

ارائه یک مبدل توان پالسی ولتاژ بالا دوقطبی با استفاده از ساختار چند برابر کننده کلید-خازنی

جعفر ادبی، استادیار

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران - j.adabi@nit.ac.ir

چکیده: درخواست‌ها برای تولید ولتاژ پالسی با دامنه‌های بالا بسیار زیاد شده است در حالی که ساختارهای سنتی و ارائه شده در سال‌های اخیر از تعداد ادوات کلیدزنی بالا و منابع ولتاژ با دامنه بالا رنج می‌برند. از این‌رو ساختارهای چندبرابرکننده به‌عنوان ساختارهای جایگزین به‌عنوان تولیدکننده‌های جدید برای توان پالس ارائه شده‌اند. در این مقاله، یک ساختار جدید برای مبدل‌های تولید پالس قدرت ارائه شده است که از یک ورودی منبع ولتاژ DC استفاده شده است که دامنه پالس ولتاژ در خروجی را با فرکانس قابل تنظیم، به‌صورت دوقطبی چندین برابر می‌کند. در این ساختار که از دو قسمت (۱) چندبرابرکننده ولتاژ بر پایه مبدل نیم‌پیل و (۲) مبدل دوقطبی مارکس تشکیل شده است، به دلیل چند برابر شارژ شدن خازن‌ها، از تعداد عناصر کلیدزنی نظیر کلید، دیود و خازن بسیار کمتری در مقایسه با دیگر ساختارها استفاده می‌شود. از آنجاکه محدودیت این مدار استفاده از دو کلید با استرس ولتاژ بالا است، عمده‌ترین کاربرد آن در ساختارهایی با منبع ولتاژ پایین (به‌مانند باتری، سلول خورشیدی و پیل سوختی) است. همچنین ساختار پیشنهادی دارای قابلیت تولید پالس ترکیبی پهن و باریک است. برای تأیید عملکرد ساختار پیشنهادی، تست آزمایشگاهی توسط پردازنده TMS320F28335 صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: چند برابر کننده ولتاژ، ماژول نیم‌پیل، توپولوژی مارکس، ساختار کلید-خازنی.

A Bipolar High Voltage Pulsed Power Converter using Switched-capacitors Multiplier

J. Adabi, Assistant Professor

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: j.adabi@nit.ac.ir

Abstract: Requests for production of high voltage pulses have increased recently. Traditional pulsed power converters suffer from high number of switching components and high amplitude of input voltage. Voltage multipliers are introduced as alternative to generate high voltage pulses with lower input voltage sources. This paper presents a pulsed power inverter based on switched-capacitors multiplier technology with low input voltage sources. The high output voltage can be achieved at a bipolar waveform with a flexible switching frequency. This topology consists of a voltage multiplier based on H-bridge cells and a bipolar Marx topology. Due to application of voltage multiplier at this converter, input DC voltage is boosted to a certain amount and then it will be converted to a high voltage pulse and therefore, number of circuit components decrease to a certain amount in comparison with other power electronics-based topologies. As the main constraint of this circuit is using two switches with high voltage stress, the main application of proposed pulse generator is in the applications with low voltage DC sources. Proposed structure can generate narrow pulses combined with wide pulses as well. Experimental results with TMS320F28335 processor are obtained to verify the analysis.

Keywords: Voltage multiplier, half-bridge module, marx topology, switched-capacitors

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۶، ۱۳۹۵/۱۱/۳۰ و ۱۳۹۶/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۲

نام نویسنده مسئول: جعفر ادبی فیروزجایی

نشانی نویسنده مسئول: مازندران، بابل، خیابان دکتر شریعتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، کد پستی: ۷۱۱۶۷-۴۷۱۴۸، صندوق پستی: ۴۸۴

۱- مقدمه

ترکیبی پهن و باریک ارائه شده‌اند. در این ساختارها، بر اساس ترکیب پالس پهن و باریک، یا ترکیب مبدل‌ها با شبکه‌های رزونانسی و ترانسفورماتورها، انواع مختلف پالس‌ها تولید خواهد شد. در این ساختارها میزان توان مصرفی کاهش یافته و از اثرات جانبی ناشی از پالس‌های پهن در برخی کاربردها مانند استرلیزاسیون مواد غذایی، جلوگیری می‌کنند.

از خواص ساختارهای فوق، استرس کم ولتاژ ادوات کلیدزنی است و این به دلیل خاصیت ماژولار بودن آن‌ها است. اما برای تولید ولتاژ بالای پالسی با استفاده از منابع با ولتاژ ورودی پائین، از تعداد ادوات کلیدزنی و خازن‌های بسیار زیادی استفاده می‌شود که این به دلیل شارژ شدن خازن‌ها به اندازه منبع ورودی است. همچنین بسیاری از ساختارها برای تولید پالس منفی نیاز به اینورتر پل H دارند که کلیدهای اینورتر مذکور مجبورند ولتاژ پیک پالس خروجی را تحمل کنند که گاهی اوقات این کلیدها با مقادیر نامی مورد نیاز در بازار یافت نمی‌شوند. از این رو کمبود ساختاری که بتوان از مقدار منبع پائین، ولتاژ دوقطبی با دامنه بالای ولتاژ در خروجی تولید کرد که استرس ولتاژ عناصر کلیدزنی در رنج مناسب حفظ شود، به شدت حس می‌شود [۲۲].

در این مقاله، ساختاری ارائه شده است که از آرایش مناسبی از مبدل‌های نیم‌پل به‌عنوان چندبرابرکننده و مبدل مارکس در طبقه آخر به‌عنوان تولیدکننده پالس در خروجی تشکیل شده است. ساختار پیشنهادی علاوه بر این که قادر به تولید ولتاژ تک‌قطبی و دوقطبی است، از منبع DC با مقدار پائین استفاده شده است و می‌تواند ولتاژ با دامنه بالا تولید کند و از تعداد کلید قدرت، درایور و خازن بسیار کمتری نسبت به دیگر ساختارها استفاده شده است. همچنین ساختار پیشنهادی قابلیت گسترش به طبقات بالاتر و تولید ولتاژ بسیار بالاتر با اضافه شدن تعداد کم ادوات کلید-خازن را دارا است. این ساختار، دارای قابلیت خودمتعادلسازی است یعنی بدون نیاز به مدار خارجی و از طریق کلیدزنی داخلی خود مبدل، خازن‌ها شارژ می‌شوند. به این صورت که در ابتدا خازن‌های بخش چندبرابرکننده به‌صورت موازی توسط منبع DC و خازن‌های طبقات ماقبل شارژ شده و سپس با قرار گرفتن در حالت سری بر روی خازن‌های طبقه آخر آن‌ها را شارژ می‌کنند. همچنین علاوه بر این که از ترانس برای افزایش ولتاژ استفاده نمی‌شود، با اعمال روش کنترلی بسیار ساده، توان پالسی با دامنه بالا و فرکانس دلخواه تولید می‌شود. همچنین پالس ترکیبی پهن و باریک نیز مورد تست قرار گرفت که نتایج آن در این مقاله قابل مشاهده است. در بخش ۲ ساختار پیشنهادی معرفی شده است و توضیح حالت‌های مختلف شارژ و دشارژ در این بخش شرح داده شده است. برای صحت عملکرد مبدل، تست آزمایشگاه انجام شده است که نتایج آن در بخش ۳ آورده شده است. مقایسه مبدل پیشنهادی با ساختارهای معروف در بخش ۴ آمده و نتیجه‌گیری از مقاله ارائه شده نیز در بخش ۵ آمده است.

