یکدیگر را تصدیق می‌کنند. در شکل (۱۹)، شکل موج ولتاژ خازن‌ها نمایش داده شده‌اند. براساس رابطه‌های (۱۰) تا (۱۳) که مربوط به ولتاژ خازن‌ها هستند، مقدار متوسط ولتاژ خازن‌ها در بازه اتصال کوتاه ۰/۱۷ و ولتاژ ورودی ۲۰ ولت به ترتیب ۱۹ ولت، ۶۱ ولت، ۴۱ ولت و ۵۹ ولت حاصل شده است.



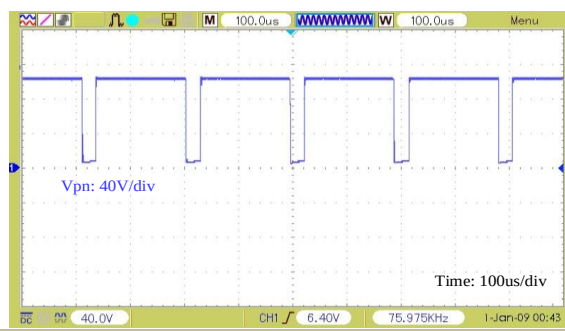
شکل (۱۵): نمونه آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده از اینورتر پیشنهادی

جدول (۵): مشخصات المان‌های مبدل پیشنهادی

مشخصات	المان
STTH20	دیود
IRFP450	سوئیچ



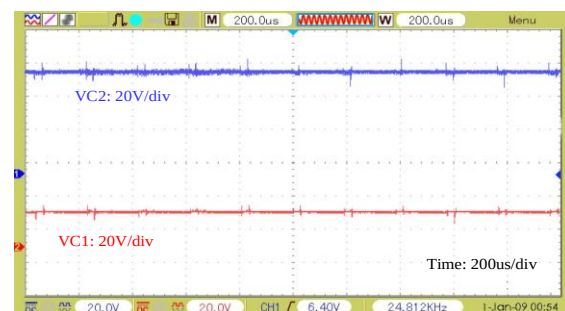
شکل (۲۰): ولتاژ و جریان خروجی



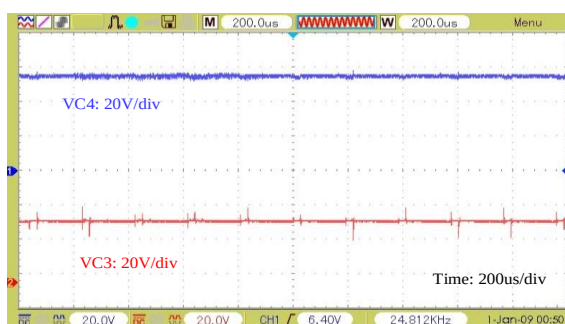
شکل (۱۸): شکل موج ولتاژ لینک DC

۹. نتیجه گیری

در این مقاله یک اینورتر شبه منبع امپدانس بهبود یافته ارائه شده است. با توجه به ویژگی‌هایی این مبدل، می‌توان از آن برای بهره‌برداری از منابع تولید توان PV استفاده کرد. مبدل پیشنهادی در دو حالت بازه اتصال کوتاه $0/2$ و $0/17$ به صورت تک‌فاز بررسی شده است. در بازه اتصال کوتاه $0/2$ و $0/17$ ولتاژ ورودی 20 ولت، به ترتیب ولتاژ خروجی مؤثر 125 ولت و 84 ولت حاصل شده است. با توجه به شکل موج ولتاژ خازن‌ها، ریل ولتاژ خازن‌ها با توجه به ولتاژ ورودی و ولتاژ لینک DC ناچیز است. در صورت استفاده از فیلتر سلفی خازنی در خروجی می‌توان ولتاژ خروجی سینوسی تولید کرد. ساختار ارائه شده هم به صورت تک‌فاز و هم به صورت سه‌فاز قابل بهره‌برداری است. به منظور تأیید تحلیل تئوری و بررسی مشخصات و عملکرد اینورتر پیشنهادی، اینورتر مورد نظر در محیط نرم‌افزار کامپیوتری شبیه‌سازی شده و در نهایت یک نمونه آزمایشگاهی از آن پیاده‌سازی و نتایج اندازه‌گیری‌های عملی ارائه شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۹): شکل موج ولتاژ خازن‌ها (الف): C_1 و C_2 ، (ب): C_3 و C_4

