

مولد پالس قدرت سه فاز با استفاده از مدار افزایشده خازنی-دیودی

محمد کبریائی*^۱، عباس کتابی^۲، ابولفضل حلوائی نیاسر^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

خلاصه

مولدهای پالس قدرت امروزه کاربرد وسیعی در صنایع و رشته های مختلف پیدا کرده اند. با توجه به این گستره کاربرد، استفاده از ساختارهایی که علاوه بر پاسخ گویی به نیاز کاربرد، کوچک بوده، انعطاف پذیری بالایی داشته باشد، ساده بوده و مقرون به صرفه باشد اجتناب ناپذیر است. در میان تمامی مبدل هایی که می تواند برای تولید پالس های ولتاژ بالا مورد استفاده قرار گیرد، مبدلهای افزایشده دیودی خازنی برای برآورده کردن نیازهای فوق، کاندیدای مناسبی هستند. در این مقاله از ترکیب این مبدل ها با مبدل مارکس، توپولوژی جدیدی از مولد پالس قدرت پیشنهاد شده که از شبکه سه فاز در دسترس تغذیه می شود و ضریب افزایش ولتاژ بالایی دارد. عملکرد توپولوژی به کمک شبیه سازی در محیط MATLAB/SIMULINK نیز در این مقاله بررسی شده و بسط توپولوژی برای مبدل های n فاز ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: مولد پالس قدرت، افزایشده ولتاژ دیودی خازنی، توپولوژی مارکس

۱. مقدمه

مولدهای پالس های قدرت^۱ مولدهایی هستند که قادرند پالس های با دامنه ولتاژ بالا در زمان های بسیار کوتاه تولید کنند. امروزه سیستم های پالس قدرت کاربردهای گسترده ای یافته اند. این سیستم ها در پزشکی، تصفیه آب و هوا، میکروپودر زدایی مواد غذایی، فرم دادن فلزات، تولید نانو پودر و غیره کاربرد دارند .

از مهمترین اجزای یک مولد پالس قدرت، سوییچ های قطع شونده و یا وصل شونده تولید و اعمال پالس می باشد که در ساختار ژنراتورهای مختلف از سوییچ های متفاوتی استفاده می شود. مولدهایی که از سوییچ های نیمه هادی قدرت استفاده می کنند به دلیل داشتن اندازه نسبتاً کوچک، نرخ تکرار پالس بالا، قابلیت اطمینان بالا، انعطاف پذیری زیاد و طول عمر بالا مورد توجه ویژه هستند [۱-۳]. این مولد ها را می توان در چهار دسته کلی طبقه بندی کرد .

۱. دسته اول شامل مولدهایی می شود که از ساختار ساده ذخیره کننده برای ذخیره انرژی و سوییچ برای تخلیه انرژی آن استفاده می کنند. به عنوان مثال مرجع [۴] از دو خازن ذخیره کننده بزرگ برای پالس های مثبت و منفی استفاده می کند. دو سوییچ نیز لازم بوده است که هر کدام از آن ها از چندین IGBT به صورت سری شده تشکیل شده است .

* Corresponding author

¹ Pulsed power generator

۲. مولد های MARX اساس بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه استفاده از سویچ‌های نیمه هادی در سیستم‌های پالس قدرت را تشکیل می‌دهند. اساس کار در مولد مارکس، شارژ خازن‌ها به صورت موازی و سپس تخلیه آن‌ها به صورت توپولوژی سری است. به این ترتیب ولتاژ پالس خروجی برابر با جمع ولتاژ خازن‌های شارژ شده خواهد بود. مولد پالس در مقاله [۵] یک مولد مارکس نیمه هادی ساده با چهار طبقه است که برای سویچ‌های هر طبقه از آن از MOSFET استفاده شده است. برای افزایش ولتاژ قابل تحمل هر طبقه در ژنراتور مارکس، از اتصال سری قطعات نیمه هادی باید استفاده کرد که توزیع ولتاژ بر روی آن‌ها باید به وسیله المان‌های اکتیو یا پسیو کنترل گردد [۶]. اساس توپولوژی مولد استفاده شده در مرجع [۷] نیز یک مدار نیمه هادی مارکس است که از اتصال سری مبدل‌های تمام پل سویچی خازنی استفاده می‌کند.

۳. توپولوژی‌های مختلف از مبدل‌های dc-dc نیز کاندیدهایی برای ژنراتورهای پالس قدرت نیمه هادی هستند. به عنوان نمونه، در مرجع [۸] از اتصال سری و موازی مبدل‌های فلای بک استفاده شده است تا نرخ توان و زمان صعود پالس را بهبود ببخشد. مقاله [۹] از مبدل dc-dc بر اساس مبدل فی استفاده کرده است و به کمک یک شبکه تطبیق شده توانسته استرس ولتاژ بر روی سویچ‌ها را کاهش دهد.