کاربردهای مبدل‌های توان پالسی را می‌توان به چهار دسته صنایع نظامی، غذایی، محیطی و صنعتی تقسیم کرد [۱-۴]. در کاربردهای ذکر شده، پارامترهای مهم برای تولید توان پالسی، دامنه ولتاژ خروجی، زمان صعود و فرکانس خروجی است [۵]. در ساختارهای سنتی، از ادوات کلیدزنی گازی و مغناطیس استفاده می‌شد که دارای زمان صعود بسیار پائین و مقادیر نامی ولتاژ ادوات بالا است اما به دلیل حجم بالای این ادوات، قابلیت اطمینان پائین و عمر کوتاه، در تکنولوژی‌های جدید با پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت، همراه با تغییر کاربردها، مبدل‌های پالسی بر پایه کلید-خازن معرفی شده‌اند [۶]. استفاده از ادوات کلید-خازنی در کاربردهای تولید توان پالسی، دارای قابلیت‌های تکرار بالا، عمر طولانی، سایز فشرده و حجم کم می‌باشند [۷]. اساس کار این نوع مبدل‌های پالسی به‌طور معمول افزایش ولتاژ و شارژ یک عنصر ذخیره‌کننده انرژی، به‌طور معمول خازن، در طول زمان مناسب و دشارژ یکباره آن بر روی بار است [۸]. تخلیه یکباره انرژی ذخیره‌شده بر روی بار باعث انتقال توان بسیار بالا در مدت‌زمان کم می‌شود که در استرلیزاسیون مواد غذایی، پزشکی، آب و پلاسما کاربرد فراوان دارد [۹].

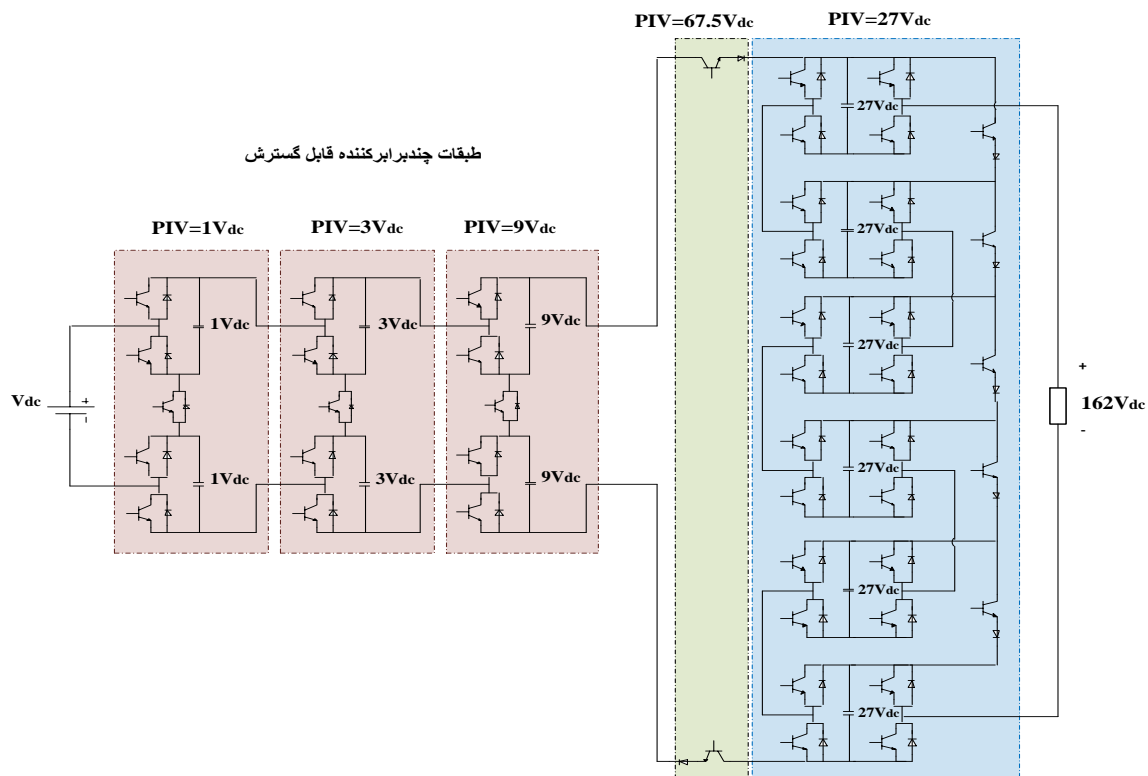
در سال‌های اخیر، توپولوژی‌های فراوانی برای تولید توان پالسی در ساختار کلید-خازن ارائه شده‌اند که هدف جبران مشکلات ناشی از ساختارهای سنتی را دنبال کرده‌اند. برای این منظور، ساختار مارکس تک‌قطبی ارائه شده است [۱۰]. این ساختار دارای قابلیت خود متعادل‌سازی، ماژولار بودن، تولید ولتاژ بالای پالسی قابل تکرار و قابلیت عملکرد برای ورودی‌های منبع DC بالا است. همچنین ساختارهای دیگری در مد تک‌قطبی ارائه شده‌اند [۱۱] که پاسخگوی صنعت برای تولید ولتاژ دوقطبی نیست چراکه برای تولید ولتاژ دوقطبی در این ساختارها، پیچیدگی مدار، افزایش استرس کلیدهای قدرت و افزایش ادوات کلیدزنی را دچار می‌شود. از این رو، ساختار دوقطبی مارکس ارائه شده است [۱۲] که دارای استرس ولتاژ به‌اندازه منبع DC بر روی تمامی المان‌ها است. همچنین ساختار دیگری در [۱۳] ارائه شده است که از تعداد یک کلید کمتر از ساختار مارکس دوقطبی به ازای هر ماژول استفاده شده است. توپولوژی‌های فراوانی برای تولید ولتاژ بالا در خروجی ارائه شده‌اند. از جمله این ساختارها می‌توان به استفاده از مبدل‌های DC-DC نظیر فلای بک [۱۴]، مبدل وارد [۱۵]، مبدل‌های چندسطحی [۱۶] و چند برابر کننده‌های خازنی دیودی [۱۷] اشاره کرد که یک منبع با دامنه پائین طوری به خازن‌ها وصل شده‌اند که به‌صورت خودمتعادلسازی شارژ شده و ولتاژ خروجی را طبقه به طبقه افزایش می‌دهد. همچنین ساختار چندبرابرکننده‌های سوئیچ خازنی در [۱۸] ارائه شده است. در این ساختار از چندبرابر شارژ کردن خازن‌ها استفاده شده و ولتاژ با دامنه پائین را به پالس تک‌قطبی با دامنه بالا با استفاده از گسترش ماژول‌ها تبدیل می‌کند. در [۱۹-۲۱] ساختارهای متنوعی برای تولید پالس

