



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Modular Switched-Capacitor Multilevel Inverter for Photovoltaic Applications with Lower Devices

Ali Seifi ^{a,*}, Seyed Hossein Hosseini ^a, Mehrdad Tarafdar Hagh ^a, Majid Hosseinpour ^b

^a Department of Electrical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-07-03

Revised: 2025-06-21

Accepted: 2025-08-25

Keywords:

Multi-level inverter;
Thermal loss simulation;
Reduce devices;
Grid connection;
Photovoltaic;
25 level;

ABSTRACT

In this paper, a new structure for a multilevel inverter based on the switched capacitor is presented. The proposed sub-module with one source and one capacitor is able to generate 5 voltage levels at the output, in addition to this, the proposed cascade structure with two isolated DC voltage sources along with two capacitors is able to generate 25 voltage levels at the output. Also, this structure is able to increase the input voltage using a capacitor. The proposed structure is able to charge the capacitor without using a sensor, in other words, the proposed structure is self-charging. In addition to working separately from the grid, the proposed structure can also be used connected to the grid for photovoltaic applications. To confirm the proposed structure, a quantitative comparison with similar structures has been done. In addition, a heat loss simulation has been done for the proposed structure. The simulation results confirm the functionality of the proposed structure.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34650.2698>

© 2026 Published by Semnan University Press.

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

* Corresponding author.

E-mail address: A.seifi@tabrizu.ac.ir

How to cite this article:

A Seifi, S H Hosseini, M Tarafdar Hagh and M Hosseinpour, "Modular Switched-Capacitor Multilevel Inverter for Photovoltaic Applications with Lower Devices," Journal of Modeling in Engineering, 24 85 (2026): 85-98, doi: 10.22075/jme.2025.34650.2698

اینورتر چندسطحی خازن سوئیچ شده مازولار برای کاربردهای فتوولتائیک با تعداد ادوات کمتر

علی سیفی^{۱*}، سیدحسین حسینی^۱، مهرداد طرفدارحق^۱، مجید حسین پور^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳	در این مقاله یک ساختار جدید برای اینورتر چندسطحی مبتنی بر خازن سوئیچ شده ارائه شده است. ساب مازول پیشنهادی با یک منبع و یک خازن قادر است ۵ سطح ولتاژ در خروجی تولید نماید. علاوه بر این، ساختار آبخاری پیشنهادی با دو منبع ولتاژ جریان مستقیم ایزوله به همراه دو خازن قادر است تا ۲۵ سطح ولتاژ در خروجی تولید کند. همچنین این ساختار قادر است ولتاژ ورودی را با استفاده از خازن افزایش بدهد. ساختار پیشنهادی بدون استفاده از سنسور قادر است خازن را شارژ نماید؛ به عبارت دیگر ساختار پیشنهادی خود-شارژ است. ساختار پیشنهادی علاوه بر کارکرد به صورت منفصل از شبکه می تواند به صورت متصل به شبکه برای کاربرد فتوولتائیک نیز استفاده شود. برای تایید ساختار پیشنهادی یک مقایسه کمی با ساختارهای مشابه انجام شده است. علاوه بر این شبیه سازی تلفاتی-حرارتی برای ساختار پیشنهادی انجام شده است. عملکرد ساختار پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی تأیید شده است.
واژگان کلیدی: اینورتر چندسطحی، شبیه سازی تلفاتی-حرارتی، کاهش ادوات، اتصال به شبکه، فتوولتائیک، بیست و پنج سطحی.	
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.34650.2698	
© 2026 Published by Semnan University Press. This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)	

۱- مقدمه

برای بالا بردن کیفیت انرژی، اینورتر چند سطحی یک راه حل خیلی خوب برای کاربردهای توان کم/متوسط برای تبدیل توان جریان مستقیم به متناوب است. اینورترهای چند سطحی علاوه بر بهبود کیفیت توان، مزایای زیادی نیز همچون کاهش هارمونیک ولتاژ، کاهش dv/dt ، تنش ولتاژ پایین ادوات نیمه هادی قدرت دارد. علاوه بر این با استفاده از اینورترهای چندسطحی می توان ولتاژ بالاتری با سوئیچهای ریتینگ پایین تولید کرد. این مزایا باعث شده است که اینورترهای چندسطحی کاربرد زیادی در صنعت مانند درایوهای سرعت متغیر موتور الکتریکی، سیستم های برق اضطراری، جبران ساز توان راکتیو، وسایل نقلیه

الکتریکی و غیره داشته باشد [۱-۳]. ساختارهای اینورتر چندسطحی معمولاً به دو دسته کلاسیک و مدرن تقسیم می شود که اینورترهای چندسطحی کلاسیک نیز به سه دسته اینورترهای چندسطحی نقطه خنثی مهار شده، اینورترهای چندسطحی خازن شناور، اینورترهای چندسطحی آبخاری پل H تقسیم می شود. این ساختارها به دلیل استفاده از ادوات زیاد در ساختار خود، هزینه و پیچیدگی های مختص خود را دارند به طور مثال در اینورترهای چندسطحی نقطه خنثی مهار شده تعادل لینک DC مشکل ساز است. در اینورترهای چندسطحی خازن شناور تعداد زیاد خازن شناور و تعادل ولتاژ این خازن ها مشکل ساز است و در اینورترهای

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: A.seifi@tabrizu.ac.ir

۱. دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

استناد به این مقاله:

علی سیفی، سیدحسین حسینی، مهرداد طرفدارحق و مجید حسین پور، "اینورتر چندسطحی خازن سوئیچ شده مازولار برای کاربردهای فتوولتائیک با تعداد ادوات کمتر"، مدل سازی در مهندسی، ۲۴ (۱۴۰۵): ۸۵-۹۸، doi: 10.22075/jme.2025.34650.2698

تحمل نمایند، این ساختارها را در کاربرهای ولتاژ بالا را محدود می‌کند. برای حذف پل H چندین ساختار مختلف [۸-۱۲] ارائه شده است. این ساختارها قابلیت تولید سطوح منفی و صفر را بدون نیاز به پل H دارند. در مرجع [۸] ساختار نه‌سطحی ارائه شده است که از پل H استفاده نمی‌کند. برای تولید نه‌سطح از چهار خازن استفاده شده است دو خازن در ولتاژ منبع ورودی و دو خازن در ولتاژ دو برابر منبع ورودی شارژ و دشارژ می‌شوند که تعداد زیاد خازن باعث افزایش هزینه کلی ساختار می‌شود. ساختار دیگری در [۹] با قابلیت افزایش ولتاژ ارائه شده است. این ساختار با ۱۴ سوئیچ و ۲ خازن هفت‌سطح ولتاژ در خروجی تولید می‌کند. یک ساختار هفت‌سطحی جدید در [۱۰] ارائه شده است که در آن خازن‌ها مبتنی بر پل H است و توسط پل H شارژ و دشارژ می‌شوند. این ساختار برای تولید هفت‌سطح ولتاژ از سه خازن استفاده می‌کند که ضریب افزایش این ساختار سه است. علاوه بر این فقط در یک نیم‌سیکل خازن‌ها شارژ می‌شود و در نیم‌سیکل بعدی شارژ نمی‌شود و فقط دشارژ می‌شود که این امر منجر نابرابری سطوح ولتاژ در یک سیکل کامل می‌شود. در [۱۱] و [۱۲] نیز ساختار هفت‌سطحی ارائه شده است ولی در این ساختارها نیز تعداد ادوات سوئیچینگ زیاد است.

در این مقاله یک ساختار جدید اینورتر چندسطحی مبتنی بر خازن سوئیچ شده ارائه شده است. ساختار پیشنهادی از یک ماژول که از تعداد ادوات سوئیچینگ کم استفاده می‌کند، تشکیل می‌شود. ماژول پیشنهادی با ۶ سوئیچ قادر است ۵ سطح ولتاژ در خروجی تولید نماید. در این ماژول شارژ خازن به طور طبیعی انجام می‌شود و به سنسور نیازی ندارد و به عبارت دیگر مدار خود-شارژ است. ساختار پیشنهادی قابلیت بوست ولتاژ را دارد. علاوه بر این استرس ولتاژ روی کلیدهای ساختار پیشنهادی پایین است و ساختار پیشنهاد برای برنامه‌های توان متوسط/بالا مناسب است. علاوه بر این ساختار پیشنهادی قابلیت متصل شدن به شبکه را نیز داراست.