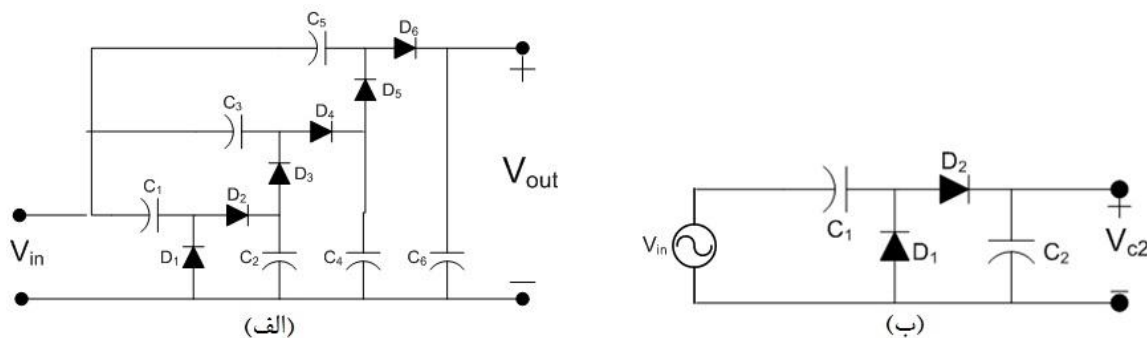
۴. مبدل‌های افزایشنده ولتاژ دیودی-خازنی (CDVM) نیز به دلیل استرس ولتاژ کم بر روی دیودها و خازن‌ها، کوچک بودن از نظر اندازه و سایز و قیمت پایین گزینه مناسبی برای کاربرهای ولتاژ بالا می‌باشند [۱۰]. اساس عملکرد این مبدل‌ها شارژ خازن‌ها با ولتاژ کم و در زمان مشخص و تخلیه در بار می‌باشد. در مراجع [۱۱، ۱۲] از سویچ‌های الکترونیک قدرت در ساختار مبدل CDVM استفاده شده است تا پالس‌های ولتاژ بالای با فرکانس زیاد را بر روی بار ایجاد کنند.

اساس توپولوژی مبدل ارائه شده در این مقاله، با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد مانند سادگی ساختار، جمع و جور بودن و قیمت بسیار پایین، مبدل CDVM در هر فاز می‌باشد. برای تشکیل پالس نیز با ایده گرفتن از توپولوژی مارکس، با سری کردن خازن‌های خروجی مبدل‌های CDVM، پالس قدرت بر روی بار ایجاد می‌گردد. در این مقاله ابتدا عملکرد یک مدار CDVM ساده که با ولتاژ سینوسی تغذیه می‌شود بررسی می‌گردد. سپس با معرفی توپولوژی جدید که مبتنی بر استفاده از توپولوژی مارکس برای قرار گرفتن خازن‌های خروجی مبدل‌های افزایشنده دیودی-خازنی هر فاز به صورت سری است، عملکرد آن تشریح شده و طی شبیه‌سازی در محیط MATLAB/SIMULINK بررسی می‌گردد.

۲. افزایشنده ولتاژ خازنی-دیودی

توپولوژی‌های مختلفی برای مبدل‌های CDVM وجود دارد که در شکل (۱-الف) نمونه‌ای از آن نشان داده شده است. مدار شکل (۱-ب)، مداری ساده از CDVM با ورودی جریان متناوب شامل دو خازن و دو دیود را نشان می‌دهد که به بررسی آن پرداخته می‌شود.

¹ Capacitor-diode voltage multiplier



شکل ۱- افزایش ولتاژ ولتاژ خازنی- دیودی (الف) نمونه ای چند طبقه (ب) مدار ساده شامل دو خازن

وقتی ورودی در اولین نیم سیکل مثبت باشد، دیود D_2 هدایت کرده و دیود D_1 خاموش می باشد. شکل ۲- الف مدار معادل در این وضعیت را نشان می دهد. مقاومت r نشان دهنده مجموع مقاومت داخلی منبع و اتصالات و هم چنین خازن ها می باشد. در این حالت با توجه به ورودی به شکل سینوسی و رابطه قانون ولتاژ می توان نوشت:

$$V_{in}(t) = V_m \sin \omega t \quad (1)$$

$$rC_{eq} \frac{dV_{Ceq}(t)}{dt} + V_{Ceq}(t) = V_m \sin \omega t \quad (2)$$

که در روابط فوق C_{eq} معادل دو خازن سری C_1 و C_2 است.

