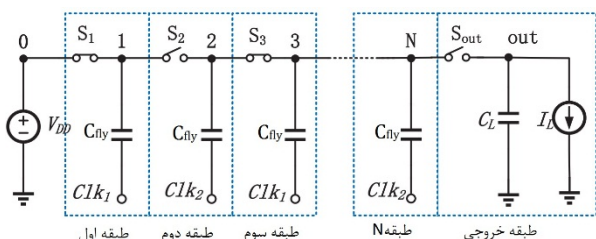


طراحی یک مبدل ولتاژ DC-DC خازنی تمام مجتمع ولتاژ پایین و پربازده به منظور برداشت انرژی محیطی

علیرضا حسنزاده و فرشید علیرضایی



شکل ۱: ساختار کلید خازنی یک مدار پمپ بار.

ساختار کلید خازنی مبدل برای کلیدزنی ترانزیستورها و انتقال بار الکتریکی، ولتاژ ورودی باید بر ولتاژ آستانه ترانزیستورها غلبه کند. از این رو در طراحی مبدل از روش‌هایی مانند بایاس بدنه استاتیک (SBB) و استفاده از ترانزیستورهای LVT (ولتاژ آستانه پایین) و طراحی نوسان‌ساز حلقه‌ای کنترل‌شونده (RVCO) ولتاژ پایین، ولتاژ ورودی مبدل تا حد امکان کاهش یافته است.

در بخش دوم به توضیح اصول کلی عملکرد افزایشده‌های ولتاژ کلید خازنی پرداخته و در بخش سوم ساختار مبدل‌های ولتاژ DC-DC شرح داده می‌شود. در بخش چهارم بلوک چندبرابرکننده مورد استفاده در مبدل معرفی می‌گردد و در بخش پنجم تکنیک بایاس بدنه و روش پیاده‌سازی آن در ساختار مبدل شرح داده می‌شود. در بخش ششم به نوسان‌سازهای حلقه‌ای به عنوان بخش اصلی تولید کلاک مورد نیاز ساختار کلید خازنی پرداخته و در بخش هفتم سیستم کنترل ولتاژ خروجی مبدل معرفی می‌شود. در بخش آخر نتیجه‌گیری و مقایسه این طرح با سایر کارهای منتشرشده در زمینه مبدل‌های ولتاژ DC-DC خازنی مجتمع ولتاژ پایین ارائه شده است.

۲- اصول کلی عملکرد مبدل ولتاژ کلید خازنی

یک مبدل ولتاژ DC-DC کلید خازنی تنها از کلیدها و خازن‌ها برای انتقال بار الکتریکی بین ورودی و خروجی استفاده می‌کند. در این مبدل‌ها دو نوع خازن وجود دارد: خازن فلائی^۱ و خازن بافر خروجی^[۲]. مطابق شکل ۱ وظیفه خازن فلائی انتقال بار الکتریکی از یک خازن به دیگری در هر فاز و هم‌زمان افزایش سطح ولتاژ خازن‌ها در هر طبقه است. وظیفه خازن بافر انباشت بار الکتریکی در خروجی و پمپاژ آن به بار خروجی است. به همین دلیل به این نوع مدار پمپ بار یا Charge pump نیز می‌گویند. انتقال بار الکتریکی از یک خازن فلائی به خازن بعدی به دلیل تفاوت پتانسیل الکتریکی گره خازن‌های متصل‌شده، پس از هر بار تغییر وضعیت کلیدها روی می‌دهد. این نوع انتقال بار الکتریکی ذاتاً دارای تلفات خواهد بود زیرا با اتصال کوتاه دو خازن با پتانسیل الکتریکی متفاوت بخشی از انرژی خازن‌ها در مدار پراکنده و تلف خواهد شد^[۲]. از کلیدها به منظور

چکیده: در این مقاله طراحی، شبیه‌سازی و تحلیل یک مدار مبدل ولتاژ DC-DC افزایشده خازنی مجتمع ولتاژ پایین ارائه شده است. از این مدار می‌توان برای افزایش سطح ولتاژ مولدهای الکتریکی مینیاتوری که ولتاژ پایینی دارند، مانند ژنراتورهای ترموالکتریک، سلول‌های خورشیدی و پیزوالکتریک کوچک استفاده نمود. این مبدل کاملاً مجتمع و بی‌نیاز از عناصر خارجی بوده و قابلیت کارکرد با ولتاژهای بسیار پایین ورودی در حد ۲۰۰ میلی‌ولت را داراست و ولتاژ خروجی را به ۱ ولت می‌رساند. برای دسترسی به ولتاژهای پایین ورودی، از تکنیک بایاس بدنه با ساختار خاصی به منظور کاهش حداقل ولتاژ ورودی استفاده شده است. چگالی توان خروجی مبدل ۵۰ میکرووات بر میلی‌متر مربع می‌باشد. در ساختار این مبدل از یک چندبرابرکننده زوج متقابل ۵ طبقه با بازده ۷۶٪ استفاده شده و همچنین حداکثر بازده کلی مبدل به ازای جریان بار ۶ میکروآمپر به ۵۲٪ می‌رسد. مبدل در تکنولوژی ۹۰ نانومتر و با مساحت تراشه تقریبی ۰/۲ میلی‌متر مربع طراحی شده است.