این مقاله به شرح زیر است: ماژول پیشنهادی در بخش دو تجزیه و تحلیل شده است و در این بخش حالت‌های کلیدزنی ماژول پیشنهادی و روابط ریاضیاتی مربوط به ولتاژ مسدودکنندگی کل هم در این بخش ارائه شده است و همچنین اتصال آشناری ماژول پیشنهادی در این بخش شرح داده شده است. شبیه‌سازی تلفاتی-حرارتی شامل

چندسطحی آشناری پل H تعداد زیاد منابع ولتاژ ایزوله می‌تواند مشکل‌ساز باشد ولی با این وجود این ساختارها هنوز هم در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. به غیر از این چالش‌ها تمام سه دسته اینورتر چندسطحی کلاسیک با بالا رفتن سطوح خروجی، تعداد دستگاه‌های آنها بالا می‌رود [۴]. به همین دلیل اینورترهای چندسطحی‌های مدرن با هدف کاهش تعداد دستگاه‌های تشکیل دهنده ساختار ارائه شده است [۵]. ساختارهای مدرن نیز خود به دو دسته اینورترهای چندسطحی مبتنی بر منابع ولتاژ ایزوله و اینورترهای چندسطحی مبتنی بر خازن سوئیچ‌شده تقسیم می‌شود. در اینورترهای چندسطحی مبتنی بر منابع ولتاژ ایزوله به خصوص در سطوح ولتاژ بالا تعداد منابع ایزوله زیاد است و تولید این منابع کار دشواری است. اینورترهای چندسطحی مبتنی بر خازن سوئیچ‌شده مشکل تعداد منابع ایزوله زیاد را تا حدودی حل کرده است.

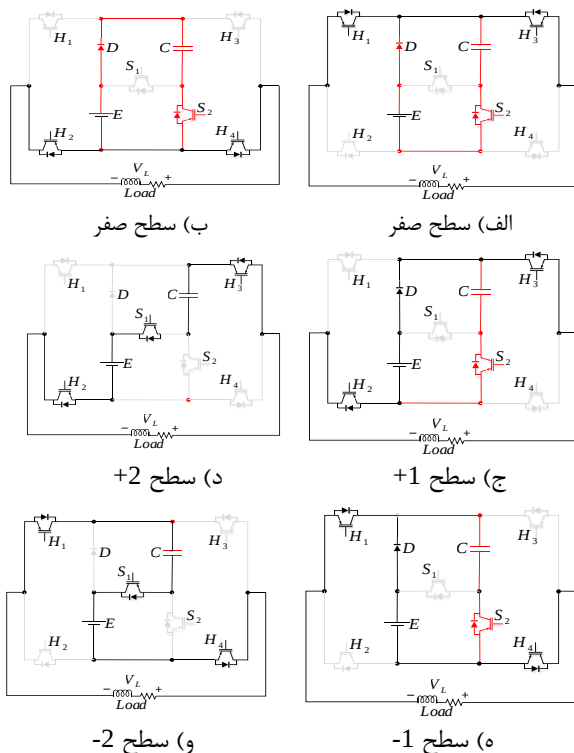
در کاربردهای انرژی تجدیدپذیر به خصوص پنل‌های فتوولتائیک علاوه بر کیفیت بالای توان، افزایش ولتاژ ورودی نیز امری ضروری است. از آنجا که توان تولیدی این منابع در ولتاژ پایین است پس ساختارهای تقویت کننده ولتاژ مبتنی بر خازن سوئیچ شده در کاربردهایی که به ولتاژ بالاتر نیاز است، بسیار مناسب است. در این ساختارها مقدار ولتاژ خروجی نسبت به منابع ولتاژ ورودی افزایش می‌یابد به عبارت دیگر $V_o/V_i > 1$ است که در اینورترهای چندسطحی مبتنی بر منابع ولتاژ ایزوله $V_o/V_i \leq 1$ است. در این ساختارها افزایش ولتاژ با شارژ خازن‌ها به صورت موازی در ولتاژ دلخواه و تخلیه ولتاژ شارژ شده به صورت سری ایجاد می‌شود. اتصال سری ماژول‌های خازن سوئیچ شده منجر به بالا رفتن سطوح ولتاژ خروجی می‌شود.

ساختارهای ارائه شده در [۶-۱۲] قابلیت افزایش ولتاژ را دارند. ساختار ارائه شده در مرجع [۶] مبتنی بر خازن سوئیچ شده است که قابلیت افزایش ولتاژ را دارد و همچنین این ساختار با هدف کاهش تعداد ادوات سوئیچینگ ارائه شده است. با این وجود در این ساختار از پل H برای تولید سطوح منفی و صفر استفاده می‌شود که سوئیچ‌های پل H باید حداکثر ولتاژ را تحمل نمایند. مرجع [۷] ساختاری خازن سوئیچ شده مبتنی بر چارپ ارائه می‌دهد چارپ قابلیت تولید ولتاژ مثبت را دارد. این ساختار با افزودن پل H به عنوان اینورتر عمل کند. پل H استفاده شده به دلیل استفاده از سوئیچ‌های توان بالا که باید حداکثر ولتاژ را

جدول ۱- حالات کلیدزنی و ولتاژ خروجی مازول پیشنهادی

H_1	H_2	H_3	H_4	S_1	S_2	V_C	V_o
۰	۱	۱	۰	۱	۰	▼	$+2V_{dc}$
۰	۱	۱	۰	۰	۱	▲	$+V_{dc}$
۱	۰	۱	۰	۰	۱	▲	0
۰	۱	۰	۱	۰	۱	▲	0
۱	۰	۰	۱	۰	۱	▲	$-V_{dc}$
۱	۰	۰	۱	۱	۰	▼	$-2V_{dc}$

شکل (۲) حالت‌های تولید سطوح مختلف مازول پیشنهادی را نشان می‌دهد. مسیر تولید سطوح ولتاژ با رنگ سیاه و مسیر شارژ خازن با مسیر قرمز نشان در این شکل نشان داده شده است. همانطوری که شکل (۲-الف) و (ب) نشان می‌دهد در این حالت سطح صفر تولید می‌شود (مسیر سیاه). علاوه بر این در حالت صفر خازن C توسط منبع ولتاژ E شارژ می‌شود (مسیر قرمز) و ولتاژ خازن در مقدار تثبیت می‌شود. شکل (۲-ج) حالت تولید سطح ولتاژ یک را نشان می‌دهد که در این حالت ولتاژ خروجی برابر است. در این حالت هم خازن در حال شارژ می‌باشد. در شکل (۲-د) هم حالت تولید سطح ولتاژ دو نشان داده شده است که در این حالت با روشن شدن کلید S_1 خازن دشارژ می‌شود.



شکل ۲- حالت‌های تولید سطوح مختلف مازول پیشنهادی (الف) سطح صفر، (ب) سطح صفر، (ج) سطح $+V_{dc}$ ، (د) سطح $+2V_{dc}$ ، (ه) سطح $-V_{dc}$ و (و) سطح $-2V_{dc}$

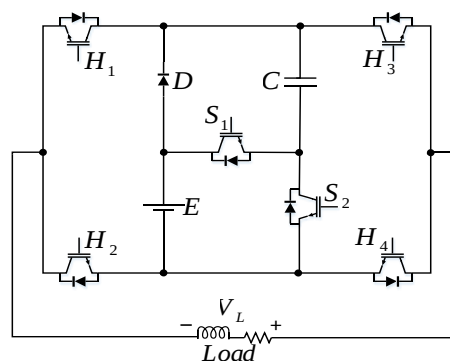
تلفات توان سوئیچ‌ها و بازده در بخش سوم ارائه شده است. بخش چهارم مربوط به مقایسه مازول پیشنهادی با سایر ساختارهای ارائه شده است. در بخش پنجم نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. نهایتاً نتیجه گیری در بخش هفت ارائه شده است.

۲- تجزیه و تحلیل ساختار پیشنهادی

چنانچه در این بخش مازول پیشنهادی تجزیه و تحلیل شده است. حالت‌های عملکردی، جدول کلیدزنی، انتخاب مقادیر منابع و ولتاژ مسدودکنندگی سوئیچ‌های مازول پیشنهادی در این بخش ارائه شده است.

۲-۲- ساب مازول پیشنهادی

ساختار مازول افزاینده پیشنهادی در شکل (۱) به تصویر کشیده شده است. مازول پیشنهادی متشکل از ۶ سوئیچ یک طرفه و یک دیود و در کل ۷ دستگاه الکترونیک قدرت است. همچنین ۱ منبع ولتاژ ایزوله و یک خازن سوئیچ شده مازول پیشنهادی را تشکیل می‌دهند.