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (3)$$

و با فرض اینکه $C_1 = C_2$ باشد، ولتاژ هر کدام از خازن های C_1 و C_2 نصف ولتاژ به دست آمده برای خازن معادل خواهد بود. رابطه (۲) یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول است که دارای پاسخی به فرم زیر می باشد:

$$V_{Ceq}(t) = Ae^{-\frac{t}{rC_{eq}}} + B \cos \omega t + C \sin \omega t \quad (4)$$

در معادله فوق A ، B و C ثابت هایی هستند که قابل محاسبه می باشند. همانگونه که از پاسخ مشخص است، دارای دو بخش گذرا و پایدار می باشد. در اینجا برای بررسی کیفی پاسخ، با صرف نظر کردن از مقاومت و پاسخ گذرا، می توان گفت که ولتاژ خازن ها از ولتاژ ورودی پیروی کرده و خازن ها شارژ می شوند و ولتاژ آن ها افزایش پیدا می کند تا وقتی که به ولتاژ مجموع آن ها به حداکثر ولتاژ ورودی برسد. در این لحظه دیود خاموش شده و از دشارژ خازن ها جلوگیری می کند و ولتاژ خازن ها ثابت باقی می ماند. در این حالت می توان نوشت:

$$V_{ceq}(t) = V_m \quad (5)$$

$$V_{C1}(t) = V_{C2}(t) = \frac{1}{2} V_m \quad (6)$$

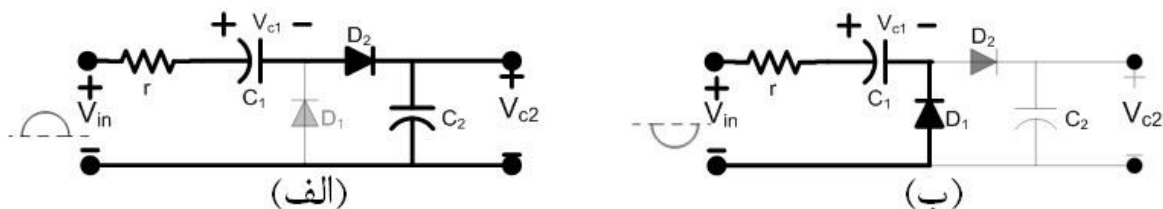
شکل ۲- ب وضعیت مدار را در نیم سیکل منفی ولتاژ ورودی نشان می دهد. با همان استدلال بالا می توان گفت که خازن C_2 ولتاژ ورودی را دنبال می کند تا وقتی که ولتاژ آن به $-V_m$ برسد و تا شروع نیم سیکل مثبت در این مقدار ثابت باقی می ماند. با شروع مجدد نیم سیکل مثبت، ولتاژ کاتد دیود D_2 برابر ولتاژ V_{C2} و ولتاژ آند آن برابر با $-V_{C1}(t) + V_m \sin \omega t$ خواهد بود. با افزایش ولتاژ ورودی، ولتاژ خازن های C_1 و C_2 نیز از این افزایش پیروی کرده و افزایش می یابند به شرط اینکه ولتاژ کاتد دیود از آند آن بیشتر نشود. لذا در پایان این سیکل باید:

$$V_m - V_{C1}(t) = V_{C2}(t) \quad (7)$$

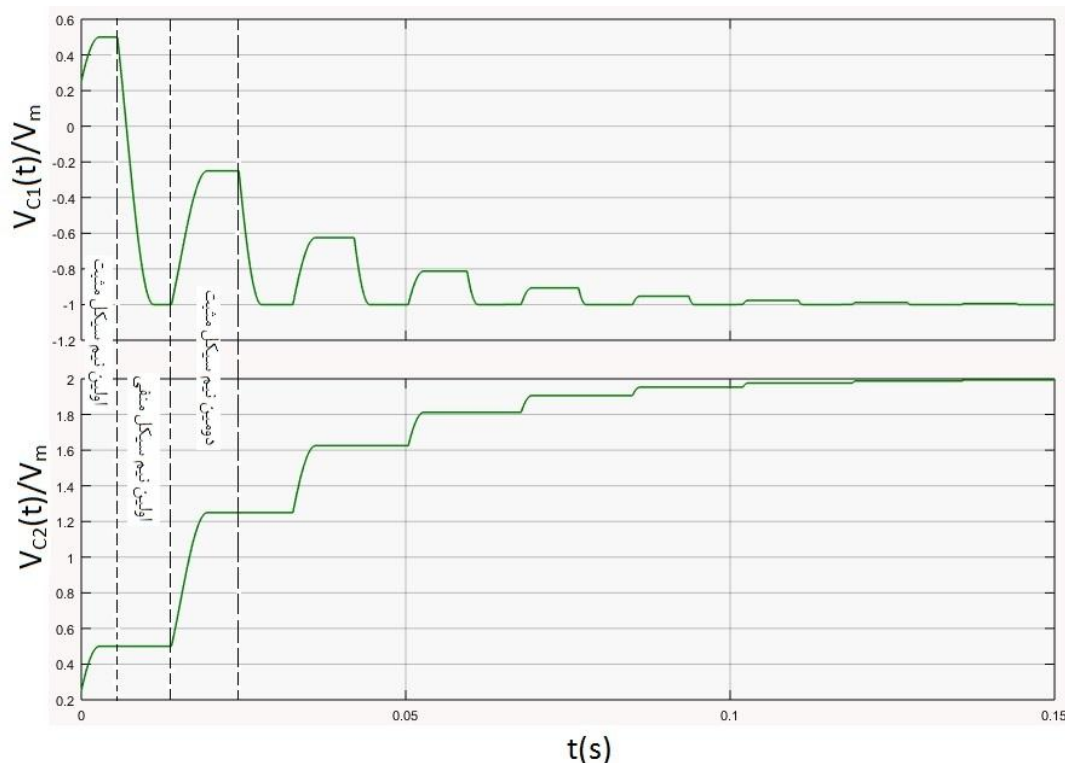
ولتاژ خازن های C_1 و C_2 هر کدام به اندازه $(3/4)V_m$ افزایش یافته اند و در این هنگام ولتاژ خازن C_1 برابر با $(-1/4)V_m$ و ولتاژ خازن C_2 برابر با $(5/4)V_m$ خواهد بود. مجدداً در نیم سیکل منفی خازن C_1 به اندازه $-V_m$ شارژ