۲- ساختار مداری و اصول عملکرد

۲-۱- ساختار پیشنهادی

برای تولید ولتاژ پالسی با دامنه بالا، از مبدل‌های توان پالسی استفاده می‌شود که اگر مقدار منابع ولتاژ ورودی پائین باشد، ساختارهای سنتی در صورتی پاسخگوی درخواست‌ها می‌باشند که از تعداد ادوات کلیدزنی و خازن‌های بسیار زیادی استفاده شود که منجر به پیچیدگی کنترل و حفاظت و بالارفتن هزینه می‌شود. بهترین راه حل برای غلبه بر مشکل عملکرد مبدل‌های توان پالسی برای ورودی ولتاژ پائین مانند پیل سوختی، استفاده از چندبرابر کننده‌ها یا به عبارتی چند برابر شارژ کردن خازن‌ها است که نه تنها منجر به کاهش چشمگیر ادوات می‌شود بلکه کنترل مبدل را راحت تر می‌کند و این توانایی را به مبدل می‌دهد که در توان‌های بالاتر نیز پاسخگو باشند. به این منظور، ساختاری در

چندبرابرکننده مارکس



شکل ۱: ساختار مبدل توان پالسی پیشنهادی

ساختار پیشنهادی ترکیبی است از:

(۱) مبدل چندبرابرکننده سطح ولتاژ با n طبقه که ولتاژ خروجی آن برابر V_{out1} یا V_{in2} است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{out1} = V_{in2} = (1 + \sum_{i=1}^n 2 \times 3^{(i-1)}) V_{dc} \quad (1)$$

به این ترتیب تعداد $5n$ کلید و $2n$ خازن در این قسمت از مبدل به کار می‌رود. همچنین سطح ولتاژ کلیدها و خازن‌ها در i امین طبقه

برابر $3^{(i-1)} \times V_{dc}$ است. ملاحظه گردد که به دلیل ولتاژ پائین بودن منبع ورودی، مقادیر نامی خازن‌ها و کلیدها پائین است. به طور مثال، با استفاده از سه طبقه و با وجود منبع ورودی ۳۸ ولت، ولتاژ کلید مورد نیاز ۳۴۲ ولت است.

(۲) مبدل افزایشنده مارکس با m ماژول که در شکل (۱) ملاحظه می‌شود. حداکثر ولتاژ خروجی برای مبدل پیشنهادی برابر ولتاژ مجموع ماژول‌های مارکس و برابر $m V_{in2}$ است. همچنین استرس

خازن‌های طبقات ماقبل شارژ شده و سپس به‌صورت سری بر روی خازن‌های طبقه آخر تخلیه می‌شوند و باعث شارژشان می‌شوند. شکل (۲) مسیر شارژ خازن‌ها را نشان می‌دهد. خازن‌های طبقه اول با منبع DC به‌صورت موازی متصل شده و $1V_{dc}$ شارژ می‌شوند. خازن‌های طبقه دوم توسط منبع DC و خازن‌های طبقه اول و به‌اندازه $3V_{dc}$ شارژ می‌شوند. خازن‌های طبقه سوم توسط منبع DC و خازن‌های طبقه اول و دوم و به‌اندازه $9V_{dc}$ شارژ می‌شوند. همچنین طبقه آخر شامل مبدل مارکس است و خازن‌های آن به‌اندازه مجموع ولتاژ منبع DC و خازن‌های مبدل چند برابر کننده در اینجا $27V_{dc}$ شارژ می‌شوند. برای این منظور، کلیدهای بالا و پائین ورودی به مبدل مارکس در حالت روشن قرار گرفته و منجر به جاری شدن جریان از بخش چندبرابر کننده به مبدل مارکس می‌شوند اما پس از شارژ خازن‌ها و ذخیره انرژی، نوبت به تخلیه آن‌ها بر روی بار است. برای این منظور، کلیدهای پل H مبدل مارکس به‌صورت ضربدری عمل می‌کنند و پالس دوقطبی را مطابق شکل (۳) تولید می‌کنند. شکل (الف) تولید ولتاژ مثبت، شکل (ب) تولید ولتاژ صفر و شکل (پ) تولید ولتاژ منفی را نشان می‌دهد.

۲-۳- تولید پالس ترکیبی پهن و باریک

اما همان‌طور که گفته شد، مبدل توان پالسی پیشنهادی این قابلیت را دارد که پالس ترکیبی پهن و باریک تولید کند. بر اساس تجربه ثابت شده است که پالس ترکیبی دارای نتایج مطلوب‌تری برای کاربردهای توان پالسی دارا است [۲۱]. برای رسیدن به ولتاژ ترکیبی در توپولوژی پیشنهادی از یکی از ماژول‌ها به‌عنوان ماژول فرکانس بالا استفاده می‌شود. به این‌صورت که کلیدهای یکی از ماژول‌ها در فرکانس بالاتر کلیدزنی می‌شوند. ترکیب ماژول فرکانس بالا با ماژول‌های دیگر ولتاژ ترکیبی را به وجود می‌آورد. ترکیب پالس پهن (با فرکانس کم) و پالس باریک (با فرکانس بالا) در شکل (۴-ب و پ) بخش شبیه‌سازی و در شکل (۴-پ) بخش تست آزمایشگاهی نمایش داده شده است.