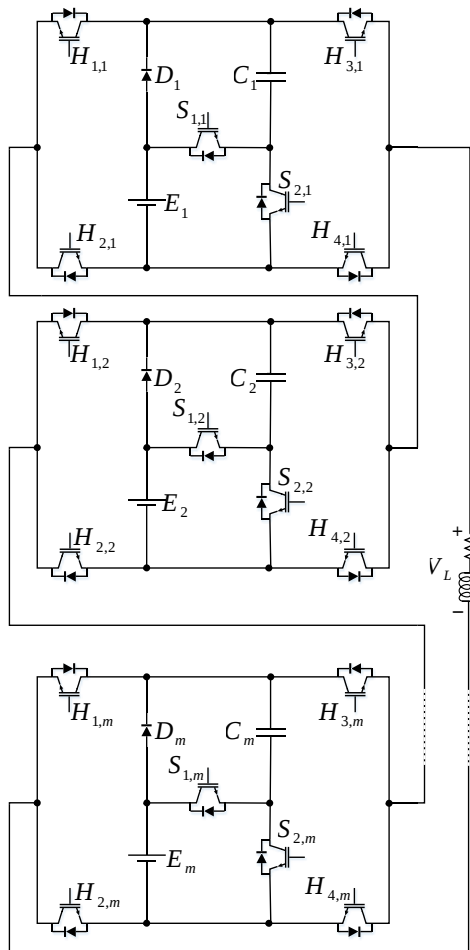
شکل ۱- ساختار ساب مازول پیشنهادی

ولتاژ منبع ورودی به صورت $E = V_{dc}$ فرض شده است. در این حالت ولتاژ مازول پیشنهادی و حالات کلیدزنی در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول عدد ۱ نشان دهنده روشن بودن سوئیچ، عدد صفر نشان دهنده خاموش بودن سوئیچ، علامت ▲ نشان دهنده شارژ خازن و علامت ▼ نشان دهنده دشارژ خازن است. در صورتی که کلید S_2 روشن شود خازن C با منبع ولتاژ به حالت موازی متصل شده و شارژ می‌شود و در حالت شارژ ولتاژ آن برابر E می‌شود و در صورتی که کلید S_1 روشن شود خازن C با منبع ولتاژ سری شده و دشارژ می‌گردد. مازول پیشنهادی قادر است سطوح $\pm V_{dc}$ ، $\pm 2V_{dc}$ و صفر را تولید کند. به عبارت دیگر مازول پیشنهادی قادر است ۵ سطح در خروجی تولید کند.

$$N_V = m \quad (۱۱)$$

$$N_{Di} = m \quad (۱۲)$$

که در این روابط N_V , N_C , N_{Dr} , N_{Sw} , N_L , m به ترتیب تعداد ساب ماژول، تعداد سطح، تعداد سوئیچ، تعداد درایور، تعداد خازن، تعداد منابع و تعداد دیود را نشان می‌دهد.



شکل ۳- ساختار آبشاری پیشنهادی مبتنی بر ماژول پیشنهادی (ب) اندازه منابع ولتاژ ماژول‌های مختلف ساختار آبشاری به صورت افزایشی لحاظ شود. به عبارت دیگر اگر اندازه منبع ولتاژ ساب ماژول اول به صورت $E_1 = V_{dc}$ باشد، اندازه ولتاژ منبع ساب ماژول دوم به صورت $E_2 = 5V_{dc}$ می‌شود. در این حالت تعداد سطوح خروجی به شدت بالا می‌رود به طوری که در این حالت با دو ساب ماژول می‌توان به سطح خروجی ۲۵ دست یافت. در این حالت ولتاژ بار خروجی (V_L) برابر با مجموع ولتاژ خروجی تک تک ساب ماژول‌ها ($V_{o,m}$) حاصل می‌شود که به صورت زیر است:

$$V_L = V_{o,1} + V_{o,2} + \dots + V_{o,3} \quad (۱۳)$$

۲-۲- حداکثر ولتاژ مسدودکنندگی سوئیچ‌های

ماژول

ولتاژ مسدودکنندگی حداکثر سوئیچ ماژول پیشنهادی، ولتاژ معکوسی است که سوئیچ‌های ساختار باید بتوانند آن را تحمل نمایند. اگر ولتاژ مسدودکنندگی سوئیچ‌های ماژول پیشنهادی را جمع کنیم ولتاژ مسدودکنندگی کل (TBV) حاصل می‌شود:

$$TBV = V_{H1} + V_{H2} + \dots + V_S \quad (۱)$$

اندازه ولتاژ مسدودکنندگی هر یک از سوئیچ‌های ماژول پیشنهادی به صورت زیر است:

$$V_{H1} = V_{H2} = V_{H3} = V_{H4} = E + V_C \quad (۲)$$

$$V_{S1} = V_{S2} = E \quad (۳)$$

اندازه ولتاژ مسدودکنندگی حداکثر (MBV) سوئیچ‌ها در انتخاب نوع سوئیچ مهم است و بر اساس این ولتاژ مسدودکنندگی سوئیچ‌های ساختار تعیین می‌شود.

۳-۲- ساختار آبشاری برای تولید سطوح ولتاژ بالا

ماژول پیشنهادی نمی‌تواند تولید سطوح بالاتر را تولید کند. به همین جهت برای تولید سطوح بالاتر ماژول پیشنهادی به صورت سری به هم متصل می‌شود و ساختار آبشاری را با هدف تولید سطوح بالاتر ارائه می‌شود. ماژول پیشنهادی برای کاربردهای توان پایین مناسب است و در توان‌های بالا به دلیل بالا رفتن ریتینگ سوئیچ‌ها و گران شدن شدید قیمت سوئیچ‌ها مناسب نیست. ولی ساختار آبشاری به دلیل پایین بودن ریتینگ سوئیچ‌ها، کاربرد زیادی در توان‌های بالا دارد. با اتصال m تعداد ماژول پیشنهادی به صورت سری ساختار تعمیم یافته به عنوان یک ساختار جدید قابل ارائه است که در شکل (۳) نشان داده شده است.

انتخاب منابع در ساختار آبشاری به دو روش انجام می‌گیرد: الف) اندازه منابع ولتاژ به صورت متقارن باشد:

$$E_1 = E_2 = \dots = E_m = V_{dc} \quad (۷)$$

در این صورت تعداد سطوح خروجی، تعداد سوئیچ، تعداد درایور، تعداد خازن، تعداد منابع و تعداد دیود بر اساس روابط (۸) الی (۱۲) قابل بیان است.

$$N_L = 5m \quad (۸)$$

$$N_{Sw} = N_{Dr} = 6m \quad (۹)$$

$$N_C = m \quad (۱۰)$$

به دلیل غیر ایده‌آل بودن نیمه‌هادی‌های قدرت، جریان و ولتاژ در لحظات کلیدزنی با یکدیگر همپوشانی دارند و تلفات سوئیچینگ ناشی از این موضوع است. تلفات کلیدزنی اینورترهای مبتنی بر خازن سوئیچ شده با استفاده از (۲۴) قابل محاسبه است.

$$P_S = \left(\sum_{Switches} \frac{V_{ON} \times I_{ON} \times T_{ON}}{6} + \frac{V_{OFF} \times I_{OFF} \times T_{OFF}}{6} \right) \times f_s \quad (24)$$

که در این رابطه f_s نشانگر فرکانس خروجی و I_{ON} ، V_{ON} و T_{ON} نشانگر ولتاژ متوسط، جریان متوسط و بازه زمانی لازم برای روشن شدن یک نیمه‌هادی قدرت است. همینطور I_{OFF} ، V_{OFF} و T_{OFF} نشانگر ولتاژ متوسط، جریان متوسط و بازه زمانی لازم برای خاموش شدن یک نیمه‌هادی قدرت است.