شده و همین روند ادامه پیدا می کند تا ولتاژ خازن C_2 به مقدار دو برابر حداکثر دامنه ولتاژ ورودی یعنی $2V_m$ برسد. بعد از n امین نیم سیکل مثبت ورودی، ولتاژ خازن C_2 به صورت تقریبی (با صرف نظر از تلفات) از رابطه γ به دست می آید. شکل ۳ ولتاژ خازن های C_1 و C_2 را نشان می دهد.

$$V_{C_2}(t) = \frac{1}{2}V_m + \frac{3}{4}V_m + \frac{3}{8}V_m + \dots + \frac{3}{2^n}V_m \quad (7)$$



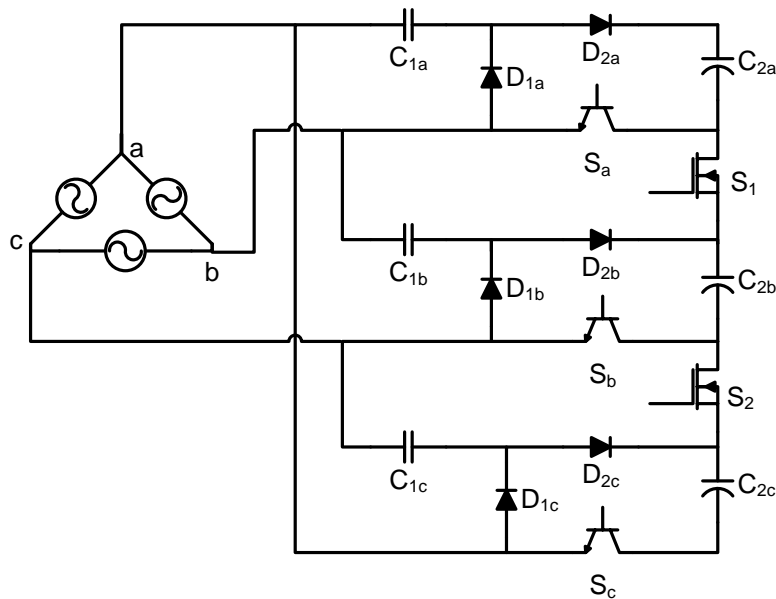
شکل ۲- وضعیت مدار (الف) در نیم سیکل مثبت (در نیم سیکل منفی)



