

## Design and Implementation of a Novel Three-port DC-DC Converter for Local Energy Applications

Shahin Mataei Dehbaghi,<sup>1</sup> Siroos Hemmati,<sup>2\*</sup> Vahid Abbasi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, shahinmataei@gmail.com

<sup>2</sup>Faculty of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, s.hemmati@kut.ac.ir

<sup>3</sup>Faculty of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, v\_abbasi@kut.ac.ir

### Keywords:

DC-DC converter  
multiport converter  
bidirectional port  
battery alone mode  
battery charging mode

**Abstract:** In this paper, a new three-port DC-DC converter is introduced. The designed converter benefits from a small number of elements, and it has a bidirectional port for the battery. This converter can operate in three different operating modes including renewable source-alone mode, battery-alone mode, and battery-charging mode. A prototype of the proposed converter was built and tested in the laboratory. Its dynamic responses to the changes in the input voltage and output load in all three operation modes verified the accuracy of the designed converter.

### Original Research Article

### Paper History:

Received: 10/03/2024

Revise: 13/07/2024

Accepted: 14/07/2024

**How to cite this article:** Mataei, Sh. et al, "Design and implementation of a novel three-port DC-DC converter for local energy applications", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 1, PP. 60-73, Spring 2024. <https://doi.org/10.22052/eem.2024.254530.1057>

© 2023 University of Kashan Press.

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



### Introduction

In this paper, a new three-port DC-DC converter is introduced. The designed converter benefits from a small number of elements, and it has a bidirectional port for the battery. In the case that the renewable energy source is not available, the converter is cable of feeding the load from the energy stored in the battery. Also, when the load is not heavy, it is possible to charge the battery from the renewable energy source. This converter can operate in three different operating modes including renewable source-only, battery-only, and battery-charging mode. Having these three operating modes, the converter can feed the load for a longer time with an appropriate planning. A prototype of the proposed converter was built and tested in the laboratory. Its

dynamic responses to the changes in the input voltage and output load in all three operation modes verified the accuracy of the designed converter.

### Materials and Methods

A new three-port step-down DC-DC converter along with its controller was designed. Using the KVL and KCL in switch on and off modes, the voltage gains of the converter in different operation modes were obtained. Then the number of turns in the inductors were calculated for a continuous current operation. In the next step, a PI voltage controller was designed. The comparison between the proposed converter with other similar converters was provided. The result of the experiments showed the accuracy of the

design method. With a low manufacturing cost, this converter can be used in the low power renewable energy applications such as road and street lighting.

### **Discussion and Conclusion**

In this paper, a new three-port DC-DC step-down converter has been introduced. The most important characteristics of this converter are: the small number of elements, a common ground

between the inputs and outputs, 3 operation modes, bidirectional port, and a battery alone-mode. To confirm the accuracy of the designed converter, a prototype of the proposed converter was built, and its dynamic performance in the presence of the changes in the input voltage and output load in all three operation modes were investigated in the laboratory. The obtained results have demonstrated the accuracy of the converter and its controller design.

## طراحی و ساخت یک مبدل DC-DC سه درگاه جدید برای سیستم‌های محلی انرژی

شاهین مطائی ده‌باغی<sup>۱</sup>، سیروس همتی<sup>۲\*</sup>، وحید عباسی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، shahinmataei@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، s.hemmati@kut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، v\_abbasi@kut.ac.ir

### واژه‌های کلیدی:

مبدل DC-DC  
مبدل چنددرگاه  
درگاه دوطرفه  
مد باتری تنها  
مد شارژ باتری

**چکیده:** در این مقاله، یک مبدل DC-DC سه درگاه جدید معرفی شده است. در طراحی این مبدل سعی بر این بوده که تعداد عناصر کم باشد و دارای درگاه دوطرفه برای اتصال باتری باشد. در صورت حذف منبع اصلی که از نوع تجدیدپذیر است، مبدل ارائه‌شده قادر است از طریق باتری بار را تغذیه نماید. همچنین در زمان‌های کم‌باری، امکان شارژ باتری از طریق منبع تجدیدپذیر فراهم شده است. این مبدل می‌تواند در سه مد عملکردی شامل منبع تجدیدپذیر تنها، باتری تنها و شارژ باتری کار کند. لذا با برنامه‌ریزی صحیح، امکان تغذیه بار به صورت بلندمدت ممکن می‌شود. یک نمونه از مبدل پیشنهادی برای تأیید نتایج طراحی ساخته شده و پاسخ دینامیکی آن به تغییرات ولتاژ ورودی و بار خروجی در هر سه مد عملکردی در آزمایشگاه ثبت شده است. نتایج به‌دست‌آمده در آزمایشگاه نشان‌دهنده صحت طراحی مبدل و کنترل‌کننده آن است. مبدل طراحی‌شده که هزینه ساخت بسیار پایینی دارد، می‌تواند در حضور یک منبع تجدیدپذیر (مثلاً پنل خورشیدی) به همراه یک باتری با ظرفیت مناسب، بار مورد نظر را به صورت بلندمدت تغذیه کند.

### مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

## ۱. مقدمه

به‌تازگی رشد قابل توجهی در استفاده از سیستم‌های فوتولتائیک (PV) مستقل از شبکه به‌عنوان تولید پراکنده (DG) به وجود آمده است. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (ESS) در کنار ماژول‌های PV برای غلبه بر ماهیت متغیر سیستم‌های PV که بارهای مستقل از شبکه را تغذیه می‌کند، الزامی است. در میان ESS‌های مختلف، باتری‌ها به‌طور گسترده برای سیستم‌های PV مستقل، برای ایجاد تعادل بین توان برداشت‌شده از PV و توان مورد نیاز بار استفاده می‌شوند. برای تطبیق سطوح مختلف ولتاژ ماژول PV، باتری و بار، از دو مبدل dc-dc مستقل یا مبدل‌های سه‌درگاه (TPC) یکپارچه استفاده می‌شود. فشردگی و کاهش تعداد و وزن اجزای مدار از مزایای اصلی TPC نسبت به مبدل‌های غیریکپارچه DC-DC است [۱ و ۲]. توپولوژی‌های TPC را می‌توان به توپولوژی‌های غیرایزوله [۳-۵]، نیمه‌ایزوله [۶-۹] و توپولوژی‌های کاملاً ایزوله [۱۰-۱۳] طبقه‌بندی کرد.

در مبدل‌های کاملاً ایزوله که در ساختارشان از ترانسفورماتور استفاده می‌شود، می‌توان با افزایش نسبت دور ترانس ولتاژ خروجی را افزایش داد؛ اما در این ساختار، جریان ورودی به‌صورت پالسی فرکانس بالاست که تأثیر زیادی روی عمر آرایه PV دارد. علاوه‌بر این، برای سرکوب رپل جریان ورودی به خازن‌های الکترولیتی بزرگ نیاز است. همچنین، استرس ولتاژ روی دیود خروجی بسیار بالاست که کارایی مدار را محدود می‌کند. علاوه‌بر این، به‌علت استفاده از المان‌های قدرت، هزینه و وزن مبدل‌های ایزوله بالاست. به‌منظور کاهش هزینه و بهبود کارایی سیستم، استفاده از مبدل‌های DC-DC غیرایزوله یک راه‌حل مناسب است [۱۴-۱۵].

به‌طورکلی مبدل‌های غیرایزوله به چند دسته تقسیم می‌شوند: دسته اول مبدل‌های چندورودی-تک‌خروجی، دسته دوم مبدل‌های تک‌ورودی-چندخروجی و دسته سوم نیز مبدل‌های چندورودی-چندخروجی است. در سال‌های اخیر این مبدل‌ها به یکی از موضوعات داغ در حوزه طراحی مدارات الکترونیک قدرت تبدیل شده و هدف اصلی در طراحی این مبدل‌ها دستیابی به ساختاری است که دارای خصوصیات همچون افزایش کارایی مناسب، کاهش استرس ولتاژ مناسب بر روی عناصر، مدهای عملکردی مختلف، درگاه دوطرفه برای شارژ و دشارژ باتری، پیوستگی جریان درگاه شارژ باتری برای افزایش طول عمر باتری، زمین مشترک بین منابع و بار و تعداد اجزای مناسب باشند.