ولتاژ تمام کلیدها و خازن‌ها برابر V_{in2} است. بنابراین، ولتاژ خروجی از رابطه زیر به دست می‌آید:

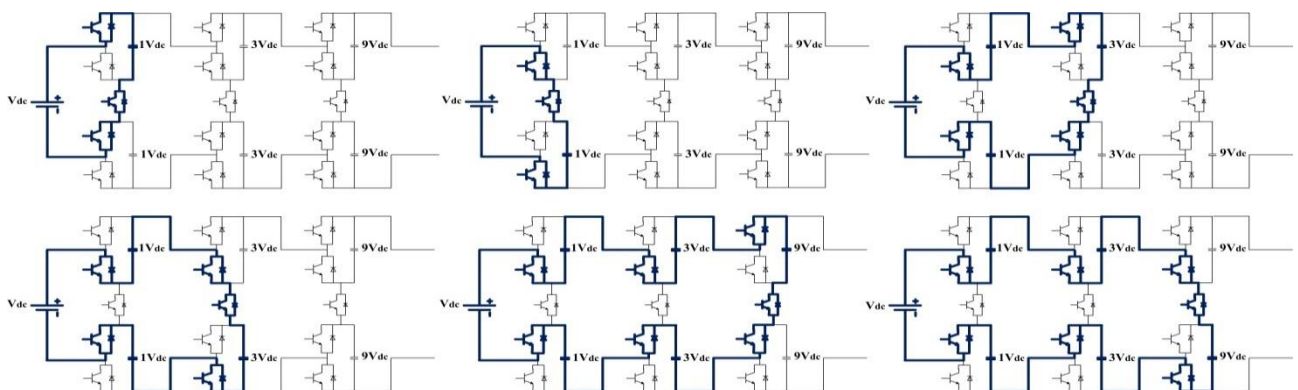
$$V_{out} = m \times (1 + \sum_{i=1}^n 2 \times 3^{(i-1)}) \cdot V_{dc} \quad (2)$$

ملاحظه گردد که تعیین تعداد ماژول‌های قسمت چندبرابر کننده و قسمت مارکس، به مقدار ولتاژ خروجی مورد نیاز و منبع ورودی در دسترس است و تعداد طبقات در هر دو قسمت قابل گسترش می‌باشند. با توجه به این‌که منبع ولتاژ ورودی دارای دامنه پائینی است، بدیهی است که مقادیر نامی المان‌ها پائین می‌ماند. بنابراین، تعداد کل کلیدها برای مبدل پیشنهادی برابر $5(n+m)$ و تعداد کل خازن‌ها برابر $2n+m$ است.

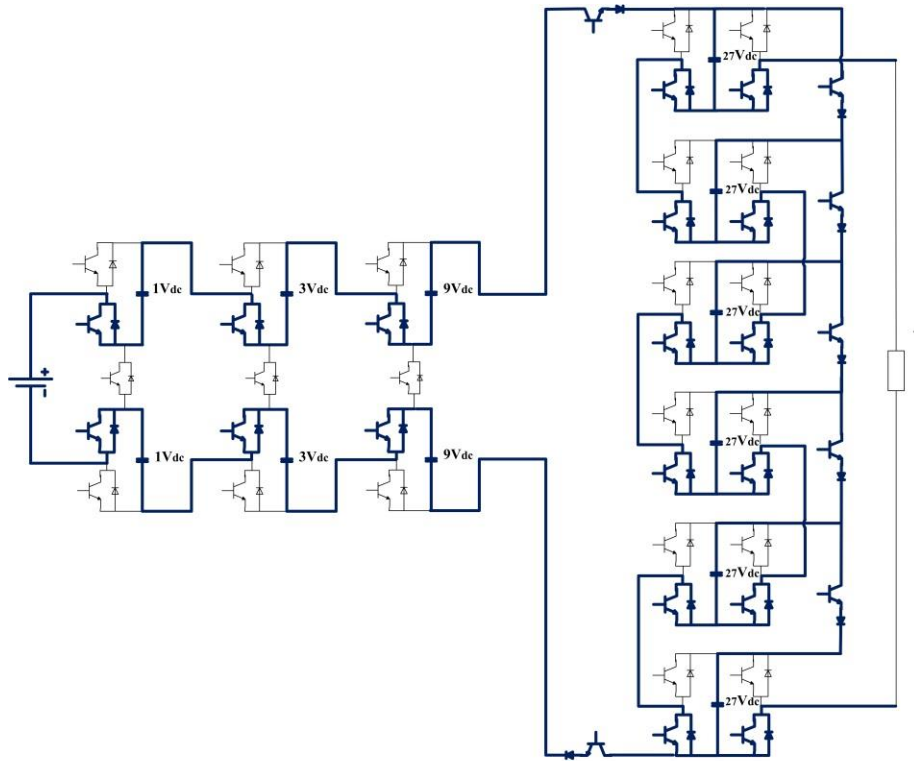
ساختار پیشنهادی از دو قسمت عمده تشکیل شده است. قسمت اول شامل مبدل‌های نیم‌پل است که طوری چیده شده‌اند که خازن‌ها با مقدارهای $1V_{dc}$ ، $3V_{dc}$ ، $9V_{dc}$ و ... شارژ می‌شوند. البته این مقادیر به مقادیر بالاتر ($27V_{dc}$ ، $81V_{dc}$ و ...) قابل گسترش هستند. اما خازن‌های مبدل مارکس به‌اندازه مجموع ولتاژ این خازن‌ها و منبع ورودی شارژ (در اینجا $27V_{dc}$) می‌شود. البته مبدل مارکس نیز قابلیت گسترش را دارد که منجر به افزایش ولتاژ در خروجی می‌شود. همچنین مبدل مارکس توسط دو کلید در بالا و پائین این مبدل جهت قطع و وصل ارتباط بین مبدل چندبرابر کننده و مبدل مارکس است. استرس ولتاژ تمامی المان‌های هر طبقه برابر و به‌اندازه ولتاژ خازن همان طبقه است. استرس ولتاژ کلیدهای اتصال دهنده مبدل چندبرابر کننده به مبدل مارکس نیز به‌اندازه نصف جمع ولتاژ خروجی منهای مجموع ولتاژ خازن‌های مبدل چندبرابر کننده است. برای راحتی تحلیل، ساختار مبدل چندبرابر کننده در حالت ۳ طبقه و مبدل مارکس در حالت ۶ طبقه نشان داده شده است.