شکل ۳- نرمالیزه شده ولتاژ خازن ها در مبدل خازنی-دیودی با ورودی سینوسی

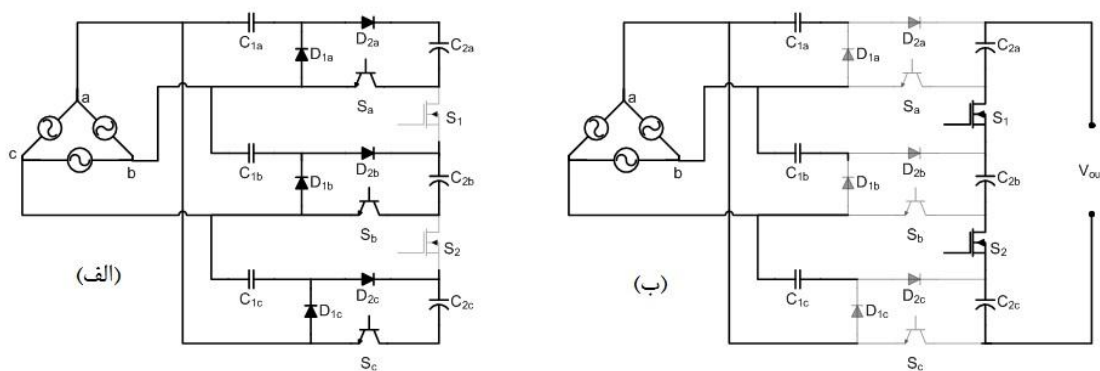
۳. مبدل پیشنهادی

توپولوژی پیشنهادی به این شکل است که بین هر دو فاز از سیستم تغذیه سه فاز یک مبدل CDVM قرار داده می شود. برای ایجاد پالس ولتاژ بالا نیز توسط توپولوژی مارکس خازن های خروجی به صورت سری با یکدیگر قرار گرفته و بار را تغذیه می کنند. شکل ۴ توپولوژی مبدل پیشنهادی را با مبدل های افزایشنده شامل دو دیود و دو خازن نشان می دهد. نتایج به دست آمده برای این مدار قابل گسترش دادن برای مبدل های افزایشنده با تعداد طبقات بیشتر هستند.



شکل ۴- توپولوژی پیشنهادی به صورت سه فاز

سوئیچ های S_a ، S_b و S_c در زمان شارژ شدن خازن ها روشن هستند و برای اعمال پالس در خروجی این سوئیچ ها خاموش و سوئیچ های S_1 ، S_2 و S_3 روشن می شوند. در هنگام وصل بودن سوئیچ های S_a ، S_b و S_c ، دیودهای مدار می توانند ۸ حالت مختلف را ایجاد کنند. در هر مدار افزاینده دیودها دو حالت دارند که در بالا شرح داده شد. شکل ۵ وضعیت سوئیچ ها در زمان شارژ خازن ها و یا در زمان اعمال پالس خروجی را نشان می دهد.



شکل ۵- توپولوژی پیشنهادی سه فاز (الف) مدار در زمان شارژ خازن ها (ب) مدار در زمان اعمال پالس

شارژ شدن خازن ها در این مبدل ها مانند توضیحات ارائه شده برای مبدل CDVM در بخش قبل می باشد در حالیکه چگونگی شارژ شدن و مقدار ولتاژ خازن ها در هر نیم سیکل مثبت بین دو فاز کاملاً وابسته زاویه فازها در هنگام وصل مبدل ها می باشد. به عنوان نمونه اگر در اولین لحظه، زاویه فاز ولتاژ V_{bc} برابر π باشد، در لحظه صفر مثبت از آن جا که ولتاژ ورودی مبدل متصل بین فازهای b و c برابر منفی حداکثر دامنه است، ولتاژ خازن C_{1b} نیز با صرف نظر از مقاومت ها برابر منفی حداکثر دامنه ولتاژ خط خواهد شد (دیود D_{1b} روشن شده و خازن C_{1b} با منبع موازی خواهد شد). با مثبت شدن ولتاژ فاز bc دیود D_{1b} خاموش است و دیود D_{2b} روشن می شود. ولتاژ خازن های C_{1b} و C_{2b} با ولتاژ خط bc شروع به افزایش می کند و دیود اجازه بیشتر شدن ولتاژ V_{C2b} از $V_{C1b} - V_L \cos \omega t$ را نمی دهد. که V_L حداکثر

دامنه ولتاژ خط است. به این ترتیب در پایان این نیم سیکل ولتاژ خازن C_{1b} برابر با صفر و ولتاژ خازن C_{2b} برابر با V_L است. در نیم سیکل منفی ولتاژ خط bc ، خازن C_{2b} نیز با ولتاژ منفی شارژ شده تا ولتاژ آن به $-V_L$ برسد و تا شروع نیم سیکل مثبت در این ولتاژ ثابت بماند. در نیم سیکل مثبت مجدداً ولتاژ خازن ها افزایش یافته و این روند ادامه پیدا می کند تا وقتی که ولتاژ خازن C_{2b} به دو برابر حداکثر ولتاژ خط برسد. ولتاژ این خازن در پایان هر نیم سیکل مثبت bc از رابطه زیر به دست می آید:

$$V_{Cb2}(t) = V_L + \frac{1}{2}V_L + \frac{1}{4}V_L + \dots + \frac{1}{2^n}V_L \quad (8)$$

با خاموش شدن سویچ های S_a ، S_b و S_c و روشن کردن سویچ های S_1 و S_2 ولتاژ خروجی از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$V_{out}(t) = V_{C2a}(t) + V_{C2b}(t) + V_{C2c}(t) \quad (9)$$

مقدار پیک ولتاژ برابر با $6V_L$ خواهد بود. بری بررسی عملکرد مدار شبیه سازی در محیط MATLAB/SIMULINK انجام شده است. مقادیر اجزا برای شبیه سازی در جدول ۱ آمده است. برای شبیه سازی بار، به صورت بار یک راکتور تولید کرنا در نظر گرفته شده است که ابتدا مقاومت بسیار بالایی دارد ولی با افزایش ولتاژ به بالاتر از ولتاژ تخلیه کرنا (یعنی در لحظه وصل شدن سویچ های S_1 و S_2)، بار را می توان به شکل ساده به صورت مقاومتی کوچک به موازات یک خازن کوچک در نظر گرفت [۱۴ و ۱۳]. ولتاژ خازن های V_{C1a} ، V_{C2b} و V_{C2c} در شکل ۶ نشان داده شده است و ولتاژ خروجی در لحظه اعمال پالس در شکل ۷ آورده شده است.