ج- تلفات ریپل (P_R)

تلفات ریپل ناشی از مقاومت داخلی خازن یا همان مقاومت سری معادل (ESR) و نیز تلفات افت ولتاژ (ΔV_C) موجود در شکل موج ولتاژ خروجی ساختارهای خازن سوئیچ شونده ایجاد می‌شود. تلفات ریپل به تلفات خازن نیز معروف است و با رابطه (۲۵) قابل محاسبه است.

$$P_R = \frac{f_s}{2} \times C \times \Delta V_C^2 \quad (25)$$

که در این رابطه f_s نشانگر فرکانس کلیدزنی است. و نهایتاً بازده کل یک ساختار خازن سوئیچ شده برابر است با:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}} \quad (26)$$

$$= \frac{P_{out}}{P_{out} + P_C + P_S + P_R} \times 100$$

به منظور شبیه‌سازی تلفات توان ساختار پیشنهادی، مدل‌سازی حرارتی در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. در این شبیه‌سازی از اطلاعات سوئیچ IGBT IKFW60N60DH3E استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از بارهای مختلف استفاده شده است. پیک ولتاژ خروجی در این شبیه‌سازی 500V فرض شده است تا به سوئیچ مدل شده با ولتاژ نامی برابر با 600V، استرس ولتاژ معادل با 80% ولتاژ نامی سوئیچ اعمال شود. این شبیه‌سازی با کنترل مدولاسیون پهنای پالس از نوع شیفت

اندازه منابع در این حالت به صورت زیر قابل بیان است:

$$E_1 = V_{dc} \quad (14)$$

$$E_m = 2V_{o \max_1} + 2V_{o \max_2} + \dots + 2V_{o \max_{n-1}} + V_{dc} \quad (15)$$

که $V_{o \max}$ حداکثر ولتاژ خروجی ساختار پایه است. در این حالت تعداد سطوح خروجی، تعداد سوئیچ، تعداد درایور، تعداد خازن، تعداد منابع و تعداد دیود با روابط (۱۶-۲۰) برابر است.

$$N_L = 2(V_{o \max_1} + V_{o \max_2} + \dots + V_{o \max_n}) + 1 \quad (16)$$

$$N_{Sw} = N_{Dr} = 6m \quad (17)$$

$$N_C = m \quad (18)$$

$$N_V = m \quad (19)$$

$$N_{Di} = m \quad (20)$$

۳- تحلیل تلفات توان

مناسب در این بخش تلفات توان ساختار پایه پیشنهادی تحلیل شده است. تلفات توان اینورترهای مبتنی بر خازن سوئیچ شده به سه قسمت تقسیم می‌شود که شامل تلفات هدایتی (P_C)، تلفات کلیدزنی (P_S) و تلفات ریپل (P_R) است و مطابق با رابطه (۲۱) قابل بیان است.

$$P_{losses} = P_C + P_S + P_R \quad (21)$$

تلفات هدایتی و کلیدزنی ناشی از نیمه‌هادی قدرت و تلفات ریپل ناشی از خازن‌ها می‌باشد که در ادامه هر کدام شرح داده شده است.

الف - تلفات هدایتی (P_C)

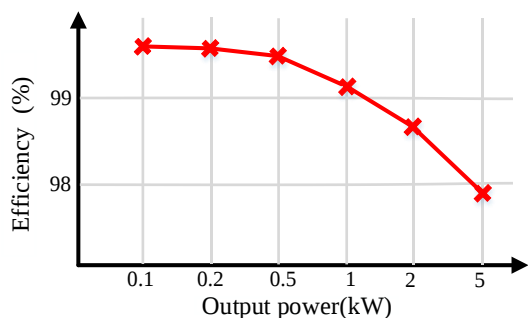
تلفات هدایتی سوئیچ‌ها و دیودهای نیمه‌هادی قدرت به دلیل مقاومت داخلی این نیمه‌هادی‌ها است که با رابطه (۲۲-۲۳) محاسبه می‌شود.

$$P_{C,S} = \sum_{Switches} R_{ON} \times I_{Switches}^2 \quad (22)$$

$$P_{C,D} = \sum_{Diodes} R_{ON} \times I_{Diodes}^2 \quad (23)$$

که در این رابطه R_{ON} مقاومت داخلی نیمه‌هادی‌ها و I جریان عبوری از نیمه‌هادی‌ها در حالت روشن است.

ب- تلفات کلیدزنی (P_S)



شکل ۵- راندمان ساب‌ماژول پیشنهادی در توان‌های مختلف

۴- مقایسه ساختار پایه پیشنهادی با سایر

ساختارها

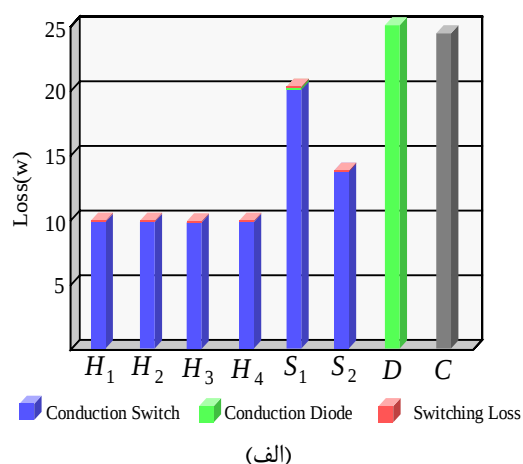
نتایج برای نشان دادن برتری‌های ساختار پایه پیشنهادی، یک مقایسه دقیق با ساختارهای مشابه در این بخش انجام شده است. تعداد منابع، تعداد سوئیچ‌ها، تعداد درایورها، تعداد خازن‌ها، تعداد دیودها و حداکثر ولتاژ قابل تحمل سوئیچ‌ها با سایر ساختارها مقایسه شده است. این مقایسه برای ساختارهای پایه مشابه انجام شده است. از آنجا که تعداد سطوح ولتاژ خروجی سایر ساختارها ارائه شده متفاوت است، به منظور انجام مقایسه عادلانه از رابطه زیر استفاده شده است.

$$F_{Device} = \frac{N_v + N_{Sw} + N_{Dr}}{N_{Level} + N_C + N_D + TBV} \quad (27)$$

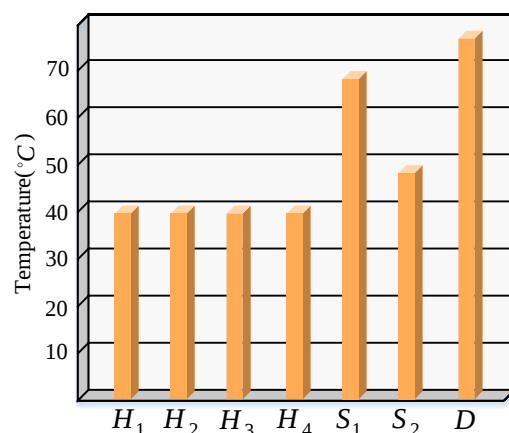
که در این رابطه پارامتر F_{Device} نشانگر یک معیار نرمالیزه شده بر حسب تعداد سطوح است. هر چه F_{Device} مقدار کوچکتری حاصل شود بیانگر این امر است که مجموع تعداد تجهیزات ساختار مدنظر و ولتاژ مسدودکنندگی کل به ازای هر سطح ولتاژ تولیدی ساختار مقدار کوچکتری حاصل شده و این امر مطلوب‌تر است. جدول ۲ مقایسه ساختار پیشنهادی با سایر ساختارها را از نظر تعداد اجزا ارائه می‌دهد. در این جدول قابلیت بوست ولتاژ خروجی و نیز قابلیت تولید ولتاژ منفی بدون استفاده از ماژول پل H نیز مشخص شده است. توپولوژی‌های ارایه شده در [۱۱] و [۱۲] با وجود آنکه به تعداد کمتری از اجزا نیاز دارند، با این وجود قابلیت ذاتی در تولید ولتاژ منفی را دارا نیستند. به عنوان دیگر این دو توپولوژی از ماژول پل H برای تولید ولتاژ منفی استفاده می‌کنند که طبیعتاً چهار سوئیچ با حداکثر ولتاژ مسدودکنندگی برابر با پیک ولتاژ خروجی نیاز دارند.

فاز با فرکانس کلیدزنی 2000Hz انجام شده است.

راندمان ساختار پایه در شبیه‌سازی تلفاتی برای توان خروجی 5kW برابر با 97.8% حاصل شده است. تلفات کل در این شبیه‌سازی 120W است. تلفات هر یک از سوئیچ‌ها به تفکیک تلفات هدایتی و تلفات کلیدزنی و تلفات خازن در شکل (۴-الف) نشان داده شده است. علاوه بر دمای کلیدها در شکل (۴-ب) ارایه شده است. به دلیل فرکانس کلیدزنی نه چندان بالا در اینورترهای چندسطحی، تلفات کلیدزنی درصد کمی از تلفات یک سوئیچ را شامل می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۴-الف)- تلفات توان سوئیچ‌های مختلف در ساختار پایه پیشنهادی، ب- دمای سوئیچ‌های ساختار پایه پیشنهادی

همانطور که از شکل (۴) مشخص است سوئیچ S_1, S_2 و دیود D به دلیل شارژ و دشارژ خازن تلفات توان بیشتری نسبت به سایر ادوات دارند و به طبع دمای بیشتری نیز دارند. شکل (۵) نیز راندمان ساب‌ماژول پیشنهادی را در توان‌های مختلف نشان می‌دهد.

ضروری است که ساختارهای ارایه شده در [۱۷] و [۱۹] برای تولید ۱۳ سطح ولتاژ، به ترتیب دارای TBV برابر با ۳۸ و ۳۲ می‌باشند. در حالیکه TBV ساختار پیشنهادی برای تولید ۲۵ سطح برابر با ۶۰ حاصل شده است.