مراجع

- [1] Peng, Fang Z., "Z-source inverter for motor drives", 2004, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551), Vol 1. IEEE, 2004, <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355750>.
- [2] Peng, F.Z., Yuan, X., Fang, X., Qian, Z., "Z-source inverter for adjustable speed drives", IEEE power electronics letters, Vol. 1, No. 2, pp. 33-35, 2003, <https://doi.org/10.1109/LPEL.2003.820935>.
- [3] Siwakoti, Y.P., Peng, F.Z., Blaabjerg, F., Loh, P.C., Town, G.E., "Impedance-source networks for electric power conversion part I: A topological review", IEEE Transactions on power electronics, Vol. 30, No. 2, pp. 699-716, 2014, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2313746>.
- [4] Zhou, Z.J., Zhang, X., Xu, P., Shen, W.X., "Single-phase uninterruptible power supply based on Z-source inverter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 8, pp. 2997-3004, 2008, <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.924202>.
- [5] Kulka, A., Undeland, T., "Voltage harmonic control of Z-source inverter for UPS applications", In 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 657-662, IEEE, 2008, <https://doi.org/10.1109/EPEPMC.2008.4635339>.
- [6] Li, Y., Jiang, S., Cintron-Rivera, J.G., Peng, F.Z., "Modeling and control of quasi-Z-source inverter for distributed generation applications", IEEE Transactions on Industrial

- Electronics, Vol. 60, No. 4, pp. 1532-1541, 2012,
<https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2213551>.
- [7] Siwakoti, Y.P., Town, G.E., "Performance of distributed DC power system using quasi Z-Source Inverter based DC/DC converters", In 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 1946-1953. IEEE, 2013,
<https://doi.org/10.1109/APEC.2013.6520561>.
- [8] Gajanayake, C.J., Luo, F.L., Gooi, H.B., So, P.L., Siow, L.K., "Extended-boost Z-source inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 10, pp. 2642-2652, 2010,
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2050908>.
- [9] Nguyen, M.K., Lim, Y.C., Cho, G.B., "Switched-inductor quasi-Z-source inverter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 11, pp. 3183-3191, 2011,
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2141153>.
- [10] Ravindranath, A., Mishra, S.K., Joshi, A., "Analysis and PWM control of switched boost inverter", IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 60, No. 12, pp. 5593-5602, 2012,
<https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2230595>.
- [11] Nguyen, M.K., Le, T.V., Park, S.J., Lim, Y.C., Yoo, J.Y., "Class of high boost inverters based on switched-inductor structure", IET Power Electronics Vol. 8, No. 5, pp. 750-759, 2015,
<https://doi.org/10.1049/iet-pel.2014.0471>.
- [12] Fathi, H., Madadi, H., "Enhanced-boost Z-source inverters with switched Z-impedance", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 2, pp. 691-703, 2015,
<https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2477346>.
- [13] Jagan, V., Kotturu, J., Das, S., "Enhanced-boost quasi-Z-source inverters with two-switched impedance networks", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 9, pp. 6885-6897, 2017,
<https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2688964>.
- [14] Zhu, X., Zhang, B., Qiu, D., "Enhanced boost quasi-Z-source inverters with active switched-inductor boostnetwork", IET Power Electronics, Vol. 11, No. 11, pp. 1774-1787, 2018,
<https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0844>.
- [15] Gu, Y., Chen, Y., Zhang, B., "Enhanced-boost quasi-Z-source inverter with an active switched Z-network", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No.10, pp. 8372-8381, 2017,
<https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2786214>.
- [16] Gu, Y., Chen, Y., Zhang, B., "Enhanced-boost quasi-Z-source inverter with an active switched Z-network", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 10, pp. 8372-8381, 2017,
<https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2899937>.
- [17] Abbasi, M., Mardaneh, M., Babaei, E., Pilehvar, M.S., "Two high stepped up continuous input current active switched-inductor quasi-z-source inverters", In 2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC), pp. 1-6. IEEE, 2020,
<https://doi.org/10.1109/KPEC47870.2020.9167644>.
- [18] Kumar, A., Wang, Y., Raghuram, M., Naresh, P., Pan, X., Xiong, X., "An ultra-high gain quasi Z-source inverter consisting active switched network", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, Vol. 67, No. 12, pp. 3207-3211, 2020,
<https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.2970723>.
- [19] Abbasi, M., Eslahchi, A.H., Mardaneh, M., "Two symmetric extended-boost embedded switched-inductor quasi-Z-source inverter with reduced ripple continuous input current", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 6, pp. 5096-5104, 2017,
<https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2779433>.
- [20] Jamal, I., Elmorshedy, M.F., Dabour, S.M., Rashad, E.M., Xu, W., Almakhles, D.J., "A comprehensive review of grid-connected PV systems based on impedance source inverter", IEEE Access Vol. 10, pp. 89101-89123, 2022,
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3200681>.
- [21] Gayen, P.K., Das, S., "An enhanced ultra-high gain active-switched quasi Z-source inverter", IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, Vol. 69, No. 3, pp. 1517-1521, 2021,
<https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3129903>.
- [22] Abbasi, M., Mardaneh, M., Jamshidpour, E., "High gain PWM method and active switched boost Z-source inverter with less voltage stress on the devices", IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 37, No. 2, pp. 1841-1851, 2021,
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3104295>.
- [23] Babayi Nozadian, M.H., Babaei, E., Hosseini, S.H., "Effect of different pulse-width modulation control methods on the behaviour of the series modified switched boost inverter", IET Power Electronics Vol. 12, No. 12, pp. 3041-3055, 2019,
<https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5748>.