جدول ۱- مقادیر مورد استفاده در شبیه سازی

ظرفیت خازنی	مقاومت بار	C2	C1	فرکانس ورودی	V_{Lrms}
۱ نانو فاراد	۱۰۰ اهم	۱ میکروفاراد	۱ میکروفاراد	۵۰	۳۸۰

همانگونه که مشخص است ولتاژ خروجی هر مدار CDVM دو برابر حداکثر ولتاژ خط و ولتاژ پیک اعمالی به بار برابر مجموع سه مدار افزایش یافته یعنی شش برابر حداکثر ولتاژ خط می باشد. شکل پالس خروجی و ثابت زمانی آن نیز وابسته به بار و ظرفیت خازن های مبدل ها می باشد. اگر ظرفیت خازنی بار بسیار کوچک و قابل چشم پوشی بوده و مقاومت بار با R نشان داده شود، ثابت زمانی پالس خروجی بر حسب ثانیه از رابطه زیر به دست می آید:

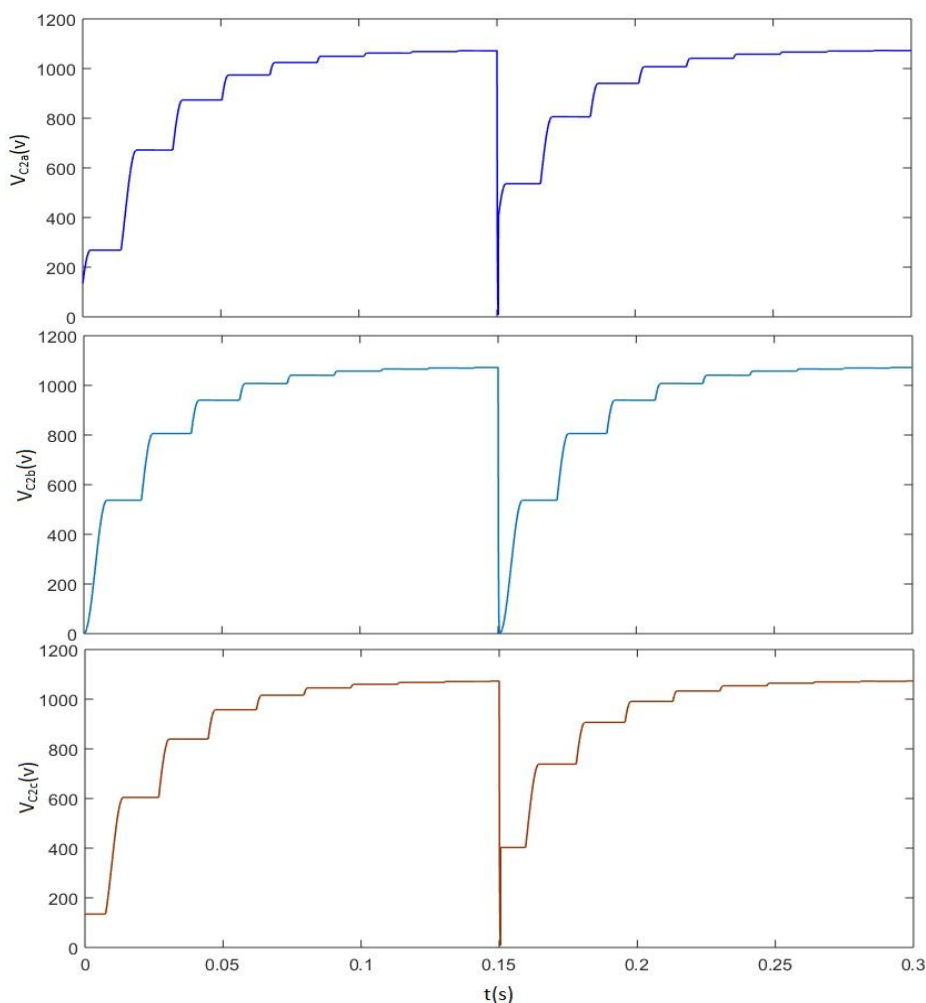
$$\tau = RC_{eq} = R \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (10)$$