۲-۲- حالت‌های شارژ و دشارژ

اصول کار مبدل توان پالسی پیشنهادی به این صورت است که در ابتدا خازن‌های بخش چندبرابر کننده به‌صورت موازی توسط منبع DC و

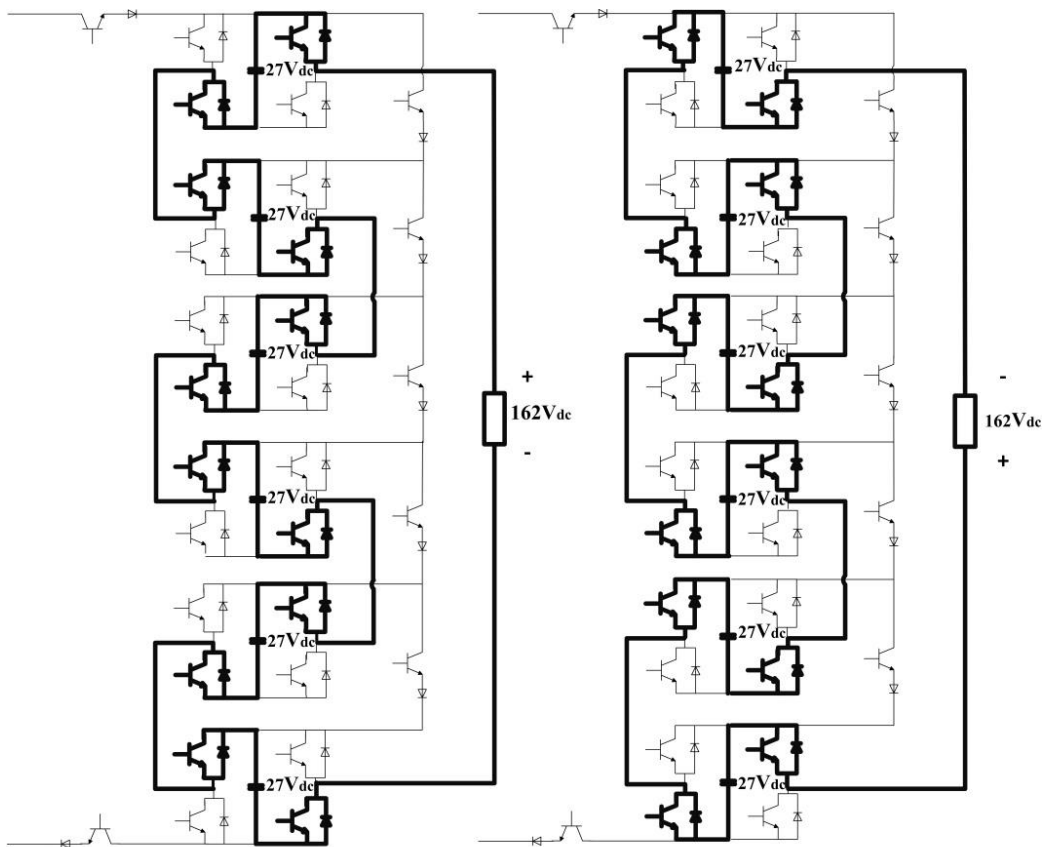


(الف)



(ب)

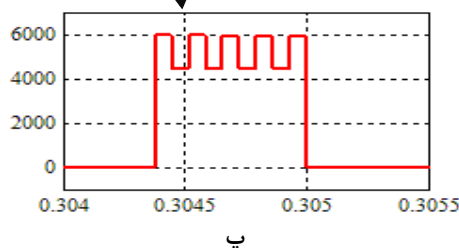
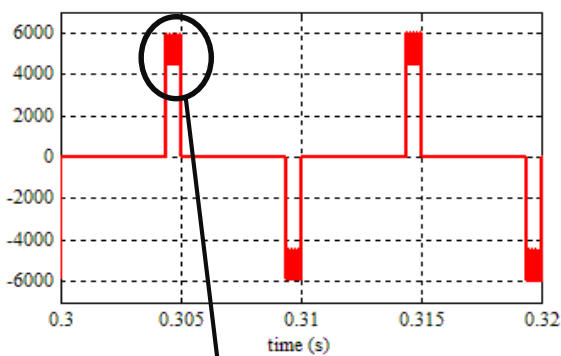
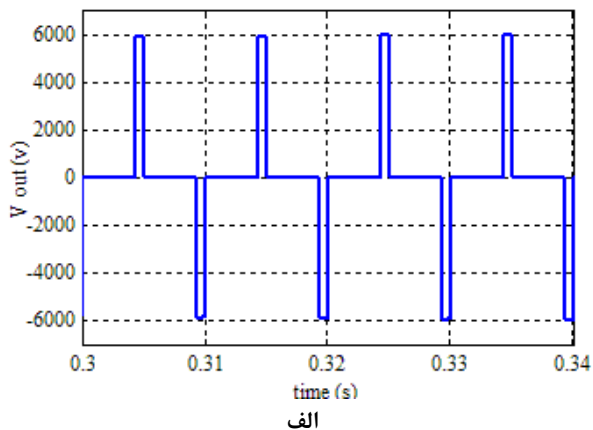
شکل ۲: حالت‌های شارژ (الف) مبدل چندبرابر کننده (ب) مبدل مارکس



(الف)

(ب)

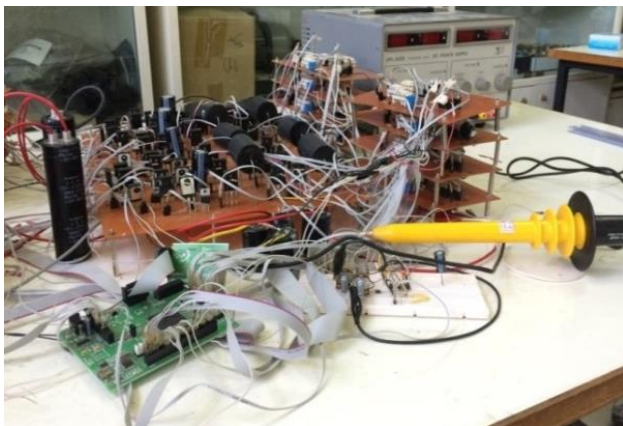
شکل ۳: حالت‌های دشارژ (الف) تولید سطح مثبت $V_{out} = 162V_{dc}$ (ب) تولید سطح منفی $V_{out} = -162V_{dc}$



شکل ۴: شکل موج ولتاژ خروجی (الف) پالس خروجی دوقطبی (ب و پ) ولتاژ پالسی ترکیبی پهن و باریک

۵- نتایج تست آزمایشگاهی

برای تأیید عملکرد، مبدل پیشنهادی در آزمایشگاه پیاده‌سازی شده است. شکل (۵) نمونه آزمایشگاهی مبدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمونه تست آزمایشگاهی

۳- محاسبه ظرفیت خازن‌ها

محاسبه ظرفیت خازن‌ها از طریق رابطه کلی جریان خازن به دست می‌آید. با توجه به این که خازن‌های طبقه اول به یک صورت شارژ می‌شوند، محاسبه ظرفیتشان به یک صورت انجام می‌شود.