همانطور که جدول ۲ نشان می‌دهد نسبت تعداد اجزای ساختار پایه پیشنهادی نسبت به سایر مراجع مقدار پایین‌تری است. علاوه بر این TBV ساختار پایه پیشنهادی برای تولید ۲۵ سطح مقدار قابل قبولی است. ذکر این نکته

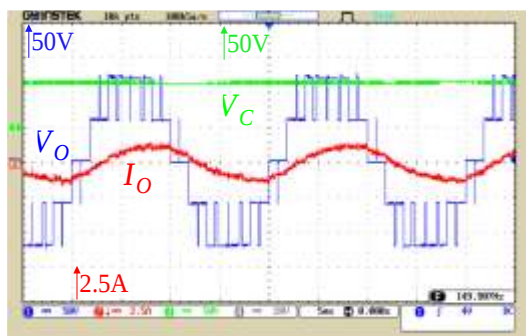
جدول ۲- مقایسه ساختار پایه پیشنهادی با سایر مراجع از نظر تعداد تجهیزات و ولتاژ مسدودکنندگی به تعداد سطوح

Negative Level	Boost	F_{Device}	TBV	N_D	N_C	N_{Dr}	N_{Sw}	N_v	N_{Level}	
پل H	بله	۶	۱۸	۰	۳	۱۰	۱۰	۱	۷	[۷]
ذاتی	بله	۴/۵۵	۱۶	۴	۴	۸	۸	۱	۹	[۸]
ذاتی	بله	۶/۷۷	۱۷	۵	۴	۱۷	۱۷	۱	۹	[۹]
ذاتی	بله	۷/۱۱	۱۹	۳	۳	۱۹	۱۹	۱	۹	[۱۰]
ذاتی	بله	۷	۱۶	۰	۲	۱۴	۱۶	۱	۷	[۱۱]
ذاتی	بله	۷	۱۶	۰	۲	۱۴	۱۶	۱	۷	[۱۲]
ذاتی	بله	۵/۳۳	۲۳	۴	۲	۹	۹	۱	۹	[۱۳]
ذاتی	بله	۶	۱۶	۰	۲	۱۱	۱۲	۱	۷	[۱۴]
ذاتی	بله	۵/۲۲	۲۰	۰	۳	۱۱	۱۲	۱	۹	[۱۵]
ذاتی	خیر	۳/۷۶	۲۰	۰	۴	۱۰	۱۲	۳	۱۳	[۱۶]
پل H	بله	۴/۸۴	۲۰	۱	۱	۱۰	۱۱	۲	۱۳	[۱۷]
ذاتی	بله	۶/۴۲	۱۸	۴	۲	۱۰	۱۰	۱	۷	[۱۸]
ذاتی	بله	۵	۳۲	۰	۳	۱۴	۱۵	۱	۱۳	[۱۹]
ذاتی	خیر	۴/۴۴	۲۰	۰	۳	۷	۸	۲	۹	[۲۰]
ذاتی	بله	۵/۶۶	۲۴	۰	۱	۱۲	۱۲	۲	۹	[۲۱]
پل H	خیر	۵/۵۷	۲۰	۲	۱	۷	۷	۲	۷	[۲۲]
پل H	بله	۴/۸۸	۲۳	۰	۱	۹	۹	۲	۹	[۲۳]
پل H	بله	۵	۱۰	۱	۱	۶	۶	۱	۵	[۲۴]
ذاتی	خیر	۵.۴	۱۱	۱	۳	۵	۶	۱	۵	[۲۵]
ذاتی	بله	۵.۶	۱۲	۱	۱	۶	۷	۱	۵	[۲۶]
پل H	خیر	۵.۸	۱۲	۰	۲	۶	۸	۱	۵	[۲۷]
پل H	بله	۶.۲	۱۱	۳	۲	۷	۷	۱	۵	[۲۸]
ذاتی	بله	۵.۷۷	۲۴	۱	۳	۱۱	۱۲	۱	۹	[۲۹]
ذاتی	بله	۵	۱۰	۱	۱	۶	۶	۱	۵	پیشنهادی
ذاتی	بله	۳/۶	۶۰	۲	۲	۱۲	۱۲	۲	۲۵ (آبشاری با دو مازول)	

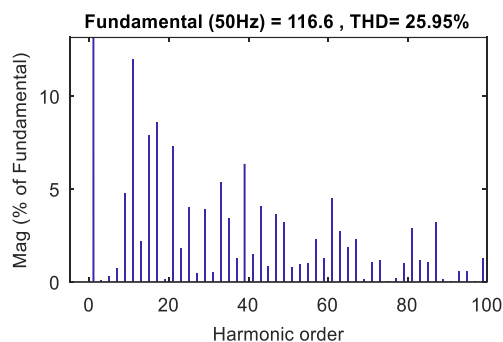
۵- نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی

در این بخش نتایج آزمایشگاهی توپولوژی پیشنهادی ارائه شده است. از نرم‌افزار MATLAB برای شبیه‌سازی استفاده شده است و برای بررسی عملکرد توپولوژی

پیشنهادی، نمونه آزمایشگاهی توان پایینی ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای کلیدزنی توپولوژی پیشنهادی از مدولاسیون پهنای پالس شیفت فاز استفاده شده است. در این بخش نتایج آزمایشگاهی توپولوژی پایه



(الف)

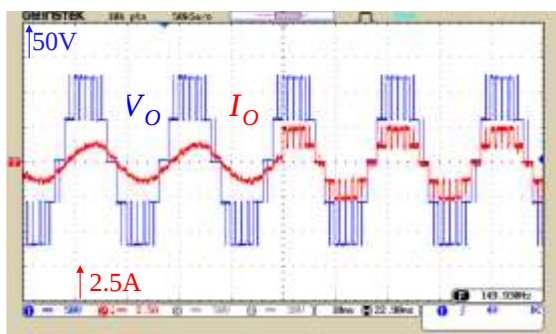


(ب)

شکل (۷-الف)- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی ساب‌ماژول پیشنهادی به همراه ولتاژ خازن و (ب) THD ولتاژ خروجی در بار اهمی-سلفی برای ساب‌ماژول پیشنهادی

نتیجه آزمایشگاهی ولتاژ و جریان خروجی برای تغییر دینامیکی بار از اهمی-سلفی با مقدار $Z = 48\Omega$ به بار اهمی با مقدار $Z = 80\Omega + 150mH$ در شکل (۸) نشان داده شده است.

همچنین ولتاژ اعمالی به سوئیچ‌ها و دیود ساب‌ماژول پیشنهادی در شکل (۹) نشان داده شده است. بر اساس این شکل حداکثر ولتاژ قابل تحمل هر کدام از ادوات کلیدزنی ساختار پیشنهادی قابل ارزیابی است.



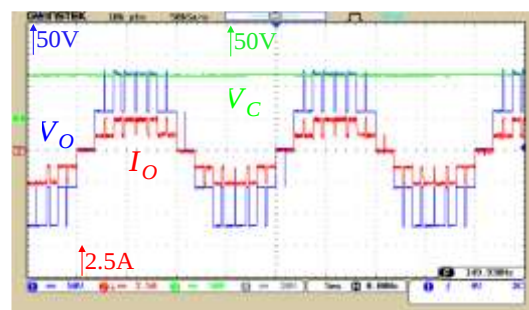
شکل ۸- نتیجه آزمایشگاهی ولتاژ خروجی و جریان خروجی برای تغییر بار برای ساب‌ماژول پیشنهادی

پیشنهادی ۵ سطحی و توپولوژی آبشاری ۲۵ سطحی که از اتصال آبشاری دو توپولوژی پایه تشکیل شده است، ارائه شده است. اطلاعات نمونه آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است.

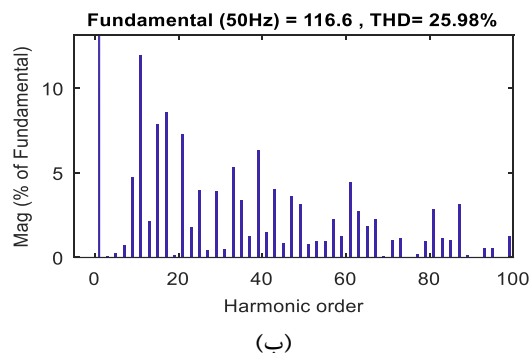
جدول ۳- پارامترهای توپولوژی پیشنهادی

آبشاری	ساب‌ماژول	
$E_1 = 12V, E_2 = 60V$	$E = 60V$	Input Voltage
$C_1 = C_2 = 4700\mu F$	$C = 4700\mu F$	Capacitor
	300Hz	Switching Frequency
	IRFP 460	MOSFET
	MUR 1560	Diode
	Arduino Mega 2560	Controller
	TLP250	Optocoupler

شکل (۶) نتایج آزمایشگاهی ولتاژ و جریان خروجی و ولتاژ خازن C را برای بار اهمی با مقدار $Z = 48\Omega$ را نشان می‌دهد. همچنین در این شکل اعوجاج هارمونیک کل (THD) ولتاژ خروجی نیز نشان داده شده است. همانطور که شکل (۶) نشان می‌دهد ولتاژ خروجی ۵ سطحی بوده و ولتاژ خازن نیز در مقدار ولتاژ ورودی تثبیت شده است. شکل (۷) نیز همان نتایج را برای بار اهمی سلفی با مقدار $Z = 80\Omega + 150mH$ را نشان می‌دهد.