کلیدواژه: مبدل ولتاژ DC-DC، مدار مجتمع، برداشت انرژی محیطی، ولتاژ پایین، توان پایین.

۱- مقدمه

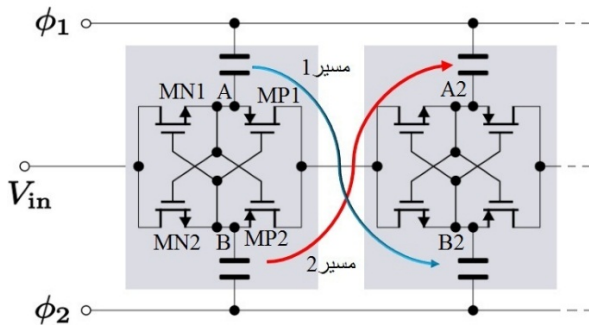
در برخی از سیستم‌های الکترونیکی مانند مدارها و سنسورهای بی‌سیم، دستگاه‌های قابل حمل، ابزارهای الکترونیکی پوشیدنی، ایمپلنت‌های پزشکی و سیستم‌های ردیابی حیوانات تعویض باتری سیستم ممکن است دشوار یا غیر ممکن باشد. به همین دلیل استفاده از انرژی به دست آمده از محیط می‌تواند در توسعه این سیستم‌ها بسیار مؤثر باشد. از طرفی مولدهای الکتریکی مقیاس کوچک که این انرژی محیطی را استحصال می‌کنند مانند ژنراتورهای ترموالکتریک مینیاتوری، سلول‌های خورشیدی و پیزوالکتریک کوچک، غالباً ولتاژ خروجی پایینی دارند و سطح ولتاژ کافی برای تأمین ولتاژ تغذیه مورد نیاز سیستم‌های الکترونیکی را ندارند^[۱]. از این رو به مبدل‌های ولتاژ DC-DC مجتمع و ولتاژ پایین با بازده بالا به منظور افزایش ولتاژ مولدهای الکتریکی کوچک نیاز می‌باشد.

در این مقاله یک مبدل ولتاژ DC-DC کلید خازنی تمام مجتمع و افزایشده ولتاژ در محدوده ولتاژهای بسیار پایین با بازده بالا ارائه شده است. با توجه به ولتاژ پایین مولدهای الکتریکی مینیاتوری، در طراحی این مبدل با استفاده از تکنیک‌های مختلف ولتاژ ورودی تا حد زیادی کاهش داده شده و به ۲۰۰ میلی‌ولت رسیده است. محدودیت اصلی در کاهش ولتاژ ورودی مبدل مربوط به ولتاژ آستانه (Vth) ترانزیستورها است^[۲]. در

این مقاله در تاریخ ۲۹ فروردین ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۲۳ دی ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد.

علیرضا حسنزاده (نویسنده مسئول)، دانشکده برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (email: a_hassanzadeh@sbu.ac.ir).

فرشید علیرضایی، دانشکده برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، (email: f.alirezai@mail.sbu.ac.ir).



شکل ۳: ساختار چندبرابرکننده زوج متقابل و مسیرهای انتقال بار الکتریکی در آن [۳].

همین ترتیب سطح ولتاژ در هر طبقه افزایش یافته و در نهایت ولتاژ خروجی ساختار زوج متقابل N طبقه در حالت ایده‌آل و بدون بار خروجی از (۱) قابل محاسبه است [۴]

$$V_{OUT} = (N + 1)V_{IN} \quad (1)$$

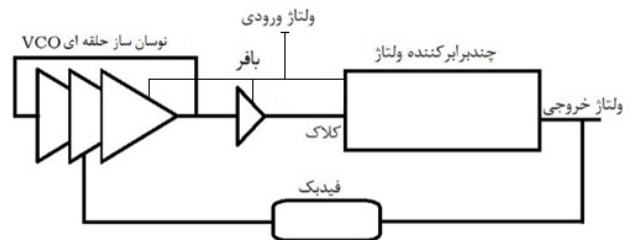
با توجه به غیر ایده‌آل بودن کلیدها و خازن‌ها، ولتاژ خروجی در حالت واقعی کمتر از این مقدار خواهد بود. در مبدل طراحی شده در این مقاله از چندبرابرکننده زوج متقابل ۵ طبقه استفاده شده که در مدار آن از تکنیک بایاس بدنه استفاده شده است.