در مرجع [۲۱] یک مبدل غیرایزوله تک‌خروجی دو ورودی

مبتنی بر سلف تزویج ارائه شده است که دارای رپل جریان ورودی کم، بهره ولتاژ بالا و استرس ولتاژ پایین روی کلیدهاست. با این حال، تعداد عناصر استفاده‌شده در این توپولوژی زیاد است و هیچ نقطه مشترکی بین ورودی‌ها و خروجی وجود ندارد. همچنین این مبدل از سه هسته مغناطیسی استفاده می‌کند که هزینه و وزن مبدل را افزایش می‌دهد. در مرجع [۲۲] یک مبدل چندورودی-چندخروجی پیشنهاد شده است. تعداد ورودی‌ها و خروجی‌ها در این توپولوژی می‌تواند متغیر باشد؛ اما برای هر ورودی، به یک کلید و یک هسته مغناطیسی نیاز است. بنابراین با در نظر گرفتن هزینه، تعداد درگاه‌های این ساختار محدود خواهد شد. در مرجع [۲۳] یک مبدل دو ورودی برای استفاده در ولتاژ بالا پیشنهاد می‌شود. این توپولوژی از بهره ولتاژ فوق‌العاده بالا، استرس ولتاژ پایین روی کلید و زمین مشترک بین درگاه‌های ورودی و درگاه بار بهره می‌برد. با این حال، رپل بالای جریان ورودی نقطه‌ضعف قابل توجه این مبدل است. پیشنهاد نویسندگان در مرجع [۲۴] یک مبدل دوخروجی-تک‌ورودی بوسه برای استفاده در ریزشبه‌های DC دوقطبی است. این توپولوژی دارای خروجی‌های دوقطبی است که می‌تواند توان را از درگاه خروجی به درگاه ورودی انتقال دهد. در مرجع [۲۵] یک توپولوژی غیرایزوله چنددرگاه مدولار پیشنهاد شده است که از مزایای آن می‌توان به استرس ولتاژ پایین کلیدها و تعداد عناصر کم مدار اشاره کرد. در مرجع [۲۶] یک مبدل چنددرگاه دوطرفه مبتنی بر خازن سوئیچ‌شونده برای استفاده در خودروهای الکتریکی پیشنهاد شده است. قابلیت باک و بوسه، تعداد کم عناصر مدار، پیک ولتاژ پایین روی کلیدها و تلفات کم از مزایای این توپولوژی است. با این حال، در مقایسه با توپولوژی‌های مشابه مقدار افزایش ولتاژ در آن پایین‌تر است.

در مقاله حاضر یک مبدل DC-DC سه‌درگاه غیرایزوله ارائه شده است که امکان اتصال منبع تجدیدپذیر در یک درگاه، باتری در درگاه دوم و بار در درگاه سوم را فراهم می‌کند. در زمانی که باتری و منبع تجدیدپذیر بار را تأمین می‌کنند، مبدل به‌صورت دوورودی-تک‌خروجی و زمانی که منبع تجدیدپذیر بار را تغذیه و باتری را شارژ می‌کند، مبدل به‌صورت تک‌ورودی-دو‌خروجی کار می‌کند. زمانی که منبع تجدیدپذیر در دسترس نباشد، باتری تغذیه بار را به عهده دارد و مبدل به‌صورت تک‌ورودی-تک‌خروجی کار می‌کند. مزایای اصلی مبدل ارائه‌شده در مقایسه با مبدل‌های قبلی را به‌صورت زیر می‌توان برشمرد:

- تعداد عناصر مداری کم؛
- زمین مشترک بین ورودی‌ها و خروجی‌ها؛

- درگاه دوطرفه برای شارژ و دشارژ باتری؛
- تعداد بالای مدهای کاری.

است. این مد کاری برای زمانی است که توان منبع تجدیدپذیر بیشتر و یا برابر با توان مورد نیاز خروجی باشد. در مد کاری دوم، زمانی که منبع تجدیدپذیر در دسترس نیست، باتری به‌تنهایی وارد مدار شده و توان خروجی را تأمین می‌کند. این مد برای شرایطی طراحی شده است که منبع تجدیدپذیر قادر به تولید توان کافی نباشد. در نهایت مد سوم برای شرایطی است که توان منبع تجدیدپذیر بیشتر از توان خروجی باشد و باتری نیاز به شارژ داشته باشد. در این شرایط، منبع تجدیدپذیر به‌صورت همزمان بار خروجی را تأمین و باتری را نیز شارژ می‌کند. این مد به مد شارژ باتری معروف است. در ادامه، مدهای کاری مختلف ذکر شده با جزئیات بیشتر بررسی می‌شود.

### ۱.۲. مد اول (منبع انرژی تجدیدپذیر تنها)

در این مد، منبع تجدیدپذیر به‌تنهایی توان خروجی را تأمین می‌کند و باتری شارژ کامل ولی قطع است. عملکرد مبدل در این مد به‌صورت تک‌کلیده و کاهنده (باک) بوده و دارای دو بازه زمانی عملکرد است. در شکل (۲ الف-د) جزئیات مربوط به این مد قابل مشاهده است. در شکل (۲ الف) عناصری که در این مد فعالیت دارند، نمایش داده شده است. با خاموش یا روشن بودن کلید  $S_1$  در این مد، دو حالت عملکردی مختلفی برای مبدل به وجود می‌آید. در شکل (۲-ب) شکل موج‌های کلیدزنی مبدل، شکل موج‌های جریان سلف‌ها و ولتاژ دیودها برای درک بهتر عملکرد مدار نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲-ج) مشاهده می‌شود، حالت اول در مد کاری اول زمانی است که کلید  $S_1$  روشن است. در این بازه زمانی،  $L_1$  از طریق منبع تجدیدپذیر و مسیر  $S_1$  شروع به شارژ شدن می‌کند. از طرفی دیگر، از مسیر  $D_2$ ، خازن  $C_1$  شارژ و بار نیز تأمین می‌گردد. شکل (۲-د) حالت دوم مبدل در مد کاری اول (در زمان خاموش بودن  $S_1$ ) را نشان می‌دهد. در این بازه با خاموش شدن کلید  $S_1$ ، جریان عبوری از سلف  $L_1$  دیود  $D_1$  را روشن کرده و از طریق آن،  $L_1$  و  $C_1$  برای تأمین بار دشارژ می‌گردند.

نتایج شبیه‌سازی این مد در شکل (۳) آورده شده است. در این شکل، شکل موج‌های ولتاژ کلید  $S_1$  و ولتاژ دیود  $D_1$ ، جریان سلف  $L_1$  و ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، استرس ولتاژ کلید و دیود برابر با ولتاژ ورودی است. در ضمن، سلف در مد CCM کار می‌کند.

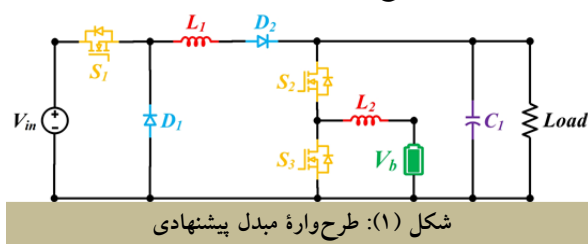
### ۲.۲. مد دوم (مد باتری تنها)

در این مد، همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، باتری به‌تنهایی توان خروجی را تأمین می‌کند. در این مد، مبدل به‌صورت

مطالب این مقاله به‌صورت زیر ارائه شده است: در بخش دوم، مبدل پیشنهادی ارائه و عملکرد آن در مدهای مختلف بررسی می‌شود. در بخش بعد، به تجزیه و تحلیل معادلات حاکم بر مبدل در مدهای کاری مختلف پرداخته می‌شود. مقایسه مبدل پیشنهادی با سایر مبدل‌ها در بخش چهارم ارائه می‌شود. در بخش پنجم به کنترل مبدل پرداخته می‌شود. در بخش ششم، نتایج آزمایش‌های عملی در آزمایشگاه بررسی می‌شود و در پایان خلاصه‌ای از مطالب مقاله ارائه می‌شود.

## ۲. مبدل پیشنهادی و بررسی عملکرد در مدهای مختلف

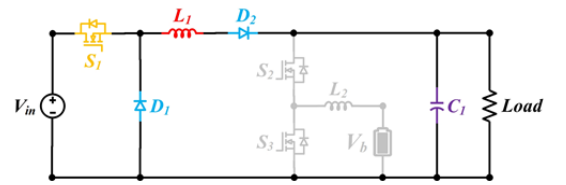
مبدل پیشنهادی یک مبدل DC به DC متشکل از یک درگاه ورودی و دو درگاه خروجی است. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده، یکی از درگاه‌های خروجی برای اتصال به بار و درگاه دیگر خروجی به‌صورت دوطرفه طراحی شده است که همواره می‌تواند باتری را شارژ و در صورت نیاز دشارژ نماید. این درگاه کمک می‌کند تا در شرایط مختلف، مبدل بتواند توان خروجی را تأمین نماید. مبدل پیشنهادی به‌صورت کاهنده طراحی شده است و برای مصرف‌کنندگانی همچون شارژرها، سیستم‌های روشنایی جاده‌ای، چراغ‌های راهنمایی و... که نیاز به ولتاژ پایین دارند، می‌تواند مورد نیاز را تأمین نماید. البته ذکر این نکته لازم است که در مد باتری تنها، این مبدل به‌صورت افزایشده کار می‌کند و سطح ولتاژ باتری را به سطح ولتاژ مورد نیاز بار افزایش می‌دهد؛ پس می‌توان گفت که این مبدل از نوع افزایشده/کاهنده است.