$$\Delta V_{C,i} = \frac{1}{C_i} \int_{t_y}^{t_x} I dt \quad (3)$$

$$C = \frac{I \times \Delta t}{\Delta V} \quad (4)$$

در روابط بالا، $\Delta V_{C,i}$ و C_i به ترتیب ضربان ولتاژ و ظرفیت خازن i ام و I جریان عبوری خازن در زمان x تا y است. همچنین خازن‌های طبقه بعد از طریق منبع DC و خازن‌های طبقه قبل شارژ شده که برای نمونه محاسبه ظرفیت خازن‌های طبقه دوم به صورت زیر می‌باشند. لازم به ذکر است که ظرفیت بقیه خازن‌ها در طبقه بعدی به همین ترتیب قابل محاسبه می‌باشند.

$$V_{C_{M3}} = V_{in} + \frac{\frac{C_{M1} \cdot C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}}}{\frac{C_{M1} \cdot C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}} + C_{M3}} \times (V_{C_{M1}} + V_{C_{M2}}) \quad (5)$$

$$C_{M3} = \frac{\left[\left(\frac{C_{M1} \cdot C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}} \right) \times (V_{C_{M1}} + V_{C_{M2}}) \right] + V_{in}}{V_{C_{M3}}} - \left(\frac{C_{M1} \cdot C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}} \right) \quad (6)$$

$$V_{C_{M4}} = V_{in} + \frac{\frac{C_{M1} \cdot C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}}}{\frac{C_{M1} \cdot C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}} + C_{M4}} \times (V_{C_{M1}} + V_{C_{M2}}) \quad (7)$$

$$C_{M4} = \frac{\left[\left(\frac{C_{M1} \cdot C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}} \right) \times (V_{C_{M1}} + V_{C_{M2}}) \right] + V_{in}}{V_{C_{M4}}} - \left(\frac{C_{M1} \cdot C_{M2}}{C_{M1} + C_{M2}} \right) \quad (8)$$

در روابط فوق، $V_{C_{Mn}}$ ولتاژ خازن ماژول n ام، V_{in} ولتاژ ورودی و C_{Mn} ظرفیت خازن ماژول n ام است.

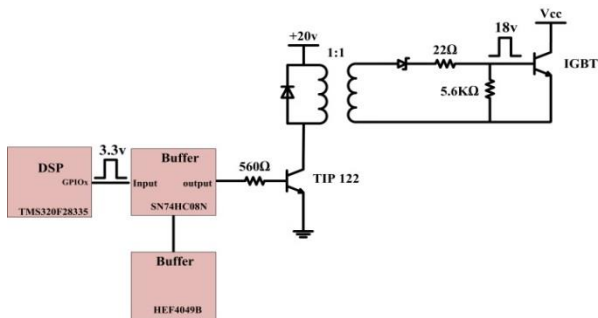
۴- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی برای مبدل توان پالسی پیشنهادی در شکل (۴) مشاهده می‌شود. مقادیر استفاده‌شده در شبیه‌سازی به این صورت است که ولتاژ ورودی ۳۸ ولت، بار اهمی خالص با مقدار ۱۰ کیلو اهم، فرکانس ۱۰۰ هرتز و مقادیر خازن مانند جدول ۱ می‌باشند. شکل (۴-الف) ولتاژ پالسی دوقطبی و شکل (۴-ب و پ) ولتاژ دوقطبی ترکیبی پهن و باریک را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها پیداست در شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی، مقادیر به دست آمده ایده‌آل تر از حالت تست عملی می‌باشند و این به خاطر وجود المان‌های کلیدزنی در مدار قدرت و عناصر مدار درایور است.

جدول ۱: پارامترهای مورد استفاده در تست آزمایشگاهی

پارامتر	مقدار
منبع DC ورودی	۳۸ ولت
فرکانس خروجی	۵۰۰ هرتز
ظرفیت خازن‌های طبقه اول	۱۰۰۰۰ μf (ولت ۵۰), ESR=۰/۰۲۷Ω (ECOS1HP103CA)
ظرفیت خازن‌های طبقه دوم	۴۷۰ μf (ولت ۱۶۰), ESR=۰/۲۱۲Ω (ECOS2CP471BA)
ظرفیت خازن‌های طبقه سوم	۲۲ μf (ولت ۴۰۰), ESR=۱/۵۷۶Ω (22μf 400v nichicon)
ظرفیت خازن‌های طبقه مارکس	۰/۴۷ (ولت ۱۲۰۰) ESR=۴/۸Ω (EACO-STD)
بار	۱۰-kΩ
دیود	MUR860 & RHRP15120
کلید قدرت	HGTP12N60A4 & SGP15N120
درایور	IRS21864
ایزولاتور	ترانس پالس
پردازنده	DSP TMS320F28335

برای کنترل کلیدهای فعال در مبدل پیشنهادی، می‌بایست پالس‌های مورد نیاز تولید شود و با دامنه مناسب به کلیدهای قدرت برسد. برای این منظور، از پردازنده DSP TMS320F28335 استفاده شده است. به دلیل این که حالت‌های کلیدزنی از قبل تعیین شده‌اند و تعداد حالات بسیار کم می‌باشند، کنترل مبدل به صورت بلادرنگ صورت گرفته و زمان‌های محاسبه شده به صورت از قبل تعیین شده به پردازنده وارد می‌شوند. شکل (۷) مدار شماتیک درایور برای کلیدها را نشان می‌دهد.