۵- تکنیک بایاس بدنه ترانزیستور

در طراحی مدارهای الکترونیکی ترمنال‌های گیت، سورس و درین ترانزیستور بیشترین اهمیت را دارند. با این وجود دستکاری ترمنال بدنه ترانزیستور تأثیر بسزایی بر عملکرد ترانزیستور دارد. اختلاف ولتاژ بدنه نسبت به ولتاژ سورس بر ولتاژ آستانه (V_{th}) ترانزیستور تأثیرگذار است. ولتاژ آستانه یکی از اساسی‌ترین پارامترهای ترانزیستور در طراحی مدارهای آنالوگ و دیجیتال است. به دستکاری ولتاژ بدنه ترانزیستور به منظور بهبود عملکرد ترانزیستور تکنیک بایاس بدنه می‌گویند [۲]. تکنیک بایاس بدنه به دو روش استاتیک و دینامیک باعث بهبود عملکرد مدار می‌گردد. بایاس بدنه استاتیک (SBB) به معنی بایاس بدنه با ولتاژ ثابت از پیش تعیین شده است. بایاس بدنه دینامیک یا تطبیقی (ABB) عملکرد ترانزیستور را زیر نظر دارد و در صورت لزوم مداخله کرده و ولتاژ بدنه را به طور مستمر تغییر می‌دهد [۲]. تأثیر ولتاژ بایاس بدنه بر ولتاژ آستانه ترانزیستور طبق (۲) بیان می‌شود [۵]

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma(\sqrt{2\phi_f + V_{sb}} - \sqrt{2\phi_f}) \quad (2)$$

با توجه به (۲) بایاس مستقیم بدنه با کاهش ولتاژ آستانه سرعت عملکرد ترانزیستور را بهبود می‌دهد و حداقل ولتاژ مورد نیاز کلید ترانزیستور را کاهش می‌دهد اما بر جریان نشتی و توان تلفاتی تأثیر نامطلوب دارد. از طرفی بایاس معکوس بدنه قادر است جریان نشتی ترانزیستور را از طریق افزایش ولتاژ آستانه، کاهش دهد ولی سرعت ترانزیستور را کاهش داده و حداقل ولتاژ مورد نیاز کلید ترانزیستور را افزایش می‌دهد [۲]. با این راهبرد می‌توان همواره عملکرد ترانزیستور را با توجه به شرایط و الزامات سیستم بهینه نمود. بنابراین در طراحی مبدل ولتاژ DC-DC خازنی مورد استفاده در مولدهای الکتریکی ولتاژ پایین از آنجایی که اولویت اصلی به حداقل رساندن ولتاژ ورودی مبدل است، می‌توان با استفاده از تکنیک بایاس بدنه حداقل ولتاژ مورد نیاز برای کارکرد مبدل را کاهش داد. البته این امر به قیمت افزایش جریان نشتی و توان تلفاتی و کاهش بازده خواهد بود. در واقع همواره باید مصالحه‌ای بین حداقل ولتاژ ورودی مبدل



شکل ۲: بلوک دیاگرام کلی مبدل ولتاژ طراحی شده.

کنترل جهت جریان الکتریکی استفاده می‌شود و با ترانزیستورهای ماسفت قابل پیاده‌سازی است.

۳- ساختار مبدل ولتاژ DC-DC

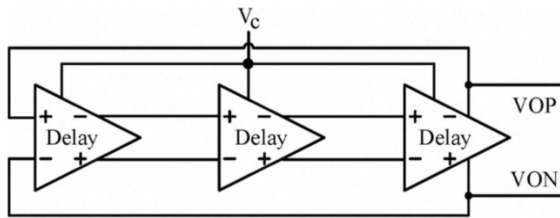
ساختارهای مختلفی برای تحقق یک مبدل ولتاژ DC-DC خازنی ارائه می‌شوند که هر کدام از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند اما بخش‌های مشترکی در همه این ساختارها وجود دارد. همواره در ساختار یک مبدل ولتاژ DC-DC خازنی یک مدار چندبرابرکننده از نوع پمپ بار به عنوان بخش اصلی مبدل و افزایش‌دهنده ولتاژ وجود دارد. همچنین بخش تولید پالس برای ساختار کلید خازنی چندبرابرکننده ضروری است. مبدل‌های ولتاژ نیاز به سیستمی برای کنترل ولتاژ خروجی و ثابت نگه داشتن آن در برابر تغییر شرایط بیرونی مانند تغییر بار دارند [۲]. بلوک دیاگرام کلی مبدل ولتاژ طراحی شده در این گزارش در شکل ۲ نشان داده شده است.

در ساختار این مبدل از بلوک‌های نوسان‌ساز، چندبرابرکننده، بافر و مدار فیدبک در یک حلقه بسته استفاده شده است. نوسان‌ساز حلقه‌ای کنترل‌شونده با ولتاژ سیگنال‌های نوسانی مورد نیاز را ایجاد می‌کند و بلوک بافر این سیگنال نوسانی را به پالس مربعی با قابلیت جریان‌دهی بیشتر تبدیل می‌کند که به آن راه‌انداز کلاد نیز می‌گویند. بلوک چندبرابرکننده با ساختار کلید خازنی خود سطح ولتاژ ورودی را افزایش می‌دهد و در نهایت بلوک فیدبک به کنترل مبدل و حفظ سطح ولتاژ خروجی از طریق تغییر فرکانس نوسان‌ساز می‌پردازد.