همان‌گونه که در شکل (۱) مشخص است، ساختار ارائه‌شده از دو سلف  $L_1$  و  $L_2$ ، یک خازن  $C_1$ ، دو دیود  $D_1$  و  $D_2$  و سه کلید  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  تشکیل شده است. این سه کلید نقش اصلی را در ایجاد سه مد کاری مدار پیشنهادی ایفا می‌کنند. مدار پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که با پیروی از یک الگوریتم کنترلی باعث ایجاد مدهای کاری زیر می‌شود. مد کاری اول: منبع تجدیدپذیر تنها، مد کاری دوم: باتری تنها و مد کاری سوم: شارژ باتری. در مد کاری اول، منبع تجدیدپذیر به‌تنهایی بار را تأمین می‌کند و باتری شارژ کامل

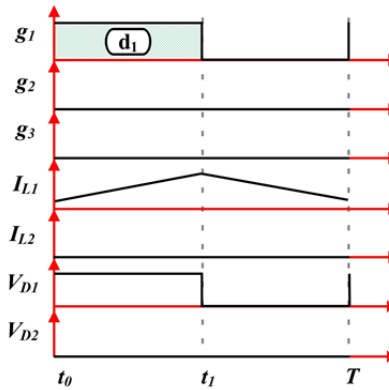
افزاینده (بوست) کار می‌کند.

عملکرد مبدل در این مد به صورت دو کلیده بوده و با توجه به خاموش یا روشن بودن این کلیدها، دو بازه زمانی مختلف عملکردی ایجاد می‌شود. در شکل (۴-الف) عناصری که در این مد فعالیت دارند مشخص شده‌اند. در شکل (۴-ب) شکل موج‌های کلیدزنی مبدل، شکل موج‌های جریان سلف‌ها و ولتاژ دیودها برای درک بهتر عملکرد مدار نمایش داده شده است.



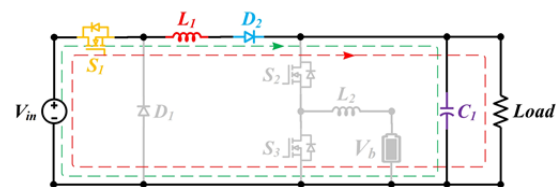
(الف)

همان‌طور که در شکل (۴-ج) دیده می‌شود، حالت اول مبدل پیشنهادی در این مد کاری، در زمان روشن بودن  $S_3$  است. در این بازه  $L_2$  از طریق باتری و کلید  $S_3$  شارژ می‌شود. از طرفی دیگر خازن  $C_1$  بار را تأمین می‌کند. شکل (۴-د) نیز حالت دوم مبدل پیشنهادی در مد کاری دوم را که در آن روشن  $S_2$  و خاموش  $S_3$  خاموش است نشان می‌دهد. در این بازه  $S_2$  وصل بوده و  $L_2$  برای تأمین بار و  $C_1$  دشارژ می‌گردد.



(ب)

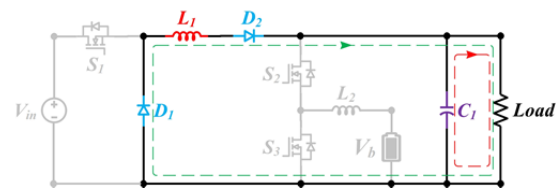
نتایج شبیه‌سازی این مد در شکل (۵) آورده شده است. در این شکل، شکل موج ولتاژ کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$ ، جریان سلف  $L_2$ ، ولتاژ باتری و ولتاژ خروجی نشان داده شده است. سلف  $L_2$  در مد CCM کار می‌کند و علت منفی بودن جریان آن به علت جهت قراردادی جریان است. در واقع، جریان ورودی به باطری نشان داده شده که منفی است، چون باطری در حال توان‌دهی به بار است.



(ج)

### ۲.۳. مد سوم (شارژ باتری)

در این مد منبع تجدیدپذیر بار را تأمین و باتری را شارژ می‌کند. این مد، همان‌گونه که در شکل (۶) نشان داده شده، برخلاف مدهای قبلی از سه بازه زمانی تشکیل شده است.

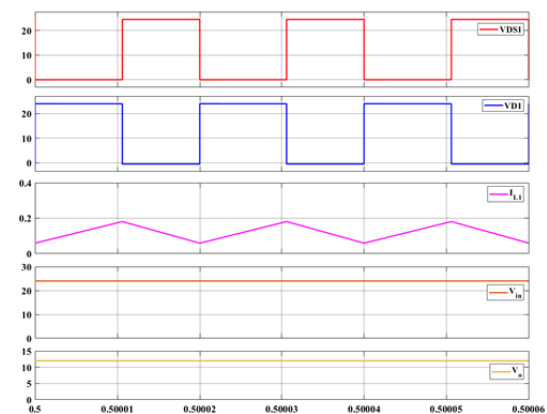


(د)

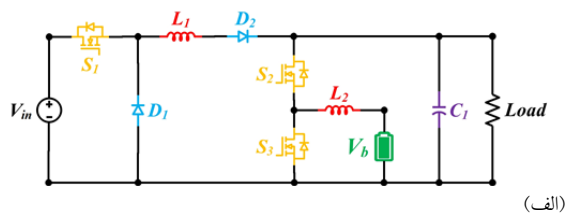
در شکل (۶-الف) عناصری که در این مد فعالیت دارند مشخص شده است. طبق این شکل، هر سه کلید مبدل در این مد مشارکت دارند. در شکل (۶-ب) شکل موج‌های کلیدزنی مبدل، شکل موج‌های جریان سلف‌ها و ولتاژ دیودها برای درک بهتر عملکرد مدار نمایش داده شده است.

شکل (۲): ساختار مبدل پیشنهادی در مد منبع تجدیدپذیر تنها؛ (الف) مدار معادل مبدل پیشنهادی در مد منبع تجدیدپذیر تنها؛ (ب) شکل موج عناصر در حالت‌های کلیدزنی؛ (ج) مبدل پیشنهادی در حالت اول مد اول؛ (د) مبدل پیشنهادی در حالت دوم مد اول

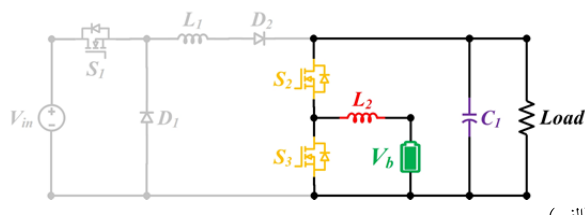
همان‌طور که در شکل (۶-ج) مشاهده می‌شود، حالت اول مبدل پیشنهادی در مد کاری سوم در زمان روشن بودن  $S_1$  و  $S_2$  است. در این بازه  $L_1$  از طریق  $S_1$  و منبع شارژ می‌شود. همچنین  $L_2$  و باتری از طریق  $S_2$  شارژ می‌شوند. از طرفی دیگر، از مسیر  $S_1$  خازن  $C_1$  بار تأمین می‌شود. در پایان حالت اول،  $S_2$  خاموش و  $S_3$  روشن می‌شود. شکل (۶-د) حالت دوم مبدل پیشنهادی در مد کاری سوم را در زمان روشن بودن  $S_1$  و  $S_3$  نشان می‌دهد. در این بازه  $L_1$  از طریق منبع و مسیر  $S_1$  به شارژ شدن ادامه می‌دهد. از طرفی دیگر، از مسیر  $S_1$  خازن  $C_1$  بار تأمین می‌گردد. از طرف دیگر، سلف  $L_2$  از طریق  $S_3$  باتری را شارژ می‌کند.