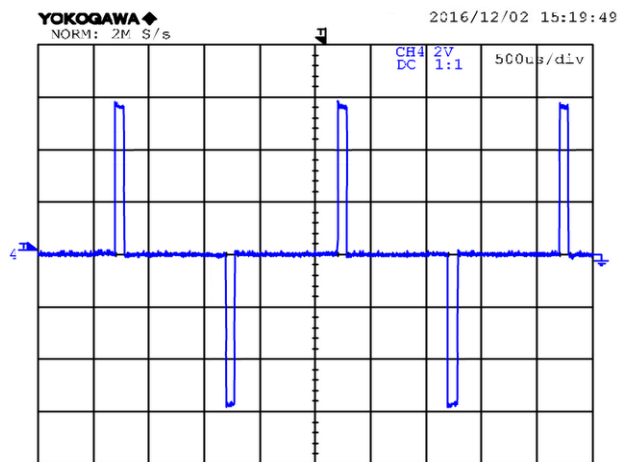


شکل ۷: مدار معادل درایور برای راه‌اندازی کلید قدرت

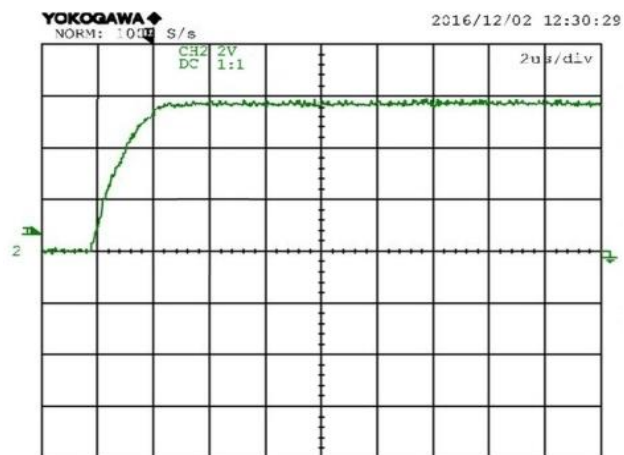
۶- مقایسه

برای مقایسه مدار پیشنهادی با مدارهای موجود، جدول ۲ در ادامه آمده است. در این مقایسه خروجی مدار ۱۶۲۷dc خواهد بود. بر این اساس، مبدل‌های توان پالسی موجود [۱۲] و [۱۳]، برای تولید ولتاژهای بالا به ازای ورودی‌های پائین، دارای تعداد کلید قدرت، خازن و درایور بسیار بالایی می‌شوند. در مقابل، مبدل پیشنهادی دارای تعداد ادوات کلیدزنی بسیار کمتری در مقایسه با ساختارهای موجود است. پر واضح است که برای سطوح پایین منبع ولتاژ ورودی، توپولوژی مذکور یک ساختار مناسب است و با تعداد طبقات کم، ولتاژ بالایی در خروجی

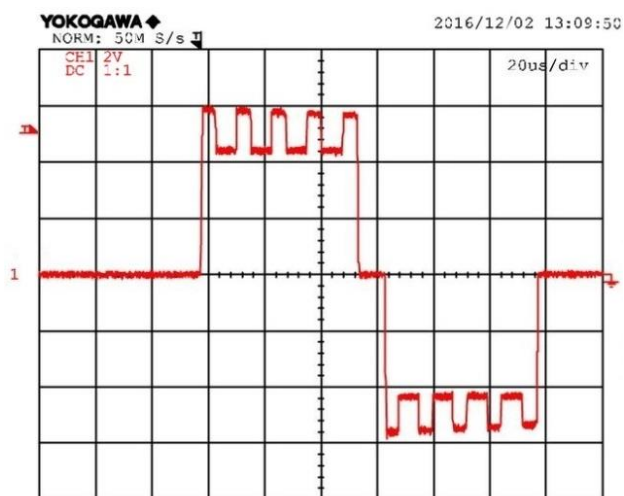
مشخصات جدول ۱ برای تست آزمایشگاهی استفاده شده است. همچنین شکل موج ولتاژ پالسی خروجی در حالت‌های دوقطبی و ترکیبی پهن و باریک در شکل (۶) آمده است.



الف

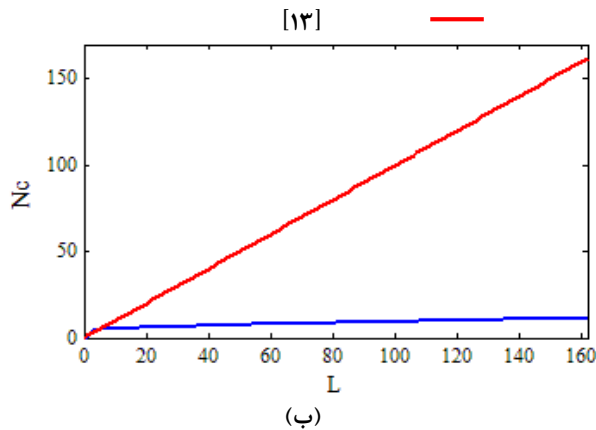


ب



پ

شکل ۶: شکل موج ولتاژ خروجی (الف و ب) پالس خروجی دوقطبی (پ) ولتاژ پالسی ترکیبی پهن و باریک (پراب: ۱۰۰۰×)



شکل (۸) مقایسه ساختار پیشنهادی از لحاظ (الف) تعداد کلید (ب) تعداد خازن

در شکل‌های فوق، N_s تعداد کلید، N_c تعداد خازن و L تعداد چندبرابر شدن ورودی است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ساختار جدید از مبدل‌های توان پالسی ارائه شده است. از قابلیت‌های برجسته این ساختار، چند برابر شارژ شدن خازن‌ها است که با تخلیه آنی انرژی ذخیره شده، باعث تولید ولتاژ بسیار بالایی بر روی بار می‌شود. عملکرد مبدل بر اساس قابلیت خودمتعادلسازی شرح داده شد و حالت‌های دشارژ خازن‌ها که باعث تولید ولتاژ دوقطبی می‌شود، نشان داده شد. جهت تصدیق عملکرد مبدل پیشنهادی، تست آزمایشگاهی انجام شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مبدل پیشنهادی با تعداد ادوات کلیدزنی پائین قابلیت تولید ولتاژ بسیار بالا را دارا است. ذکر این مطلب ضروری است که کاربرد عمده این روش، تولید ولتاژ بالای پالسی با استفاده از منبع DC ولتاژ پایین است.

مراجع

- [1] H. Akiyama, T. Sakugawa, T. Namihira, K. Takaki, Y. Minamitani, and N. Shimomura, "Industrial applications of pulsed power technology," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 5, pp. 1051–1064, Oct. 2007.
- [2] S. B. Dev, D. P. Rabussay, G. Widera, and G. A. Hofmann, "Medical applications of electroporation," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 206–223, Feb. 2000.
- [3] H. Akiyama, S. Sakai, T. Sakugawa, and T. Namihira, "Environmental applications of repetitive pulsed power," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 4, pp. 825–833, Aug. 2007.
- [4] S.-Y. Tseng, T.-F. Wu and Y.-M. Chen, "Wide pulse combined with narrow-pulse generator for food sterilization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 2, pp. 741–748, Feb. 2008.
- [5] Y. Wu, K. Liu, J. Qiu, X. Liu, and H. Xiao, "Repetitive and high voltage Marx generator using solid-state devices," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 4, pp. 937–940, Aug. 2007.