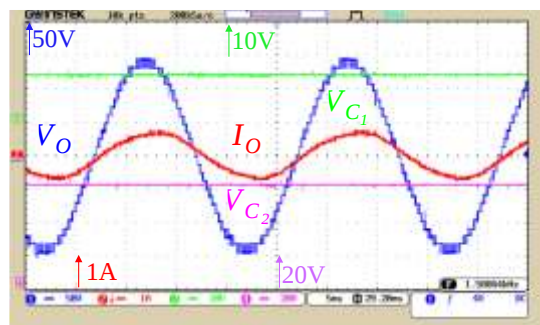
(الف)



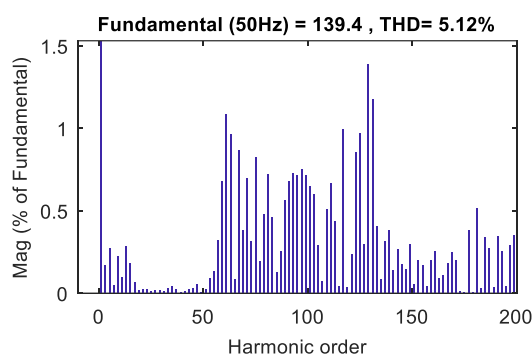
(ب)

شکل (۶-الف)- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی ساب‌ماژول پیشنهادی به همراه ولتاژ خازن و (ب) THD ولتاژ خروجی در بار اهمی برای ساب‌ماژول پیشنهادی

شکل (۱۱) نیز همان نتایج را برای بار اهمی-سلفی با مقدار $Z = 240\Omega + 150mH$ را نشان می‌دهد. شکل موج ولتاژ خروجی، جریان خروجی برای تغییر بار از اهمی با مقدار $Z = 140\Omega$ به بار اهمی-سلفی با مقدار $Z = 240\Omega + 150mH$ در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

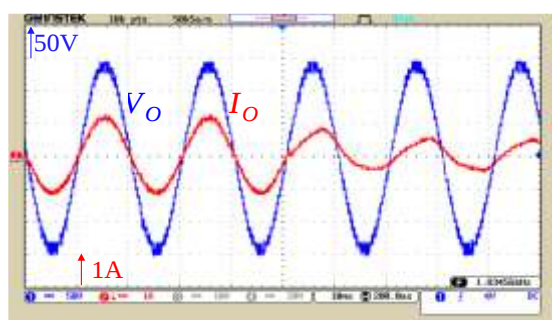


(الف)



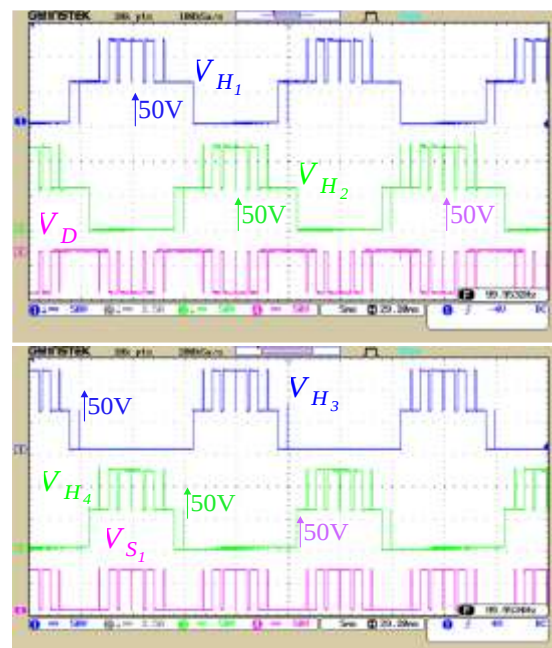
(ب)

شکل (۱۱-الف) - شکل موج ولتاژ و جریان خروجی و (ب) THD ولتاژ خروجی در بار اهمی-سلفی برای ساختار آبشاری پیشنهادی



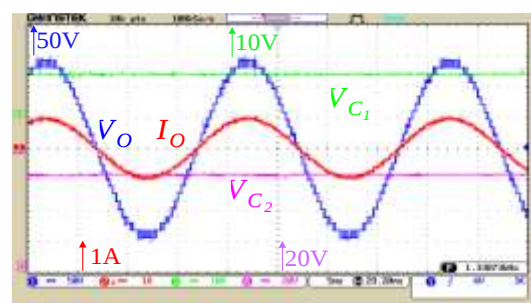
شکل ۱۲- شکل موج ولتاژ خروجی و جریان خروجی برای تغییر بار برای توپولوژی آبشاری

در حالت متصل به شبکه استفاده از مبدل DC-DC انجام MPPT و تنظیم ولتاژ لینک dc الزامی است. از فیلتر خروجی نیز برای فیلتر کردن هارمونیک‌های ولتاژ استفاده شده است. جدول ۴ پارامترهای حالت متصل به شبکه را ارائه می‌دهد. شکل (۱۳) بلود دیاگرام طرح متصل به شبکه

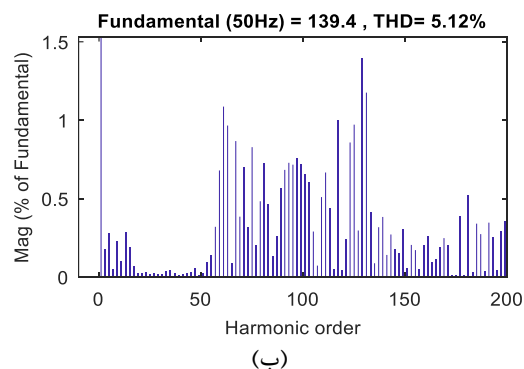


شکل ۹- تنش ولتاژ سوئیچ‌ها و دیود توپولوژی پایه پیشنهادی

شکل (۱۰) شکل موج ولتاژ و جریان خروجی و ولتاژ خازن‌های توپولوژی آبشاری را برای بار اهمی با مقدار $Z = 140\Omega$ را برای نشان می‌دهد. همچنین در این شکل THD ولتاژ خروجی نیز نشان داده شده است. مطابق این شکل، THD ولتاژ خروجی ۵/۱۲٪ است که نسبت به توپولوژی پایه تقریباً ۲۰٪ کاهش یافته است.



(الف)

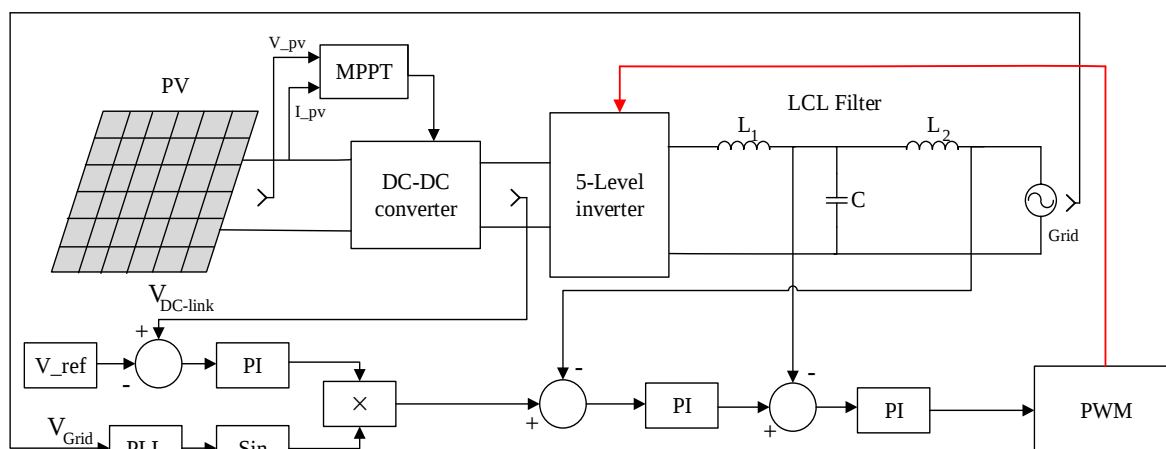


(ب)

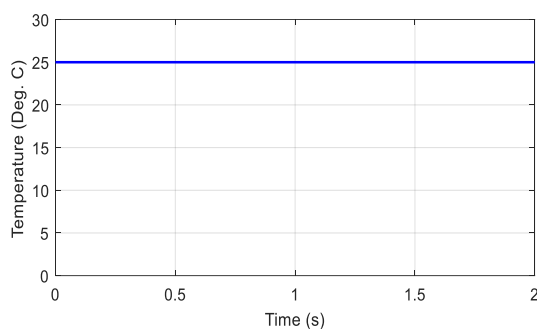
شکل (۱۰-الف) - شکل موج ولتاژ و جریان خروجی و (ب) THD ولتاژ خروجی در بار اهمی برای ساختار آبشاری پیشنهادی

سلول خورشیدی را نشان می‌دهد. شکل (۱۶-الف) ولتاژ خروجی مبدل و ولتاژ شبکه و جریان خروجی، (۱۶-ب) توان خروجی و (۱۶-ج) ولتاژ لینک dc را نشان می‌دهد.