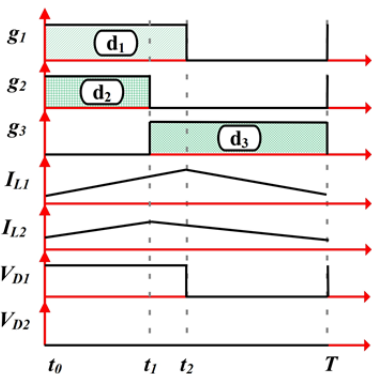
شکل ۳: شکل موج ولتاژ کلید، ولتاژ دیود، جریان سلف، ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی در مد اول



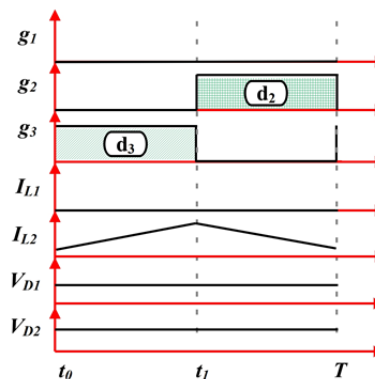
(الف)



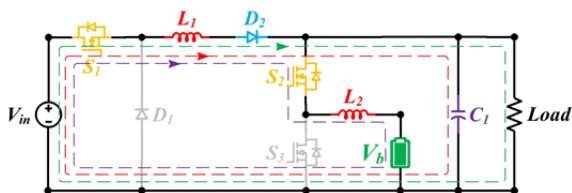
(ب)



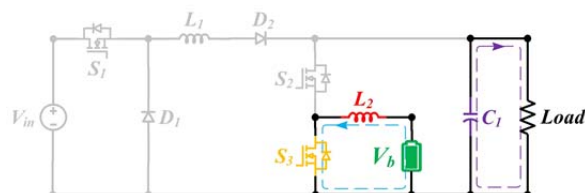
(ب)



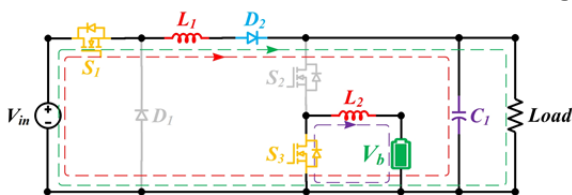
(ب)



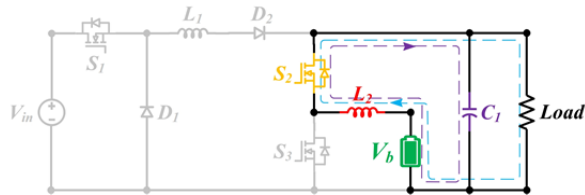
(ج)



(ج)



(د)

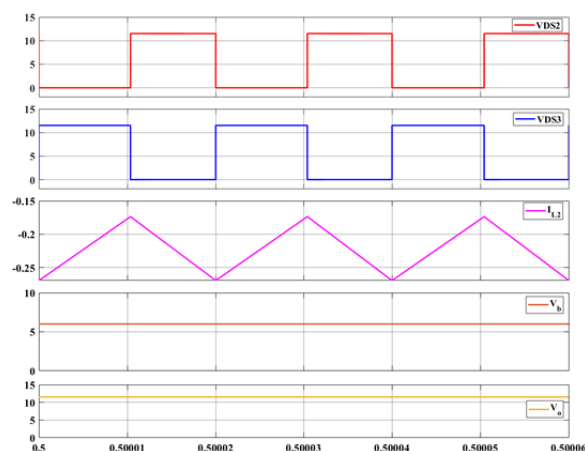


(د)

شکل (۴): ساختار مبدل پیشنهادی در مد باتری تنها؛ (الف) مدار معادل مبدل پیشنهادی در مد باتری تنها؛ (ب) شکل موج عناصر در حالت‌های کلیدزنی؛ (ج) مبدل پیشنهادی در حالت اول مد دوم؛ (د) مبدل پیشنهادی در حالت دوم مد دوم

شکل (۶): ساختار مبدل پیشنهادی در مد شارژ باتری؛ (الف) مدار معادل مبدل پیشنهادی در مد شارژ باتری؛ (ب) شکل موج عناصر در حالت‌های کلیدزنی؛ (ج) مبدل پیشنهادی در حالت اول مد سوم؛ (د) مبدل پیشنهادی در حالت دوم مد سوم؛ (ه) مبدل پیشنهادی در حالت سوم مد سوم

با خاموش شدن  $S_1$  در حالت دوم پایان و حالت سوم آغاز می‌شود. شکل (۴-ه) حالت سوم مبدل پیشنهادی در مد کاری سوم را نشان می‌دهد که در آن، از ۳ کلید مبدل، فقط  $S_3$  روشن است. به علت خاموش شدن  $S_1$ ،  $D_1$  توسط جریان عبوری از سلف  $L_1$  وصل شده و  $L_1$  و  $C_1$  برای تأمین بار دشارژ می‌گردند. سلف  $L_2$  نیز از طریق  $S_3$  باتری را شارژ می‌کند.



شکل (۵): شکل موج ولتاژ کلیدها، جریان سلف، ولتاژ باتری و ولتاژ خروجی در مد دوم



### ۲.۳. تجزیه و تحلیل مبدل در مد باتری تنها

با استفاده از شکل (۴-ب و ۴-ج) می‌توان معادله زیر را برای سلف  $L_2$  در حالت اول نوشت:

$$V_{L2} = V_b \quad (۶)$$

همچنین با استفاده از شکل (۴-ب و ۴-د) می‌توان معادله زیر را برای سلف  $L_2$  در حالت دوم نوشت:

$$V_{L2} = V_b - V_{C1} \quad (۷)$$

حال با توجه به قانون تعادل ولت-ثانیه برای سلف، رابطه ولتاژ خروجی قابل محاسبه است. با استفاده از روابط (۶ و ۷)، طبق قانون تعادل ولتاژ-ثانیه برای سلف  $L_2$  خواهیم داشت:

$$d_3(V_b) + (1 - d_3)(V_b - V_{C1}) = 0 \quad (۸)$$

$$V_{C1} = \frac{V_b}{1 - d_3} \quad (۹)$$

$$G_2 = \frac{V_o}{V_b} = \frac{1}{1 - d_3} \quad (۱۰)$$

### ۳.۳. تجزیه و تحلیل مبدل در مد شارژ باتری

با استفاده از شکل (۶-ب و ۶-ج) می‌توان معادلات زیر را برای سلف‌های مبدل در حالت اول نوشت:

$$V_{L1} = V_{in} - V_{C1} \quad (۱۱)$$

$$V_{L2} = V_{C1} - V_b \quad (۱۲)$$

همچنین با استفاده از شکل (۶-ب و ۶-د) می‌توان معادلات زیر را برای سلف‌ها در حالت دوم نوشت:

$$V_{L1} = V_{in} - V_{C1} \quad (۱۳)$$

$$V_{L2} = -V_b \quad (۱۴)$$

همچنین با استفاده از شکل (۶-ب و ۶-د) می‌توان معادلات زیر را برای سلف در حالت سوم نوشت:

$$V_{L1} = -V_{C1} \quad (۱۵)$$

$$V_{L2} = -V_b \quad (۱۶)$$

با توجه به قانون تعادل ولت-ثانیه برای سلف  $L_1$  رابطه ولتاژ خروجی قابل محاسبه است. با استفاده از روابط (۱۱، ۱۳ و ۱۵) طبق قانون تعادل ولتاژ-ثانیه برای سلف  $L_1$  خواهیم داشت:

$$d_2(V_{in} - V_{C1}) + (d_1 - d_2)(V_{in} - V_{C1}) + (1 - d_1)(-V_{C1}) = 0 \quad (۱۷)$$

$$V_{C1} = d_1 V_{in} \quad (۱۸)$$

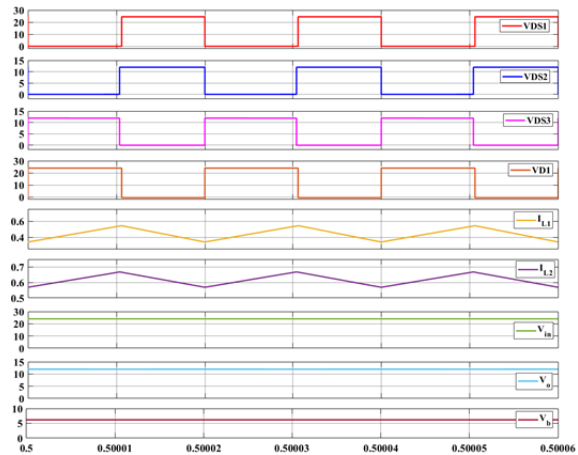
$$G_3 = \frac{V_o}{V_{in}} = d_1 \quad (۱۹)$$

همچنین با استفاده از روابط (۱۲، ۱۴ و ۱۶) طبق قانون تعادل ولتاژ-ثانیه برای سلف  $L_2$  خواهیم داشت:

$$d_2(V_{C1} - V_b) + (d_1 - d_2)(-V_b) + (1 - d_1)(-V_b) = 0 \quad (۲۰)$$

$$V_b = d_2 V_{C1} \quad (۲۱)$$

نتایج شبیه‌سازی این مد در شکل (۷) آورده شده است. در این شکل، شکل موج ولتاژ کلیدهای  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$ ، ولتاژ دیود  $D_1$ ، جریان سلف‌های  $L_1$  و  $L_2$ ، ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی و ولتاژ باتری آورده شده است. در این مد، منبع تجدیدپذیر هم باتری را شارژ می‌کند و هم توان مورد نیاز بار را تأمین می‌کند. مبدل در مد CCM کار می‌کند و جریان سلف  $L_2$  نیز مثبت است؛ یعنی توان وارد باتری می‌گردد.