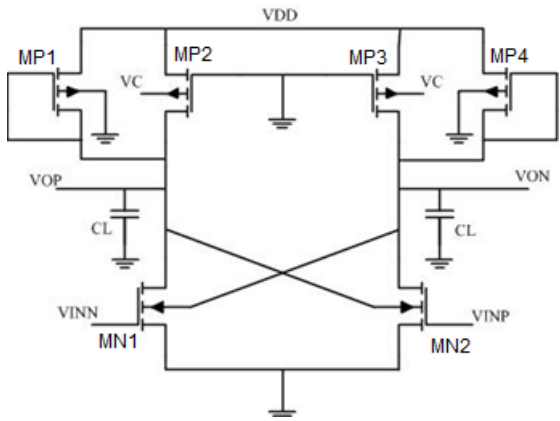
۴- چندبرابرکننده ولتاژ

چندبرابرکننده ولتاژ به عنوان بخش اصلی مبدل ولتاژ DC-DC مداری الکترونیکی است که سطح ولتاژ ورودی را به سطح ولتاژی بالاتر در خروجی تبدیل می‌کند. مدار چندبرابرکننده‌های ولتاژ کلید خازنی به عنوان یک سیستم ساختار متغیر شناخته می‌شوند. عملیات چنین سیستمی توسط تغییر مکرر در ساختار مدار انجام می‌شود [۲]. چندبرابرکننده‌های ولتاژ ساختارهای مختلفی دارند. یکی از پرکاربردترین ساختارها در مبدل‌های DC-DC کلید خازنی ساختار زوج متقابل^۱ می‌باشد که این ساختار با دو طبقه در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۳ از آنجایی که پالس‌های ϕ_1 و ϕ_2 قرینه‌اند و ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند، در یک نیم‌سیکل تنها ترانزیستورهای MP۱ و MN۲ بلوک‌ها روشن بوده و بار الکتریکی از مسیر ۱ بین خازن‌ها منتقل می‌شود. در نیم‌سیکل بعد تنها ترانزیستورهای MP۲ و MN۱ بلوک‌ها روشن بوده و بار الکتریکی از مسیر ۲ منتقل می‌شود [۳]. در ساختار زوج متقابل در صورتی که دامنه پالس‌های ϕ_1 و ϕ_2 بین صفر و V_{IN} باشد پس از شارژ اولیه خازن‌ها دامنه ولتاژ گره‌های A و B در طبقه اول بین $2V_{IN}$ و V_{IN} و در طبقه بعد بین $2V_{IN}$ و $3V_{IN}$ نوسان می‌کند و به



شکل ۵: ساختار نوسان‌ساز حلقه‌ای کنترل‌شونده با ولتاژ سه طبقه تفاضلی.



شکل ۶: مدار بلوک تأخیر تفاضلی نوسان‌ساز ولتاژ پایین.

جدول ۲: مقادیر و ابعاد المان‌های نوسان‌ساز حلقه‌ای.

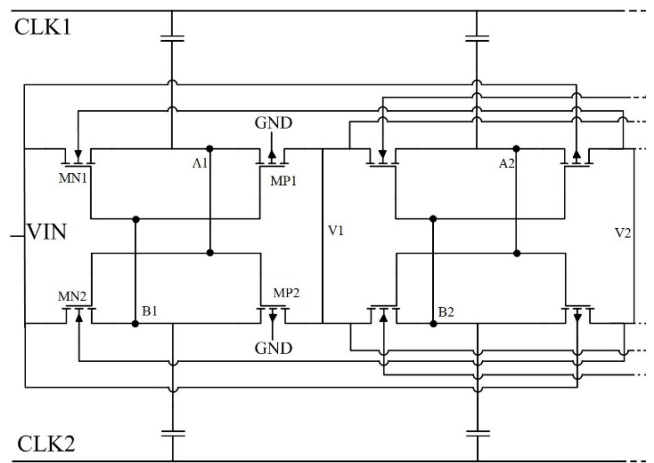
	MN1, MN2	MP1, MP4	MP2, MP3
W (nm)	۱۸۰	۱۸۰	۱۲۰
L (nm)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
CL (fF)		۳۴	
VDD (mV)		۲۰۰	

[۲]. در بسیاری از مبدل‌های DC-DC کلید خازنی که از تکنیک مدولاسیون فرکانس پالس (PFM) برای کنترل ولتاژ خروجی استفاده می‌شود، وجود نوسان‌ساز کنترل‌شونده با ولتاژ در این مبدل‌ها ضروری است. در شکل ۵ ساختار نوسان‌ساز حلقه‌ای کنترل‌شونده با ولتاژ مورد استفاده نشان داده شده است. تعداد طبقات نوسان‌ساز حلقه‌ای با توجه به الزامات سیستم مانند سرعت، توان تلفاتی و نویز مجاز آن تعیین می‌شود. در بیشتر کاربردها سه تا پنج طبقه در حالت تفاضلی عملکرد بهینه را فراهم می‌کند [۶]. در این ساختار از سه طبقه تقویت‌کننده تفاضلی سورس مشترک به عنوان بلوک تأخیر نوسان‌ساز حلقه‌ای استفاده شده است.