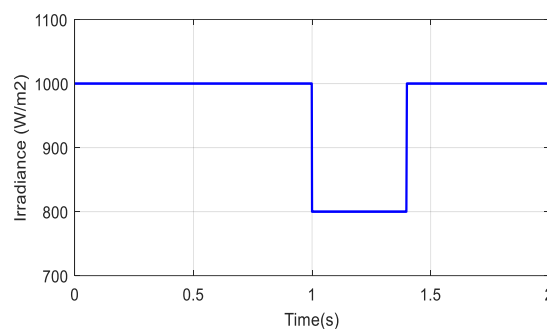
ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. و شکل (۱۴) تابش و دمای سلول خورشیدی را نشان می‌دهد. شکل (۱۵-الف) ولتاژ و جریان سلول خورشیدی و (۱۵-ب) توان خروجی



شکل ۱۳- طرح کنترلی مبدل پیشنهادی در حالت متصل به شبکه

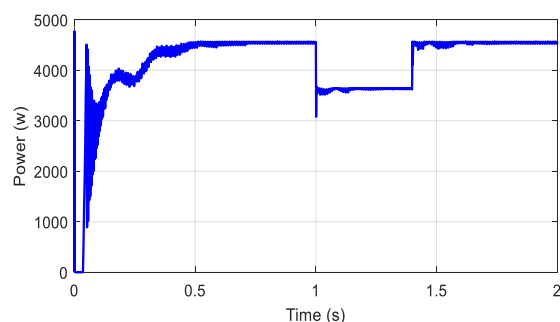


(ب)

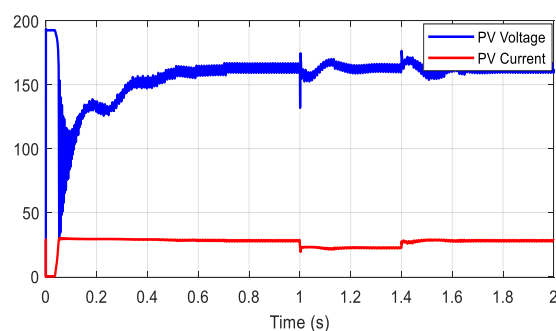


(الف)

شکل (۱۴-الف) - تابش و (ب) - دمای سلول خورشیدی

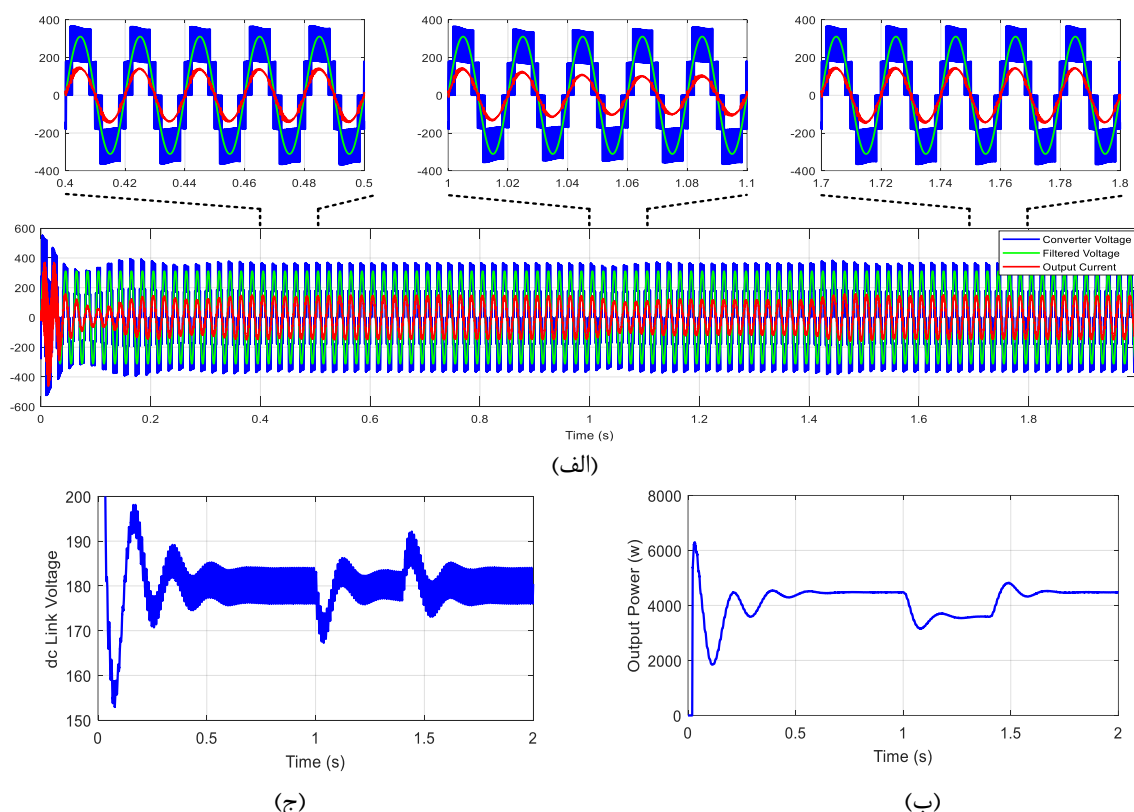


(ب)



(الف)

شکل (۱۵-الف) - ولتاژ و جریان خروجی و (ب) - توان خروجی سلول خورشیدی



شکل (۱۶- الف) - ولتاژ خروجی مبدل و ولتاژ خروجی فیلتر شده و جریان خروجی، (ب) - توان خروجی و (ج) - ولتاژ لینک dc

تقویت ولتاژ و MPPT به یک مبدل ولتاژ dc/dc نیاز است و این امر اجتناب ناپذیر است. از آنجا که ساختار پیشنهادی توانایی ذاتی در افزایش ولتاژ دارد، اندازه مبدل dc/dc کاهش می‌یابد. برای تأیید عملکرد ساختار پیشنهادی و کنترل شبیه‌سازی ارائه شده است.

تقدیر و تشکر

این کار بر اساس تحقیقات انجام شده توسط بنیاد ملی علوم ایران (INSF) تحت پروژه شماره ۴۰۱۵۸۹۹ انجام شده است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد میشوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

علی سیفی

مفهوم‌پردازی، گردآوری و مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی، تأمین بودجه، انجام پژوهش، روش‌شناسی، مدیریت پروژه،

همانطوری شکل (۱۵- الف) نشان می‌دهد در زمان ۱-۱/۴ ثانیه که تابش از ۱۰۰۰ به ۸۰۰ w/m کاهش یافته است، جریان خروج کاهش می‌یابد ولی ولتاژ خروجی ثابت است که این نشان دهنده این است که مبدل DC-DC توانسته عمل MPPT و تنظیم ولتاژ را به خوبی انجام دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار پایه جدید برای اینورتر پنج‌سطحی مبتنی بر خازن سوئیچ شونده ارائه شده است که توانایی تعادل ولتاژ خازن و تقویت ولتاژ ورودی را به طور ذاتی دارد. ساختار پیشنهادی دارای مزایایی همچون تعداد ادوات کلیدزنی پایین، ولتاژ مسدودکنندگی مناسب، تولید قطبیت منفی بدون نیاز به پل H می‌باشد. این مزایا منجر به کاهش تلفات توان شده و ساختار پیشنهادی را برای کاربردهای ولتاژ متوسط/توان بالا با راندمان بهتر قابل توجه کرده است. مقایسه جامع انجام شده با ساختارهای مشابه شایستگی ساختار پیشنهادی را تأیید می‌کند. ساختار پیشنهادی در کاربردهای منابع انرژی تجدید پذیر مانند سلول‌های خورشیدی و سلول سوختی مناسب است. در کاربردهای سلول‌های خورشیدی و سلول سوختی برای

مجید حسین پور

مدیریت پروژه، نرم افزار، نظارت، نگارش پیش نویس اولیه،
بازبینی و ویرایش

منابع مالی

منابع مالی وجود ندارد.