شکل (۷): شکل موج ولتاژ کلیدها، ولتاژ دیود، جریان سلف‌ها، ولتاژ ورودی و ولتاژهای خروجی در مد سوم

### ۳. تجزیه و تحلیل مبدل پیشنهادی

در این بخش به تجزیه و تحلیل مبدل در مدهای کاری مختلف پرداخته می‌شود. در بخش اول، مد منبع تجدیدپذیر تنها، در بخش دوم، مد باتری تنها و در بخش سوم، مد شارژ باتری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۳.۱. تجزیه و تحلیل مبدل در مد منبع تجدیدپذیر تنها

با استفاده از شکل (۲-ب و ۲-ج) می‌توان معادله زیر را برای سلف  $L_1$  در حالت اول نوشت:

$$V_{L1} = V_{in} - V_{C1} \quad (۱)$$

همچنین با استفاده از شکل (۲-ب و ۲-د) می‌توان معادله زیر را برای سلف  $L_1$  در حالت دوم نوشت:

$$V_{L1} = -V_{C1} \quad (۲)$$

حال با توجه به قانون تعادل ولت-ثانیه برای سلف، رابطه ولتاژ خروجی قابل محاسبه است. با استفاده از روابط (۱ و ۲)، طبق قانون تعادل ولتاژ-ثانیه برای سلف  $L_1$  خواهیم داشت:

$$d_1(V_{in} - V_{C1}) + (1 - d_1)(-V_{C1}) = 0 \quad (۳)$$

$$V_{C1} = d_1 V_{in} \quad (۴)$$

$$G_1 = \frac{V_o}{V_{in}} = d_1 \quad (۵)$$



هستند که در آن فقط منبع به طور مستقل می تواند خروجی را تأمین کند. در مرجع [۱۶] دو مد کاری لحاظ شده است، اما مبدل پیشنهادی در این مقاله، همان طور که در بخش قبل اشاره شد، دارای سه مد کاری است. وجود مدهای کاری مختلف تضمین کننده استفاده بهینه از انرژی منبع تجدیدپذیر است. یکی دیگر از ویژگی هایی که در طراحی مبدل پیشنهادی لحاظ شده، دارا بودن زمین مشترک بین منبع ورودی و خروجی هاست که باعث حذف جریان نشتی و جریان چرخشی در مبدل می گردد. این مورد در برخی از مبدل ها از جمله [۱۳، ۱۷ و ۱۸] رعایت نشده است. مهم ترین ویژگی مبدل پیشنهادی تعداد عناصر مناسب آن نسبت به سایر مراجع است. به وضوح می توان در جدول (۱) مشاهده کرد که مبدل پیشنهادی با تعداد عناصر کمتر دارای ویژگی های مطلوبی همچون زمین مشترک بین ورودی و خروجی ها، درگاه دوطرفه و تعداد مدهای کاری مناسب است.

نکته دیگر حائز اهمیت در مقایسه مبدل ها، مربوط به استرس ولتاژ و جریان کلیدهاست. به همین دلیل در جدول (۱) دو ستون برای مقایسه مقادیر استرس ولتاژ و جریان سوئیچ ها با سایر مبدل ها آورده شده است. در جدول (۱) و شکل (۸) که براساس مقادیر جدول ترسیم شده است مشاهده می گردد که استرس ولتاژ سوئیچ  $S_1$  نسبت به مراجع [۱۷] و [۱۸] در وضعیت بهتری قرار دارد؛ اما نکته مهم و اصلی مربوط به استرس ولتاژ سوئیچ های  $S_2$  و  $S_3$  است. استرس ولتاژ سوئیچ های یاد شده نسبت به تمامی مراجع دیگر در وضعیت بهتری است.

$$V_b = d_2 d_1 V_{in} \quad (22)$$

$$G_b = \frac{V_b}{V_{in}} = d_2 d_1 \quad (23)$$

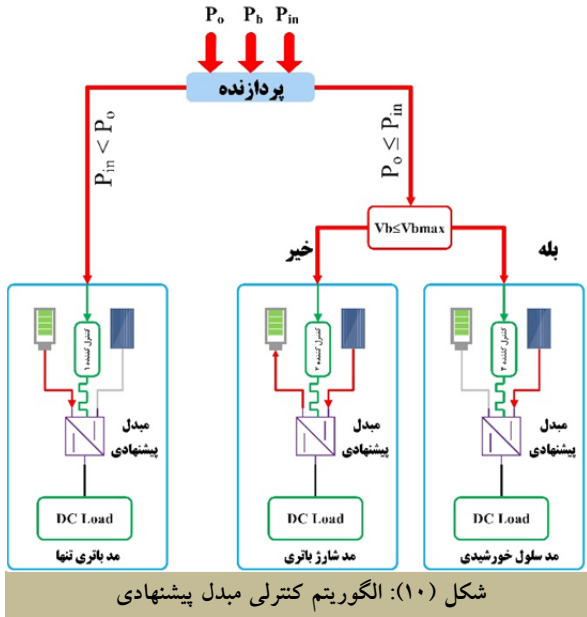
#### ۴. مقایسه مبدل پیشنهادی با سایر مبدل ها

در سالیان اخیر تمرکز فراوانی بر روی طراحی مبدل های چنددرگاهه DC-DC بوده است. طراحی یک مبدل چندخروجی DC-DC می تواند منجر به کاهش تعداد المان ها، پیچیدگی کنترلی کمتر و بهبود راندمان گردد. با توجه به افزایش کاربردهای مختلف مبدل های چنددرگاهه DC-DC، به تازگی مبدل هایی پیشنهاد شده که هرکدام مزایا و محدودیت های خود را دارد. همان گونه که در جدول (۱) مشاهده می شود، پارامترهایی از قبیل تعداد عناصر مبدل، داشتن زمین مشترک بین ورودی و خروجی ها، تعداد ورودی-خروجی، تعداد مدهای عملکردی، تعداد درگاه های دوطرفه، داشتن مد باتری تنها، داشتن درگاه دوطرفه در مبدل پیشنهادی با سایر مراجع مقایسه شده است. طبق این جدول می توان مشاهده کرد که همه مبدل های مقایسه شده از نوع DC-DC با یک ورودی و دوخروجی اند. معیارهایی همچون داشتن درگاه دوطرفه و داشتن مد باتری تنها در مبدل های چنددرگاهه یک ویژگی مهم است که در شرایطی که توان در سمت منبع تجدیدپذیر افت می کند و یا قطع می شود، انرژی مورد نیاز بار توسط باتری تأمین می گردد، یا وقتی که توان منبع انرژی تجدیدپذیر بیشتر از توان مورد نیاز بار باشد می توان باتری را شارژ نمود. در مبدل های ارائه شده در جدول (۱) ویژگی فوق لحاظ نشده است. مبدل های مراجع [۱۳، ۱۴، ۱۷ و ۱۸] دارای یک مد کاری

جدول (۱): مقایسه مبدل پیشنهادی با سایر مبدل ها

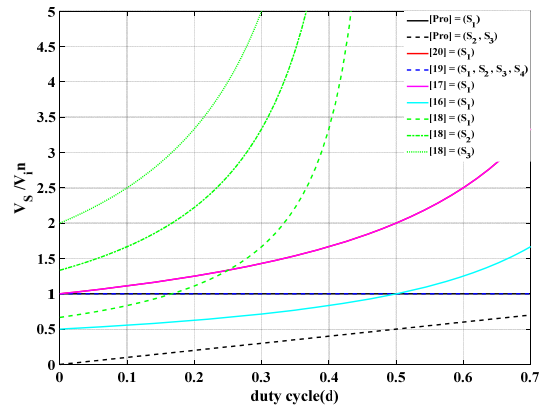
مراجع	تعداد عناصر					زمین مشترک	تعداد ورودی تعداد خروجی	درگاه دوطرفه	تعداد مدهای کاری	استرس ولتاژ سوئیچ	استرس جریان سوئیچ
	دیود	سلف	خازن	کلید	تعداد کل						
۱۶	۵	۱	۵	۱	۱۲	خیر	۱ ورودی ۲ خروجی	خیر	۱	$S_1 = \frac{V_{in}}{2(1-d)}$	$S_1 = \frac{I_{in} - \frac{\Delta i}{2}}{d}$
۱۷	۶	۱	۶	۱	۱۴	بله	۱ ورودی ۲ خروجی	خیر	۱	$S_1 = \frac{V_{in}}{(1-d)}$	$S_1 = \frac{I_{in} - \frac{\Delta i}{2}}{d}$
۱۸	۳	۲	۳	۳	۱۱	بله	۱ ورودی ۲ خروجی	خیر	۲	$S_1 = \frac{V_{in}}{3(d_1 - d_2)}$ $S_2 = \frac{2V_{in}}{3(d_1 - d_2)}$ $S_3 = \frac{V_{in}}{(d_1 - d_2)}$	$S_1 = I_{in} - \frac{\Delta i}{2}$ $S_2 = I_{in} - \frac{\Delta i}{2}$ $S_3 = I_{in} + \frac{\Delta i}{2}$
۱۹	۲	۲	۳	۴	۱۱	خیر	۱ ورودی ۲ خروجی	خیر	۱	$S_1 = S_2 = V_{in}$ $S_3 = S_4 = V_{in}$	-
۲۰	۲	۱	۲	۱	۶	خیر	۱ ورودی ۲ خروجی	خیر	۱	$S_1 = \frac{V_{in}}{(1-d)}$	$S_1 = I_{in} + \frac{\Delta i}{2}$
پیشنهادی	۲	۲	۱	۳	۸	بله	۱ ورودی ۲ خروجی	بله	۳	$S_1 = V_{in}$ $S_2 = d_2 V_{in}$ $S_3 = d_2 V_{in}$	$S_1 = I_{in} + \frac{\Delta i}{2}$ $S_2 = \left(I_{in} - \frac{\Delta i}{2}\right) d_2$ $S_3 = \left(I_{in} + \frac{\Delta i}{2}\right) d_2$