با توجه به ولتاژ ورودی پایین مبدل ساختار بلوک تأخیر به صورت ولتاژ پایین به وسیله بایاس مستقیم بدنه ترانزیستورهای NMOS و تعداد کم پشته‌کردن ترانزیستورها طراحی گردیده که در شکل ۶ آمده است. مقادیر و ابعاد المان‌های نوسان‌ساز در جدول ۲ نشان داده شده است. فرکانس نوسان این نوسان‌ساز از (۳) قابل محاسبه است [۷]

$$f_{osc} \approx \frac{1}{2NC_L R_L} \quad (3)$$

در این رابطه N تعداد طبقات و R_L و C_L مقاومت و خازن معادل بار هستند. ولتاژ کنترلی V_C با تغییر ولتاژ بدنه ترانزیستور PMOS که در ناحیه تریاود قرار دارد، باعث تغییر ولتاژ آستانه و تغییر مقاومت معادل بار می‌شود که در نتیجه فرکانس نوسان تغییر می‌کند. ترانزیستور اتصال دیودی موازی بار با افزایش ولتاژ بار روشن شده و با عبور جریان به حفظ



شکل ۴: نحوه پیاده‌سازی تکنیک بایاس بدنه در ساختار چندبرابرکننده زوج متقابل.

جدول ۱: مقادیر و ابعاد المان‌های مبدل.

	MNx	MPy
W (μm)	۱۷	۴۶
L (nm)	۱۰۰	۱۰۰
C _{fb} (pF)		۳۶
C _L (pF)		۳۰

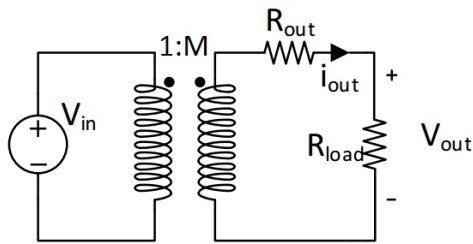
و بازده آن برقرار کرد. در شکل ۴ نحوه پیاده‌سازی این تکنیک در ساختار چندبرابرکننده زوج متقابل در مبدل طراحی شده در این کار نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بدنه ترانزیستورهای NMOS به سطح ولتاژ بالاتر از ولتاژ سورس خود در گره خروجی طبقه بعدی متصل شده‌اند و بدنه ترانزیستورهای PMOS به سطح ولتاژ پایین‌تر از ولتاژ سورس خود در گره ورودی طبقه قبلی متصل شده‌اند. این ساختار ویژه با توجه به (۲) ولتاژ آستانه ترانزیستورها را کاهش می‌دهد و مدار در ولتاژهای پایین‌تری قابلیت کارکرد می‌یابد. البته برای پیاده‌سازی تکنیک بایاس بدنه بر روی تراشه نیاز به جداسازی بدنه ترانزیستورهای NMOS با استفاده از تکنولوژی چاه سه‌گانه^۱ و یا SOI وجود دارد تا با ایزوله کردن ترانزیستورها بتوان بدنه ترانزیستورها را با ولتاژهای متفاوتی بایاس کرد [۳]. همچنین برای میزان ولتاژ بایاس مستقیم بدنه محدودیت وجود دارد و نباید از ولتاژ سد پیوندهای pn موجود در ساختار ترانزیستور بیشتر باشد. زیرا منجر به بایاس مستقیم پیوند pn و وقوع پدیده قفل‌شدگی شده و عملکرد مدار را مختل می‌کند. این حد ولتاژ بایاس بدنه در تکنولوژی ۹۰ نانومتر حداکثر ۰٫۶ ولت است [۵].

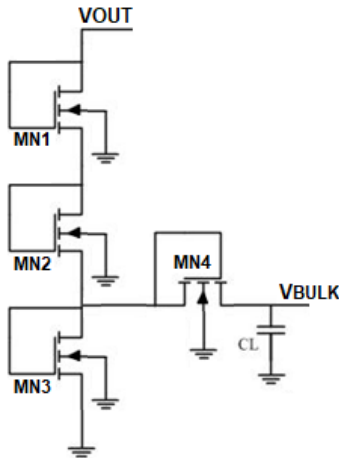
در این طرح میزان ولتاژ بایاس مستقیم بدنه ترانزیستورها ۳۲۰ میلی‌ولت است که منجر به کاهش ۴۰ میلی‌ولتی ولتاژ آستانه ترانزیستورها شده است. مقادیر و ابعاد المان‌های مبدل در جدول ۱ آمده است.