تأمین منابع، نرم افزار، اعتبارسنجی، نگارش پیش نویس اولیه

سید حسین حسینی

نظارت، بازبینی و ویرایش

مهرداد طرفدار حق

نظارت، بازبینی و ویرایش

مراجع

- [1] Hosseinpour, Majid, and Ali Seifi. "A Novel Multilevel Inverter Topology Aiming Reduction the Switch Count and Converter Cost." *Journal of Modeling in Engineering* 18, no. 60 (2020): 71-85.
- [2] Shayeghi, Hossein, Ali Seifi, and Majid Hosseinpour. "A Novel Multi-Level Cascade Inverter with Reduced Switching Devices to Connect Renewable Energy Sources to the Grid." *Journal of Modeling in Engineering* 21, no. 74 (2023): 95-111.
- [3] Feshki Farahani, Hassan. "A New Topology for Single Phase Voltage Source Multilevel Inverter Based on Reduction of Semiconductor Switches." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 52 (2018): 97-108.
- [4] Seifi, Ali, Majid Hosseinpour, and Seyed Hadi Latifi Majareh. "Design and simulation of a new symmetric/asymmetric structure of multilevel inverter based on switch-diode-source cells." In 2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), pp. 1-6. IEEE, 2020.
- [5] Shayeghi, Hossein, Ali Seifi, Majid Hosseinpour, and Nicu Bizon. "Developing a generalized multi-level inverter with reduced number of power electronics components." *Sustainability* 14, no. 9 (2022): 5545.
- [6] Hinago, Youhei, and Hirotaka Koizumi. "A switched-capacitor inverter using series/parallel conversion with inductive load." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59, no. 2 (2011): 878-887.
- [7] Roy, Tapas, Pradip Kumar Sadhu, and Abhijit Dasgupta. "Cross-switched multilevel inverter using novel switched capacitor converters." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66, no. 11 (2019): 8521-8532.
- [8] Saeedian, Meysam, Mohammad Ebrahim Adabi, Seyyed Mehdi Hosseini, Jafar Adabi, and Edris Pouresmaeil. "A novel step-up single source multilevel inverter: Topology, operating principle, and modulation." *IEEE Transactions on Power Electronics* 34, no. 4 (2018): 3269-3282.
- [9] Khounjahan. H., M. Abapour, and K. Zare. "Switched-Capacitor based Single source Cascaded H-bridge multilevel inverter featuring boosting ability." *IEEE Transactions on Power Electronics* 34, no. 2 (2018): 1113-1124.
- [10] Jahan, Hossein Khoun, Mehdi Abapour, and Kazem Zare. "Switched-capacitor-based single-source cascaded H-bridge multilevel inverter featuring boosting ability." *IEEE Transactions on Power Electronics* 34, no. 2 (2018): 1113-1124.
- [11] Sun, Xiaofeng, Baocheng Wang, Yue Zhou, Wei Wang, Huiyuan Du, and Zhigang Lu. "A single DC source cascaded seven-level inverter integrating switched-capacitor techniques." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63, no. 11 (2016): 7184-7194.
- [12] Lee, Sze Sing. "A single-phase single-source 7-level inverter with triple voltage boosting gain." *IEEE Access* 6 (2018): 30005-30011.
- [13] Siddique, Marif Daula, Saad Mekhilef, Sanjeevikumar Padmanaban, Mudasir Ahmed Memon, and Chandan Kumar. "Single-phase step-up switched-capacitor-based multilevel inverter topology with SHEPWM." *IEEE Transactions on Industry Applications* 57, no. 3 (2020): 3107-3119.
- [14] Siddique, Marif Daula, Saad Mekhilef, Noraisyah Mohamed Shah, Jagabar Sathik Mohamed Ali, and Frede Blaabjerg. "A new switched capacitor 7L inverter with triple voltage gain and low voltage stress." *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 67, no. 7 (2019): 1294-1298.
- [15] Siddique, Marif Daula, Saad Mekhilef, Noraisyah Mohamed Shah, and Jagabar Sathik Mohamed Ali. "New switched-capacitor-based boost inverter topology with reduced switch count." *Journal of Power Electronics* 20 (2020): 926-937.

- [16] Hussan, Md Reyaz, Adil Sarwar, Marif Daula Siddique, Saad Mekhilef, Shafiq Ahmad, Mohamed Sharaf, Mazen Zaindin, and Muhammad Firdausi. "A novel switched-capacitor multilevel inverter topology for energy storage and smart grid applications." *Electronics* 9, no. 10 (2020): 1703.
- [17] Siddique, Marif Daula, Saad Mekhilef, Adil Sarwar, Afroz Alam, and Noraisyah Mohamed Shah. "Dual asymmetrical dc voltage source based switched capacitor boost multilevel inverter topology." *IET Power Electronics* 13, no. 7 (2020): 1481-1486.
- [18] Siddique, Marif Daula, Jagabar Sathik Mohamed Ali, Saad Mekhilef, Asif Mustafa, N. Sandeep, and Dhafer Almakhlles. "Reduced switch count based single source 7L boost inverter topology." *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 67, no. 12 (2020): 3252-3256.
- [19] Azimi, Erfan, Aryorad Khodaparast, Mohammad Javad Rostami, Jafar Adabi, M. Ebrahim Adabi, Mohammad Rezanejad, Eduardo MG Rodrigues, and Edris Pouresmaeil. "X-type step-up multi-level inverter with reduced component count based on switched-capacitor concept." *Electronics* 9, no. 12 (2020): 1987.
- [20] Sandeep, N., and Udaykumar R. Yaragatti. "A switched-capacitor-based multilevel inverter topology with reduced components." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33, no. 7 (2017): 5538-5542.
- [21] Lee, Sze Sing, Kyo-Beum Lee, Ibrahim Mohd Alsofyani, Yeongsu Bak, and Jing Fang Wong. "Improved switched-capacitor integrated multilevel inverter with a DC source string." *IEEE Transactions on Industry Applications* 55, no. 6 (2019): 7368-7376.
- [22] Raman, S. Raghu, Ka Wai Eric Cheng, and Yuanmao Ye. "Multi-input switched-capacitor multilevel inverter for high-frequency AC power distribution." *IEEE Transactions on Power Electronics* 33, no. 7 (2017): 5937-5948.
- [23] Fong, Yat Chi, S. Raghu Raman, Yuanmao Ye, and Ka Wai Eric Cheng. "Generalized topology of a hybrid switched-capacitor multilevel inverter for high-frequency AC power distribution." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 8, no. 3 (2019): 2886-2897.
- [24] Singh, Ashutos. Kumar, and Rajib Kumar Mandal. "Switched-capacitor-based five-level inverter with closed-loop control for grid-connected PV application." *Computers and Electrical Engineering* 108, (2023): 108686.
- [25] Ardashir, Jaber Fallah, Mahdi Ghassemi, Behrouz Rozmeh, Frede Blaabjerg and Saeed Peyghami. "A Five-Level Transformer-less Grid-Tied Inverter Structure with Capacitive Voltage Divider Concept with Leakage Current Elimination." *IEEE Transactions on Industry Applications* 59, no. 5 (2023): 6025-6036.
- [26] Mohamed Ali, Jagabar Sathik, and Dhafer Almakhlles. "A Compact Five-Level Single-Stage Boost Inverter." *Energies* 16, no. 3 (2023): 1181.
- [27] Kumar, Dhananjay, Rajesh Kumar Nema and Sushma Gupta. "Development of a novel fault-tolerant reduced device count T-type multilevel inverter topology." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 132, (2021): 107185.
- [28] Islam, Md. Tariqul, Md. Ahsanul Alam, Molla Shahadat Hossain Lipu, Kamrul Hasan, Sheikh Tanzim Meraj, Hasan Masrur and Md. Fayzur Rahman. "A Single DC Source Five-Level Switched Capacitor Inverter for GridIntegrated Solar Photovoltaic System: Modeling and Performance Investigation." *Sustainability* 15, (2023): 8405.
- [29] Zaid, Mohammad, Mohammad Ali, Adil Sarwar, Muhammad Khalid and Atif Iqbal. "A reduced switch stress common-ground boosting multilevel inverter for renewable energy applications." *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 12, (2025): 100953.