کافی دارد و سلول خورشیدی فقط توان خروجی را تأمین می‌کند. در مد دوم، زمانی که باتری دارای شارژ کافی نباشد، سلول خورشیدی همزمان باتری را شارژ و خروجی را نیز تأمین می‌کند. مد کاری سوم نیز زمانی فعال می‌شود که سلول خورشیدی قادر به تأمین خروجی نباشد. در این صورت، باتری به‌تنهایی توان خروجی را تأمین می‌کند. پس از تشخیص مد کاری، پردازنده، کنترل‌کننده کنترل‌کننده مناسب را انتخاب کرده و مبدل را در کمترین زمان، توسط کنترل‌کننده PI مربوطه به پایداری مناسب می‌رساند.



## ۶. نتایج آزمایشگاهی

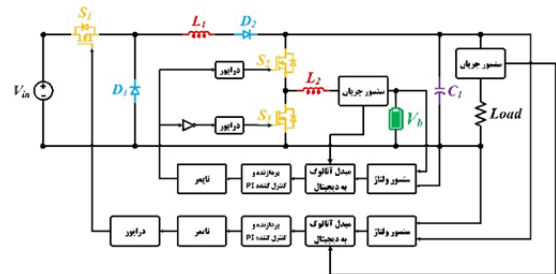
برای تأیید تحلیل‌ها و بررسی عملکرد مبدل، یک نمونه اولیه با استفاده از اجزای جدول (۲) ساخته شده است. علاوه بر این، در جدول (۲) مقادیر  $V_b$ ،  $V_{in}$ ، که به ترتیب ۲۴ و ۱۲ ولت در نظر گرفته شده است و فرکانس کلیدزنی (۵۰ KHz) و مشخصات عناصر مورد استفاده نمایش داده شده‌اند. در شکل (۱۰) نمونه اولیه مبدل پیشنهادی ساخته شده قابل رؤیت است. نتایج آزمایشگاهی مبدل پیشنهادی برای مد منبع تجدیدپذیر فقط در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) نشان داده شده است. در شکل (۱۱) استرس ولتاژ عناصر در مد منبع تجدیدپذیر تنها نمایش داده شده است. مطابق این شکل، استرس ولتاژ کلید اول برابر با ۲۴/۲ ولت است. استرس ولتاژ دیود اول نیز ۲۳/۹ ولت است. در واقع، شبیه به مبدل باک، استرس ولتاژ کلید و دیود با  $V_{in}$  برابر است. استرس ولتاژ خازن خروجی نیز برابر با ۱۲/۶ ولت است. میانگین جریان ورودی هم برابر با ۶/۶۵ آمپر است.



شکل (۸): مقایسه استرس ولتاژ سوئیچ‌های مبدل پیشنهادی با سایر مراجع

## ۵. کنترل حلقه‌بسته مبدل

ساختار کنترل حلقه‌بسته مبدل پیشنهادی در شکل (۹) نمایش داده شده است. مطابق این شکل، ابتدا ولتاژ خروجی و ولتاژ باتری توسط سنسورها یا تقسیم مقاومتی اندازه‌گیری شده و از طریق مبدل آنالوگ به دیجیتال به میکروکنترلر (STM32) ارسال می‌شود. بعد از محاسبات مربوط به کنترل‌کننده (PI)، سیگنال کنترلی با کمک واحد تایمر به سیگنال PWM تبدیل شده و به درایورها (IR2104) اعمال می‌گردد. در مبدل پیشنهادی کلید  $S_1$  ولتاژ خروجی اول (بار) را کنترل می‌کند. همچنین کلید  $S_2$  و  $S_3$  ولتاژ باتری را کنترل می‌کنند. در مبدل پیشنهادی هر کنترل‌کننده به‌صورت مستقل از کنترل‌کننده دیگر کار می‌کند و هر کنترل‌کننده ضرایب متفاوتی دارد.



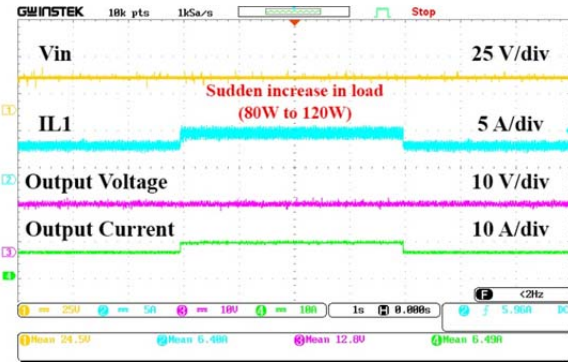
شکل (۹): ساختار کنترل حلقه‌بسته مبدل پیشنهادی

برای تعیین مد کاری مبدل از الگوریتم نشان داده شده در شکل (۷) استفاده می‌شود. پردازنده مرکزی براساس مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ و جریان، توان در سه درگاه ورودی، خروجی و باتری را محاسبه و با مقایسه آن‌ها مد مناسب و کنترل‌کننده متناظر را انتخاب می‌کند. طبق الگوریتم ارائه شده، زمانی که توان درخواستی بار کمتر از توان قابل تأمین توسط سلول خورشیدی باشد، دو مد کاری برای مبدل تعریف می‌گردد. مد کاری اول زمانی است که باتری شارژ

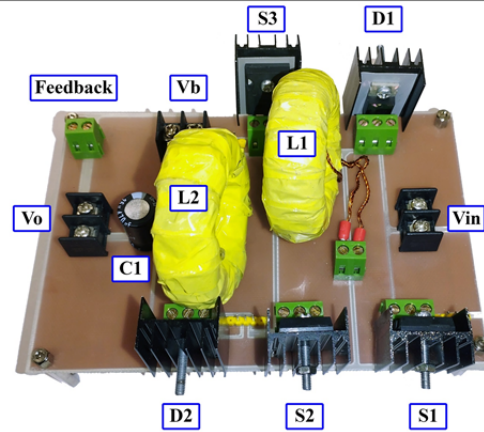
جدول (۲): جزئیات قطعات و پارامترهای مد همزمان مبدل پیشنهادی

پارامتر	مقدار
ولتاژ منبع تجدیدپذیر	24V
ولتاژ باتری	6V
فرکانس کلیدزنی	50KHz
کلید	IRFP064NPbf
دیود	MBR1050CT
اندازه سلف	400μH, 400μH
اندازه خازن	470μF

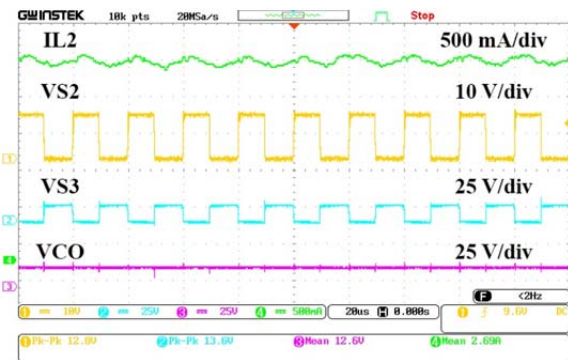
در شکل (۱۲) پاسخ مدار به تغییرات ولتاژ ورودی ثبت شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، ولتاژ ورودی تغییر کرده، اما ولتاژ خروجی روی ۱۲ ولت کنترل شده است. تغییر ولتاژ ورودی از ۱۲ تا ۲۲ ولت و برگشت مجدد به ۱۲ ولت است. خروجی های ثبت شده، نشان دهنده عملکرد مناسب مبدل و کنترل کننده طراحی شده در برابر تغییرات ولتاژ ورودی است.