۶- نوسان‌ساز حلقه‌ای کنترل‌شونده با ولتاژ

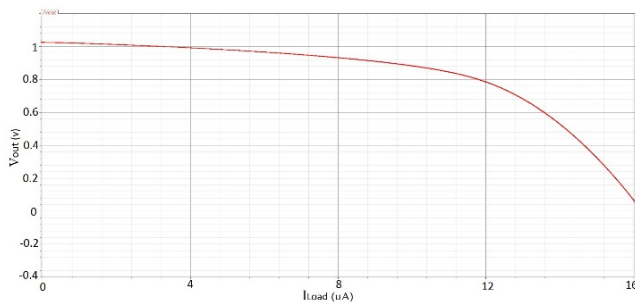
نوسان‌سازها یکی از بخش‌های اساسی در ساختار مبدل‌های DC-DC کلید خازنی هستند. از نوسان‌سازها برای تولید پالس مورد نیاز برای کلیدزنی ترانزیستورها استفاده می‌شود. در مبدل‌های مجتمع عمدتاً نوسان‌سازهای حلقه‌ای به دلیل عدم نیاز به سلف ترجیح داده می‌شوند



شکل ۹: مدل‌سازی مبدل ولتاژ با یک ترانسفورمر DC و مقاومت خروجی [۹].



شکل ۱۰: مدار فیدبک مورد استفاده در مبدل.

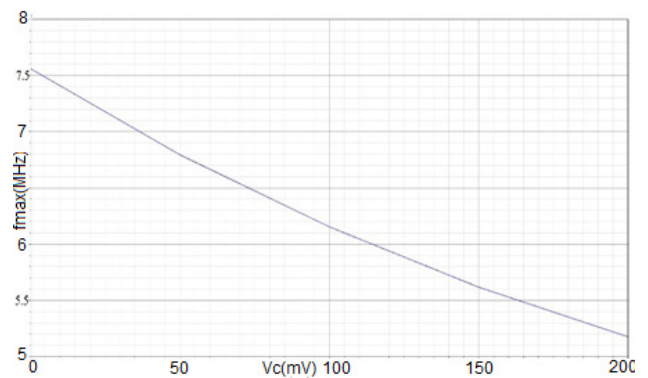


شکل ۱۱: منحنی تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب جریان بار.

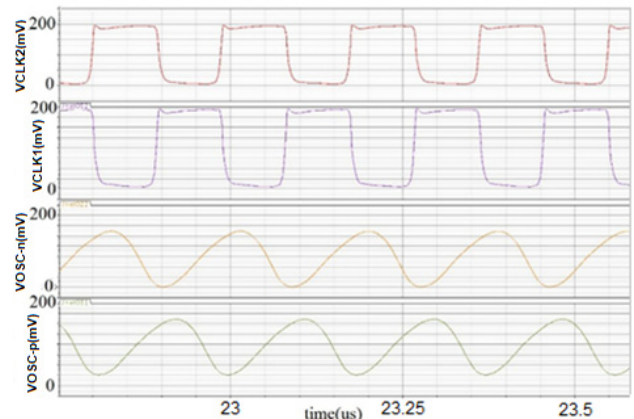
نمونه‌برداری از ولتاژ خروجی مبدل، فرکانس نوسان، نوسان‌ساز حلقه‌ای کنترل‌شونده با ولتاژ را متناسب با ولتاژ خروجی تغییر می‌دهد تا از طریق فیدبک منفی مانع از تغییر سطح ولتاژ خروجی شده و آن را در مقدار مشخص نگه دارد. مدار مورد استفاده برای نمونه‌برداری از ولتاژ خروجی یک تقسیم‌کننده ولتاژ است که توسط سری کردن ترانزیستورهای دیودی ایجاد شده است. این ولتاژ پس از فیلتر شدن به ولتاژ کنترل نوسان‌ساز اعمال می‌گردد. شکل ۱۰ مدار مورد استفاده را نشان می‌دهد. مهم‌ترین عامل خارجی که بر ولتاژ خروجی مبدل تأثیر می‌گذارد تغییرات بار است و سیستم کنترل مبدل وظیفه تنظیم بار مبدل را به عهده دارد [۲]. برای بررسی تنظیم بار مبدل منحنی تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب جریان بار خروجی در شکل ۱۱ رسم شده است.

با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که ولتاژ خروجی مبدل تا جریان بار ۱۰ میکروآمپر در محدوده ۱ ولت تا ۹۰۰ میلی‌ولت قرار دارد و مبدل عملکرد مناسبی دارد، ولی برای جریان‌های خروجی بیشتر دچار افت می‌شود. با استفاده بهینه از تکنیک مدولاسیون فرکانس پالس (PFM) می‌توان در توان‌های پایین با کاهش دادن فرکانس، تلفات کلیدزنی را کاهش و بازده مبدل را تا حد زیادی بهبود داد.