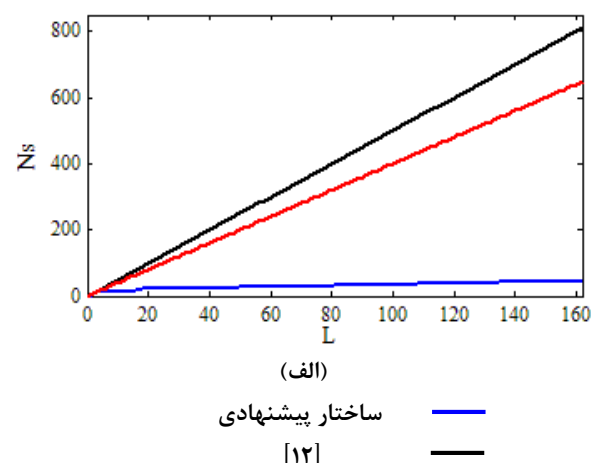
ایجاد خواهد کرد. همچنین همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، مجموع PIV در ساختار پیشنهادی بیشتر از ساختارهای [۱۲] و [۱۳] است اما تعداد کلید، دیود و خازن‌ها به‌شدت کاهش یافته است. درواقع، با افزایش حدود ۲۰ درصدی مجموع PIV نسبت به ساختار [۱۲]، به میزان ۱۸ برابر کاهش کلید و درایور و ۱۴ برابر کاهش تعداد خازن را خواهد داشت و نسبت به ساختار [۱۳]، تقریباً مجموع PIV برابر بوده ولی تعداد کلید، درایور و خازن ۱۴ برابر کاهش یافته است اما برای ورودی‌های بالا زمانی که عناصر مجبورند چند برابر ولتاژ ورودی را تحمل کنند، با توجه به ادوات موجود در بازار پیدا کردن چنین کلید، دیود و خازنی سخت است. بنابراین، عملکرد مبدل پیشنهادی در ولتاژهای ورودی بالا یکی از معایب روش پیشنهادی است که استفاده از آن را به کاربردهای ولتاژ پایین محدود می‌سازد. این موضوع باید در یک مقایسه منصفانه مدنظر قرار گیرد که اصولاً مبدل‌های مورد مقایسه برای کاربردهای با منبع ولتاژ ورودی متوسط (در حد چند صد ولت با توجه به مقادیر نامی ولتاژ کلیدها) است درحالی‌که مبدل پیشنهادی برای کاربردهای ولتاژ پایین ورودی مناسب است.

جدول ۲: مقایسه مبدل پیشنهادی با ساختارهای [12] و [13] در ولتاژ

$$V_{OUT} = 162V_{DC} \text{ خروجی}$$

مجموع PIV کلیدها $\times V_{DC}$	تعداد درایور	تعداد خازن‌ها	تعداد کلیدهای قدرت	$V_{OUT} = 162 V_{DC}$
۸۱۰	۸۱۰	۱۶۲	۸۱۰	ساختار مارکس دوقطبی [۱۲]
۹۷۲	۶۴۴	۱۶۱	۶۴۴	ساختار چهار سوئیچ دوقطبی [۱۳]
۹۸۳	۴۶	۱۲	۴۶	ساختار پیشنهادی

همچنین مقایسه کلی ساختار پیشنهادی با ساختارهای [۱۲] و [۱۳] بر اساس تعداد کلیدها (درایورها) و خازن‌ها برحسب سطح ولتاژ در حالت کلی در شکل (۸) آمده است که برتری ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد.



- [15] R. M. Nelms and J. E. Schatz, "A capacitor charging power supply utilizing a ward converter," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 39, no. 5, pp. 421–428, Oct. 1992.
- [16] H. Sheng *et al.*, "Design and implementation of a high power density three-level parallel resonant converter for capacitor charging pulsed power supply," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 39, no. 4, pp. 1131–1140, April, 2011.
- [17] S. Zabihi, F. Zare, G. Ledwich, A. Ghosh, and Z. Zabihi, "A Novel CDVM based high-voltage converter using low power solid-state switches and a tuned resonant circuit designed for pulsed-power application," *Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC)*, 2012 3rd, pp. 454–460, DOI: 10.1109/PEDSTC.2012.6183372, February, 2012.
- [18] M. Rezanejad, A. Sheikholeslami, and J. Adabi, "Modular Switched Capacitor Voltage Multiplier Topology for Pulsed Power Supply," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 2, pp. 635–643, April, 2014.
- [19] T.-F. Wu, S.-Y. Tseng, C.-C. Lee, and Y.-M. Chen, "Analysis and design of a soft-switching interleaved forward converter for generating pulsed electric field," in *Proc. 25th Int. Telecommun. Energy Conf.*, Oct. 2003, pp. 705–712.
- [20] T.-F. Wu, S.-Y. Tseng, and J.-C. Hung, "Generation of pulsed electric fields for processing microbes," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 32, no. 4, pp. 1552–1562, Aug. 2004.
- [21] M. Rezanejad, A. Sheikholeslami, and J. Adabi, "High-Voltage Pulsed Power Supply to Generate Wide Pulses Combined with Narrow Pulses," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, no. 7, pp. 1894–1901, July, 2014.
- [22] L. M. Redondo and J. Fernando Silva, "Repetitive high-voltage solid state Marx modulator design for various load conditions," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 37, No. 8, pp. 1632–1637, 2009.
- [6] S. Zabihi, F. Zare, G. Ledwich, A. Ghosh, and H. Akiyama, "A novel high-voltage pulsed-power supply based on low-voltage switch-capacitor units," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 38, no. 10, pp. 2877–2887, Oct. 2010.
- [7] M. Rezanejad, A. Sheikholeslami, and J. Adabi, "High-Voltage Modular Switched-Capacitor Pulsed-Power Generator," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, no. 5, pp. 1373–1379, May, 2014.
- [8] Y. Zhang, J. Liu, Z. Dong, Y. Jia, C. Nie, S. Zhou, and Y.-F. Liu, "A Boost Inverter based Bipolar High-Voltage Pulse Generator," *IEEE Trans. Power Electron.* Pages: 1 - 1, DOI: 10.1109/TPEL.2016.2576562, 2016.
- [9] L. M. Redondo, "A DC voltage-multiplier circuit working as a high-voltage pulse generator," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 38, no. 10, pp. 2725–2729, Oct. 2010.
- [10] L. L. Rocha, J. F. Silva, and L. M. Redondo, "Multilevel High-Voltage Pulse Generation Based on a Modular Solid-state Switch," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, no. 10, pp. 2956–2961, October, 2014.
- [11] S. Bae, A. Kwasinski, M. M. Flynn, and R. E. Hebner, "High Power Pulse Generator with Flexible Output Pattern," *IEEE Trans. Power Electron.* vol. 25, no. 7, pp. 2725–2729, July, 2010.
- [12] T. Sakamoto, A. Nami, M. Akiyama, and H. Akiyama, "A repetitive solid state Marx-type pulsed power generator using multistage switch-capacitor cells," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 40, no. 10, pp. 2316–2321, Oct. 2012.
- [13] L. M. Redondo, "New four-switch bipolar solid state Marx generator," 2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC), pp. 1–5, DOI: 10.1109/PPC.2013.6627573, June, 2013.
- [14] P. Davari, F. Zare, A. Ghosh, and H. Akiyama, "High-voltage modular power supply using parallel and series configurations of flyback converter for pulsed power applications," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 40, no. 10, pp. 2578–2587, October, 2012.