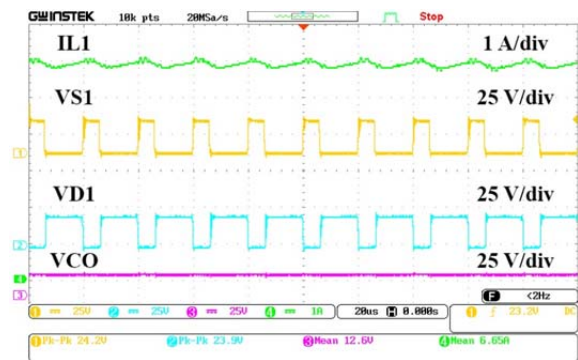
شکل (۱۴): پاسخ خروجی ثابت به ازای افزایش توان مبدل در مد منبع تجدیدپذیر تنها



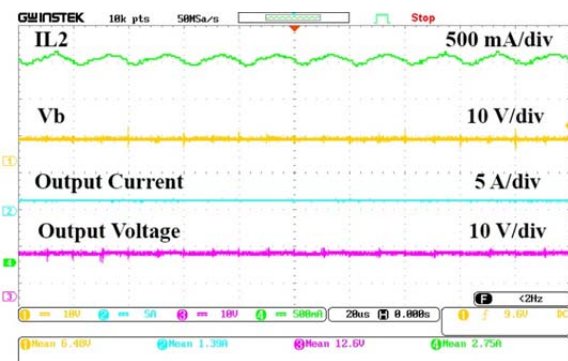
شکل (۱۱): نمونه اولیه مبدل پیشنهادی



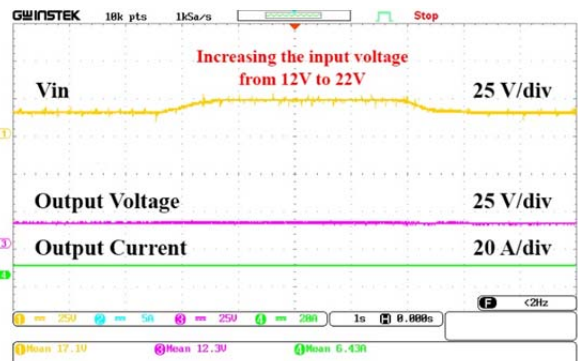
شکل (۱۵): استرس ولتاژ المانها در نمونه آزمایشگاهی در مد باتری تنها



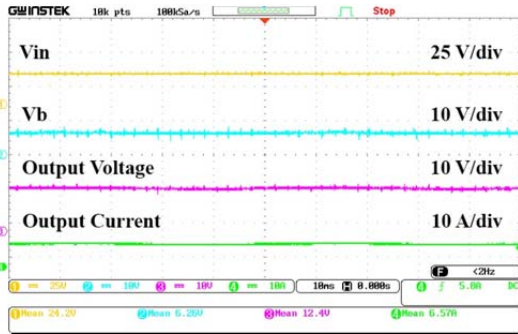
شکل (۱۲): استرس ولتاژ المانها در نمونه آزمایشگاهی در مد منبع تجدیدپذیر تنها



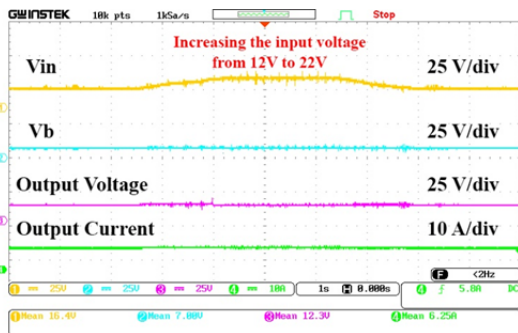
شکل (۱۶): میزان ولتاژ و جریان باتری و خروجی مبدل در مد باتری تنها



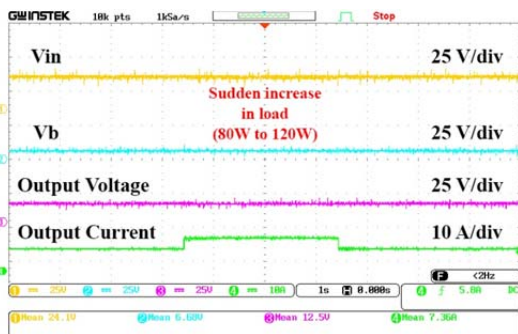
شکل (۱۳): پاسخ خروجی ثابت به ازای تغییر ورودی مبدل در مد منبع تجدیدپذیر تنها



شکل (۱۹): ولتاژها و جریان‌های ورودی و خروجی و توان خروجی مبدل در مد شارژ باتری



شکل (۲۰): پاسخ خروجی ثابت به‌ازای تغییر ورودی مبدل در مد شارژ باتری



شکل (۲۱): پاسخ خروجی ثابت به‌ازای افزایش توان مبدل در مد شارژ باتری

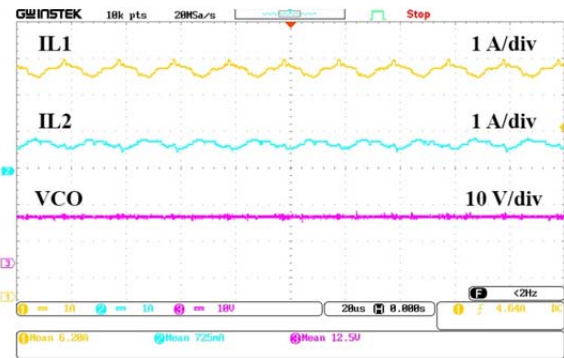
در شکل (۱۸) ولتاژ پنل خورشیدی و باتری به‌ترتیب برابر با ۲۴/۲ ولت و ۶/۲۶ ولت است. ولتاژ و جریان خروجی نیز برابر با ۱۲/۴ ولت و ۶/۵۷ آمپر است؛ در نتیجه توان خروجی برابر با ۸۱/۵ وات است.

در شکل (۱۹) پاسخ مبدل به تغییرات ورودی بررسی شده است. طبق شکل، تغییرات ولتاژ در ورودی (از ۱۲ تا ۲۲ و برگشت به ۱۲ ولت)، تأثیری روی ولتاژ خروجی ندارد. ولتاژ و جریان خروجی در طی این آزمایش نیز به‌ترتیب برابر با ۱۲/۳ ولت و ۶/۲۵ آمپر بوده است.

در شکل (۲۰) نیز عملکرد مبدل در پاسخ به تغییرات بار بررسی شده است. با افزایش توان خروجی از ۸۰ به ۱۲۰ و برگشت

در شکل (۱۳) پاسخ مدار به تغییرات بار ثبت شده است. طبق شکل، با افزایش توان بار از ۸۰ به ۱۲۰ وات همچنان ولتاژ خروجی کنترل شده که عملکرد مناسب مبدل و کنترل‌کننده در برابر تغییرات بار را تصدیق می‌کند.

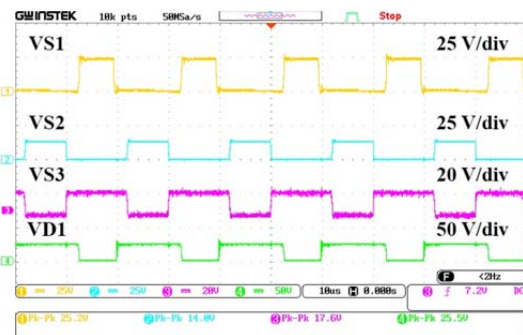
شکل‌های (۱۴) و (۱۵) عملکرد مبدل در مد باتری تنها را نمایش می‌دهند. در شکل (۱۴) استرس ولتاژ عناصر در مد باتری تنها نمایش داده شده است. استرس ولتاژ کلید دوم و کلید سوم به‌ترتیب برابر با ۱۲/۸ و ۱۳/۶ ولت است. استرس ولتاژ خازن خروجی نیز برابر با ۱۲/۶ ولت و جریان ورودی از باتری به‌ترتیب برابر با ۲/۶۹ آمپر است. در شکل ۱۵ ولتاژ و جریان باتری به‌ترتیب برابر با ۶/۴۸ ولت و ۱/۳۹ آمپر است. ولتاژ و جریان خروجی نیز به‌ترتیب برابر با ۱۲/۶ ولت و ۲/۷۵ آمپر هستند.



شکل (۱۷): جریان سلف‌ها و ولتاژ خازن در مد شارژ باتری

نتایج آزمایشگاهی مبدل پیشنهادی در مد شارژ باتری نیز در شکل‌های (۱۶) تا (۲۰) نمایش داده شده است.

مطابق شکل (۱۶)، جریان ورودی از منبع تجدیدپذیر و جریان شارژ باتری به‌ترتیب برابر با ۶/۲ و ۰/۷۲۵ آمپر است. ولتاژ خازن خروجی نیز برابر با ۱۲/۵ ولت است. در شکل (۱۷) استرس ولتاژ کلید اول، دوم، سوم و استرس ولتاژ دیود اول نمایش داده شده است. استرس ولتاژ عناصر یادشده به‌ترتیب برابر با ۲۵/۲ ولت، ۱۴ ولت، ۱۷/۶ ولت و ۲۵/۵ ولت است.