به طور کلی دو نوع تلفات توان در مبدل‌های ولتاژ کلید خازنی وجود دارد: (۱) تلفات کلیدزنی که به دلیل شارژ و دشارژ خازن گیت ترانزیستورها



شکل ۷: منحنی تغییر فرکانس نوسان نوسان‌ساز حلقه‌ای با تغییر ولتاژ کنترلی V_c .



شکل ۸: شکل موج‌های خروجی نوسان‌ساز و خروجی بافر.

رابطه خطی منحنی I-V بار کمک می‌کند [۷]. منحنی تغییر فرکانس نوسان با تغییر ولتاژ کنترلی در شکل ۷ نشان داده شده است. خروجی این نوسان‌ساز تفاضلی دو موج شبه‌سینوسی با اختلاف فاز ۱۸۰ درجه است که در بلوک بافر یا راه‌انداز کلاک تبدیل به دو پالس مربعی (کلاک) می‌شود. در شکل ۸ شکل موج‌های خروجی نوسان‌ساز و خروجی بافر نشان داده شده است.

ساختار مدار بافر از چند معکوس‌کننده با گین بالا تشکیل شده است. در واقع نسبت W/L ترانزیستورهای معکوس‌کننده بسیار بزرگ بوده و باعث به اشباع رفتن خروجی مدار شده و کلاک مربعی ایجاد می‌شود.

۷- سیستم کنترل مبدل

یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در طراحی مبدل ولتاژ DC-DC اطمینان از داشتن ولتاژ خروجی قابل پیش‌بینی و پاسخ مناسب مبدل به آشفتگی‌ها و تغییرات عوامل بیرونی است [۲]. بدین منظور طراحی یک سیستم کنترل ولتاژ خروجی مبدل ضروری می‌باشد. در مبدل‌های ولتاژ DC-DC خازنی، نسبت تبدیل ولتاژ مبدل بر اساس توپولوژی و نحوه اتصال خازن‌ها در ساختار مبدل تعیین می‌شود. در حالی که امپدانس خروجی مبدل تنها به توپولوژی بستگی ندارد، بلکه به فرکانس کلیدزنی، ظرفیت خازن‌های فلای، مقاومت حالت روشن کلیدها و چرخه وظیفه کلاک وابسته است [۸]. با توجه به ماهیت مبدل‌های ولتاژ DC-DC خازنی و مدل‌سازی آن با یک ترانسفورمر DC و مقاومت خروجی طبق شکل ۹ می‌توان سطح ولتاژ خروجی را از طریق تغییر امپدانس خروجی مبدل کنترل کرد [۹].

با توجه به وابستگی امپدانس خروجی مبدل به فرکانس می‌توان از تکنیک مدولاسیون فرکانس پالس (PFM) برای تغییر امپدانس خروجی و کنترل ولتاژ خروجی مبدل استفاده کرد. پیاده‌سازی این تکنیک با توجه به بلوک دیاگرام مبدل در شکل ۲ بدین صورت است که بلوک فیدبک با

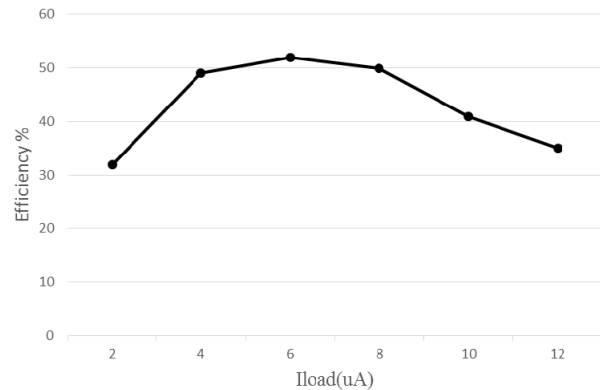
جدول ۳: مقایسه کارهای پیشین مبدل‌های ولتاژ DC-DC خازنی مجتمع ولتاژ پایین با این کار.

این کار	[۱۴]	[۱۳]	[۱۲]	[۱۱]	
فرایند ساخت CMOS (nm)	۳۵۰	۳۵۰	۶۵	۱۳۰	۹۰
مساحت تراشه (mm ^۲)	۳٫۱۲	۳	-	۰٫۴۲	۰٫۲
ولتاژ ورودی (mV)	۱۰۰۰	۷۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰
ولتاژ خروجی (V)	۱٫۸	۱٫۵	۱	۱٫۴	۱
حداکثر بازده (%)	۴۸	۵۸	۵۱	۵۵	۵۲
حداکثر توان خروجی (μW)	۵۱۰	۳	۱۰	۷	۱۰
چگالی توان (μW/mm ^۲)	۱۶۰	۱	-	۱۷	۵۰

جدیدتر مبدل‌های DC-DC [۱۵] و [۱۶] به دلیل عدم استفاده از مدار فیدبک برای پایداری ولتاژ خروجی مورد مقایسه قرار نگرفته‌اند. در جدول ۳ مشخصات مبدل طراحی شده در این کار با سایر کارهای منتشرشده در زمینه مبدل‌های ولتاژ DC-DC خازنی مجتمع ولتاژ پایین مقایسه گردیده است. کمترین ولتاژ ورودی نسبت به کارهای مجتمع قبلی حداقل ۳۳٪ بهبود یافته و دارای چگالی توان مناسب می‌باشد.