در صورتیکه تا پنج درصد تلورانس حداکثر ولتاژ پیک خروجی قابل قبول باشد، حداکثر فرکانس توپولوژی معرفی شده ۱۵ هرتز می باشد. برای دست یابی به فرکانس های بالاتر می توان از توپولوژی شکل ۸ استفاده کرد. در این توپولوژی که ترکیبی از توپولوژی CDVM و مارکس می باشد، تعداد n عدد مبدل افزایش یافته خازنی-دیودی به اینورتر n فاز متصل گشته و برای اعمال پالس، خازن های خروجی مبدل ها با کمک توپولوژی مارکس با یکدیگر سری شده و بار را تغذیه می کنند. حداکثر فرکانس خروجی در این روش وابسته به تعداد فاز ها و فرکانس سویچینگ اینورتر می باشد. حداکثر ولتاژ پالس خروجی در این روش بر حسب ولت برابر است با:

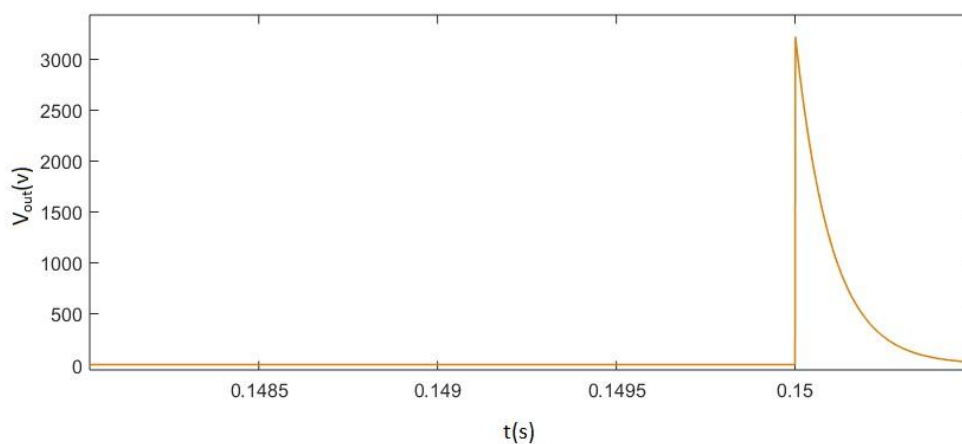
$$V_{out,m} = 2nV_{dc} \quad (11)$$

V_{dc} در رابطه فوق، ولتاژ لینک dc بر حسب ولت می باشد. ثابت زمانی پالس خروجی با صرف نظر از ظرفیت خازنی بار، بر حسب ثانیه از رابطه زیر به دست می آید:

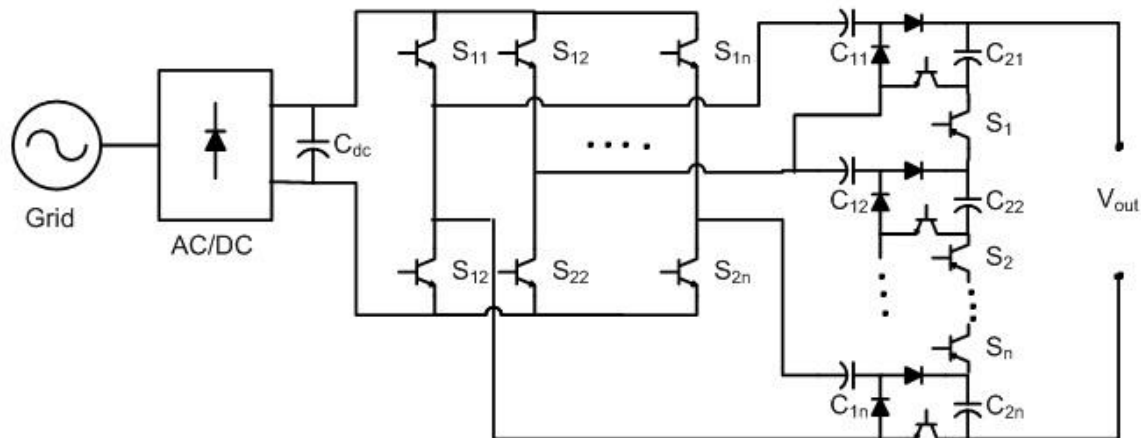
$$\tau = \left(\frac{1}{C_{2,1}} + \frac{1}{C_{2,2}} + \dots + \frac{1}{C_{2,n}} \right) R \quad (12)$$



شکل ۶- ولتاژ خازن های خروجی در مبدل های VDVM



شکل ۷- شکل موج پالس خروجی



شکل ۸- توپولوژی n فازه از ترکیب CDVM و مارکس

خازن های $C_{2,1}, C_{2,2}, \dots, C_{2,n}$ ، خازن های خروجی مبدل های CDVM در هر فاز می باشند. و در صورت تساوی این خازن ها:

$$\tau = \frac{C}{n} R \quad (13)$$

در این توپولوژی به دو شکل می توان ولتاژ خروجی را افزایش داد. یکی با اضافه کردن فاز در اینوتر چند فاز و به تبع آن اضافه کردن مبدل CDVM و دیگری با اضافه کردن طبقات مبدل های CDVM. رنج پایین سویچ های مورد استفاده، جمع و جور بودن، قیمت پایین و ماژولار بودن و قابلیت انعطاف در ولتاژ خروجی از مزیت های این توپولوژی پیشنهادی می باشد.