شکل (۱۸): استرس ولتاژ المان‌ها در نمونه آزمایشگاهی در مد شارژ باتری

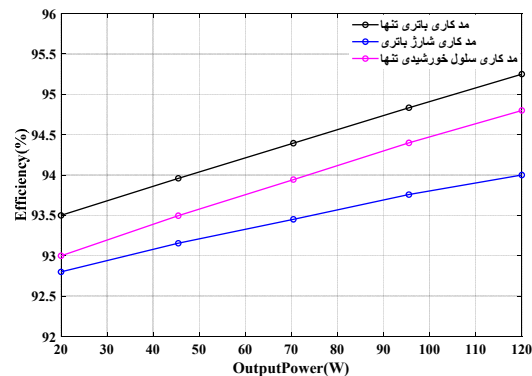


## ۷. نتیجه گیری

در این مقاله، یک مبدل کاهنده/افزاینده جدید سه درگاه DC-DC معرفی شد. مهم ترین مشخصات این مبدل عبارتند از: تعداد کم عناصر، داشتن زمین مشترک بین ورودی و خروجی ها، داشتن ۳ مد عملکردی، داشتن درگاه دوطرفه و داشتن مد باتری تنها. برای تأیید نتایج طراحی، یک نمونه از مبدل پیشنهادی ساخته شد و پاسخ دینامیکی آن به تغییرات ولتاژ ورودی و بار خروجی در هر سه مد عملکردی در آزمایشگاه ثبت شد. نتایج به دست آمده، نشان دهنده صحت طراحی مبدل و کنترل کننده است. مبدل طراحی شده که هزینه ساخت بسیار پایینی دارد، می تواند با یک منبع تجدیدپذیر (مثلاً پنل خورشیدی) به همراه یک باتری، بار مورد نظر را به صورت طولانی مدت تغذیه نماید.

مجدد به ۸۰ وات، ولتاژ خروجی کنترل شده که مجدداً تأییدکننده طراحی مناسب کنترل کننده برای مبدل پیشنهادی است. براساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده، عملکرد دینامیکی مبدل و کنترل کننده طراحی شده تصدیق می گردد.

نتایج بازدهی مبدل در مدهای کاری مختلف در شکل (۲۱) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، بیشترین بازدهی متعلق به مد کاری باتری تنها بوده و کمترین بازدهی نیز متعلق به مد شارژ باتری است. در توان ۱۲۰ وات راندمان مبدل در مد کاری باتری تنها ۹۵/۲٪، در مد کاری سلول خورشیدی تنها ۹۴/۷٪ و در مد شارژ باتری ۹۴٪ است.



شکل (۲۲): تغییرات بازدهی مبدل پیشنهادی در مدهای مختلف کاری

## مراجع

- [1] Zhu, H., Zhang, D., Zhang, B. Zhou, Z., "A nonisolated three-port DC-DC converter and three-domain control method for PV-battery power systems", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 62, No. 8, pp. 4937-4947, Aug. 2015. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2393831>.
- [2] Marei, M. I., Alajmi, B. N., Abdelsalam, I. Ahmed, N. A., "An Integrated Topology of Three-Port DC-DC Converter for PV-Battery Power Systems," IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, Vol. 3, pp. 409-419, 2022. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2022.3182977>.
- [3] Zhu, H., Zhang, D., Liu, Q. Zhou Z., "Three-port DC/DC converter with all ports current ripple cancellation using integrated magnetic technique", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 31, No. 3, pp. 2174-2186, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2433675>.
- [4] Faraji, R., Farzanehfard, H., Kampitsis, G., Mattavelli, M., Matioli, E. Esteki, M., "Fully soft-switched high step-up nonisolated three-port DC-DC converter using GaN HEMTs", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 67, No. 10, pp. 8371-8380, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2944068>
- [5] Saadatizadeh, Z., Babaei, E., Blaabjerg, F. Cecati, C., "Three-port high step-up and high step-down DC-DC converter with zero input current ripple", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 36, No. 2, pp. 1804-1813, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3007959>.
- [6] Hong, J., Yin, J., Liu, Y., Peng, J. Jiang, H., "Energy management and control strategy of photovoltaic/battery hybrid distributed power generation systems with an integrated three-port power converter", IEEE Access, Vol. 7, pp. 82838-82847, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923458>.
- [7] Sun, X., Shen, Y., Li, W. Wu, H., "A PWM and PFM hybrid modulated three-port converter for a standalone PV/battery power system", IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., Vol. 3, No. 4, pp. 984-1000, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2424718>.
- [8] Zeng, J., Qiao, W. Qu, L., "An isolated three-port bidirectional DC-DC converter for photovoltaic systems with energy storage", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 51, No. 4, pp. 3493-3503, Jul./Aug. 2015. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2399613>
- [9] Zhu, H., Zhang, D., Athab, H. S., Wu, B. Gu, Y., "PV isolated three-port converter and energy-balancing control method for PV-battery power supply applications", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 62, No. 6, pp. 3595-3606, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2378752>.
- [10] Botalla, L. P.-, Oggier, G. G. García, G. O., "Extending the power transfer capability of a three-port DC-DC converter for hybrid energy storage systems", IET Power Electron., Vol. 10, No. 13, pp.

- 1687-1697, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0422>.
- [11] Wang, Z., Luo, Q., Wei, Y., Mou, D., Lu, X. Sun, P., "Topology analysis and review of three-port DC-DC converter", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 35, No. 11, pp. 11783-11800, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2985287>.
- [12] Biswas, I., Kastha, D. Bajpai, P., "Small signal modeling and decoupled controller design for a triple active bridge multiport DC-DC converter", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 36, No. 2, pp. 1856-1869, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3006782>.
- [13] Alajmi, B., Marei, I. M., Abdelsalam, I. Alhajri, M. F., "Analysis and design of a multi-port DC-DC converter for interfacing PV systems", Energies, Vol. 14, No. 7, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14071943>.
- [14] Li, W. He, X., "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 4, pp. 1239-1250, April 2011. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2049715>.
- [15] Banaee, M.R, Ajdar Faeghi Bonab, H. "A non-isolated high gain DC-DC converter for solar energy applications", Energy Engineering and Management, Vol.7, No. 1, pp.14-29, 2022.
- [16] Krishna, B., Uma Maheswar Rao, P., Karthikeyan, V., "High-gain single-switch single-input dual-output DC-DC converter with reduced switching stress" *Int J Circ Theor* 1998-2015. *Appl.* 2022. <https://doi.org/10.1002/cta.3240>.
- [17] Radmanesh, H., Jashnani, H., Pourjafar, S., Maalandish, M. "A dual-output single-input non-isolated DC-DC converter with reduced semiconductors stress" *Int J Circ Theor*, Vol. 51, No. 2, pp. 594-610 *Appl.* 2023.. <https://doi.org/10.1002/cta.3451>.
- [18] Alizadeh Pahlavani, M.R., Shokati Asl, E. "DC-DC SIDO converter with low-voltage stress on switches: analysis of operating modes and design considerations" IET Power Electronics, Vol. 13, pp. 233-247, 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.6184>.
- [19] Ganjavi, A., Ghoreishy, H., Ahmad, A. A., "A Novel Single-Input Dual-Output Three-Level DC-DC Converter," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 65, No. 10, pp. 8101-8111, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2807384>.
- [20] Rostami, S., Abbasi, V. Parastesh, M., "Proposing Cost-Effective and Single Switch Dual Output Converters for Using Renewable Energy by Home Costumers," 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tabriz, Iran, 2020, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9260757>.
- [21] Lionel, FDJ., Dias, J., Srinivasan, MK., Parandhaman B, Prabhakaran P. "A novel non-isolated dual-input DC-DC boost converter for hybrid electric vehicle application", *Int J Emerg Electr Power Syst.* Vol. 22, No. 2, pp. 191-204, 2021. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2020-0229>.
- [22] Mohseni, P., Hosseini, SH., Sabahi, M., Jalilzadeh, T., Maalandish, M., "A new high step-up multi-input multi-output DC-DC converter", *IEEE Trans Ind Electron.* Vol. 66, No. 7, pp. 5197-5208, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2868281>.
- [23] Pourjafar, S., Shayeghi, H., Sedaghat, F., SeyedShenava, SJ., "A dual-input DC-DC structure with high voltage gain suggested for hybrid energy systems", *IET Power Electron.* Vol. 14, No. 10, pp. 1792-1805, 2021. <https://doi.org/10.1049/pel2.12149>.
- [24] Rezayi, S., Iman-Eini, H., Hamzeh, M., Bacha, S., Farzamkia, S., "Dual-output DC/DC boost converter for bipolar DC microgrids", *IET Renew Power Gener.* Vol. 13, No. 8, pp. 1402-1410, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6167>.
- [25] Varesi, K., Hosseini, SH., Sabahi, M., Babaei, E., "Modular non-isolated multi-input high step-up dc-dc converter with reduced normalized voltage stress and component count", *IET Power Electron.* Vol. 11, No. 6, pp. 1092-1100, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0483>.
- [26] Shayeghi, H., Pourjafar, S., Hashemzadeh, SM., "A switching capacitor based multi-port bidirectional DC-DC converter", *IET Power Electron.* Vol. 14, No. 9, pp. 1622-1636, 2021. <https://doi.org/10.1049/pel2.12137>.