۴. نتیجه گیری

کاربردهای پالس قدرت نیاز به ولتاژ های بالا دارند که این ولتاژ ها باید از طریق ورودی های ولتاژ پایین تامین شوند. در این مقاله توپولوژی مبدلی ارائه گردید که عین سادگی بتواند از ولتاژ در دسترس سه فاز معمول، ولتاژ بزرگی ایجاد نماید. از ویژگی های این توپولوژی می توان به عدم نیاز به لینک dc یا مبدل های افزایشنده واسط اشاره کرد. با توجه به پایین بودن ولتاژ کلید ها می توان به راحتی از انواع سویچ های نیمه هادی قدرت در این توپولوژی بهره برد. با توجه به فرکانس پایین مبدل در صورت استفاده مستقیم از تغذیه سه فاز، توپولوژی بسط داده شد و با اضافه کردن یکسوساز و لینک dc می توان توپولوژی ارائه داد که علاوه بر قابلیت انعطاف بالا، فرکانس قابل قبولی نیز در خروجی بتوان از آن به دست آورد.

۵. مراجع

1.Jiang, W., Yatsui, K., Takayama, K., Akemoto, M., Nakamura, E., Shimizu, N. et al., (2004), "Compact solid-state switched pulsed power and its applications," Proceedings of the IEEE, 92, pp. 1180-1196.

2. Sakamoto, T., Nami, A., Akiyama, M., & Akiyama, H. (2012). A repetitive solid state Marx-type pulsed power generator using multistage switch-capacitor cells. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 40(10), 2316-2321.
3. Redondo, L. M. (2010). A DC Voltage-Multiplier Circuit Working as a High-Voltage Pulse Generator. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 38(10), 2725-2729.
4. Gaudreau, M. P., Hawkey, T., Petry, J., & Kempkes, M. A. (2001, June). A solid state pulsed power system for food processing. In *Pulsed Power Plasma Science, 2001. PPPS-2001. Digest of Technical Papers (Vol. 2, pp. 1174-1177)*. IEEE..
5. T. Adachi, T., Arai, T., Leo, K. W., Takayama, K., & Tokuchi, A. (2011). A solid-state Marx generator driven Einzel lens chopper. *Review of Scientific Instruments*, 82(8), 083305..
6. Biela, J., Aggeler, D., Bortis, D., & Kolar, J. W. (2012). Balancing circuit for a 5-Kv/50-Ns pulsed-power switch based on Sic-Jfet super cascode. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 40(10), 2554-2560.
7. Sakamoto, T., & Akiyama, H. (2013). Solid-State Dual Marx Generator With a Short Pulsewidth. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 41(10), 2649-2653.
8. Davari, P., Zare, F., Ghosh, A., & Akiyama, H. (2012). High-voltage modular power supply using parallel and series configurations of flyback converter for pulsed power applications. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 40(10), 2578-2587.
9. Raymond, L., Liang, W., Gu, L., & Davila, J. R. (2015, July). 13.56 MHz high voltage multi-level resonant DC-DC converter. In *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2015 IEEE 16th Workshop on (pp. 1-8)*. IEEE.
10. Young, C. M., Chen, M. H., Chang, T. A., Ko, C. C., & Jen, K. K. (2013). Cascade Cockcroft-Walton voltage multiplier applied to transformerless high step-up DC-DC converter. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 60(2), 523-537.
11. Rezanejad, M., Sheikholeslami, A., & Adabi, J. (2014). Modular switched capacitor voltage multiplier topology for pulsed power supply. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 21(2), 635-643.
12. Rezanejad, M., Sheikholeslami, A., Adabi, J., & Valinejad, M. (2015). High-voltage portable pulsed power supply fed by low voltage source. *International Journal of Electronics*, 1-10.
13. Zabihi, S., Zare, F., Ledwich, G., Ghosh, A., & Akiyama, H. (2010). A Novel High-Voltage Pulsed-Power Supply Based on Low-Voltage Switch-Capacitor Units. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 38(10), 2877-2887.
14. Pipa, A. V., Koskulics, J., Brandenburg, R., & Hoder, T. (2012). The simplest equivalent circuit of a pulsed dielectric barrier discharge and the determination of the gas gap charge transfer. *Review of Scientific Instruments*, 83(11), 115112.