مراجع

- [1] A. Richelli, S. Comensoli, and Z. M. Kovacs-Vajna, "A DC/DC boosting technique and power management for ultralow-voltage energy harvesting applications," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 59, no. 6, pp. 2701-2708, Jun. 2012.
- [2] T. Bresselegem and M. Steyaert, *CMOS Integrated Capacitive DC-DC Converters, Analog Circuits, and Signal Processing*, Springer, 2013.
- [3] G. Campardo, R. Micheloni, and D. Novosel, *VLSI-Design of Non-Volatile Memories*, Springer, p. 377, 2005.
- [4] L. Tianwang, J. Jinguang, Y. Bo, and H. Xingcheng, "Ultra low voltage wide tuning range voltage controlled ring oscillator," *ASIC (ASICON)*, 2011.
- [5] A. Hokazono and S. Balasubramanian, "Forward body biasing as a bulk-Si CMOS technology scaling strategy," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 55, no. 10, pp. 2657-2664, Oct. 2008.
- [6] B. Razavi, *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*, New York, McGraw-Hill, 2002.
- [7] T. Cao, D. Wisland, T. Lande, and F. Moradi, "Low-voltage, low-power, and wide-tuning-range ring-VCO for frequency sigma-delta modulator," in *Proc. NORCHIP*, pp. 79-84, Tallinn, Estonia, 16-17 Nov. 2008.
- [8] G. Villar-Pique, H. J. Bergveld, and E. Alarc, "Survey and benchmark of fully integrated switching power converters: switched-capacitor," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 28, no. 9, pp. 4156-4167, Sept. 2013.
- [9] S. Sathe and J. Seo, "Analysis and optimization of CMOS switched-capacitor converters," in *Proc. IEEE Symp. on Low Power Electronics and Design*, pp. 327-332, Rome, Italy, 22-24 Jul. 2015.
- [10] G. Pillonnet, A. Andrieu, and E. Alon, "Dual-input switched capacitor converter suitable for wide voltage gain range," *IEEE J. on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 413-420, Sept. 2015.
- [11] Y. C. Shih and B. P. Otis, "An inductorless DC-DC converter for energy harvesting with a 1.2-μW bandgap-referenced output controller," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 58, no. 12, pp. 832-836, Dec. 2011.
- [12] Z. Chen, W. Wang, and H. Wong, "Low-voltage CMOS DC-DC converters for energy harvesting applications," in *Proc. IEEE 11th Int. Conf. on ASIC, ASICON'15*, 4 pp., Chengdu, China, 3-6 Nov. 2015.
- [13] I. Doms, P. Merken, C. Van Hoof, and R. P. Mertens, "Capacitive power management circuit for micropower thermoelectric generators," *IEEE J. Solid State Circuits*, vol. 44, no. 10, pp. 2824-2833, ???, 2009.
- [14] H. Lhermet, et al., "Efficient power management circuit: from thermal energy harvesting to above-IC microbattery energy storage," *IEEE J. Solid State Circuits*, vol. 43, no. 1, pp. 246-255, Jan. 2008.
- [15] E. Kordetoodeshki and A. Hassanzadeh, "An ultra-low power, low voltage DC-DC converter circuit for energy harvesting applications,"



شکل ۱۲: منحنی تغییرات بازده بر حسب جریان بار.

و خازن‌های پارازیتی ایجاد می‌شود و ۲) تلفات هدایت مقاومت حالت روشن ترانزیستورها یا P_{cond} [۹]. در نتیجه توان تلفاتی کلی مبدل برابر است با

$$P_{loss} = P_{SW} + P_{cond} \quad (۴)$$

بازده مبدل را می‌توان با تغییر و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی مانند فرکانس، ظرفیت خازن‌های فلای و عرض ترانزیستورها به حداکثر رساند [۱۰]. بازده مبدل برابر با نسبت توان خروجی یا بار به توان ورودی است و چون توان ورودی مجموع توان تلفاتی و توان بار می‌باشد، بازده مبدل از (۵) به دست می‌آید [۱۰]

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{loss} + P_{out}} \quad (۵)$$

از آنجایی که هم توان تلفاتی و هم توان خروجی وابسته به جریان بار هستند، میزان بازده مبدل نیز بستگی به جریان بار دارد [۸]. از این رو منحنی تغییرات بازده بر حسب جریان بار خروجی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مبدل در بازه ۴ تا ۸ میکروآمپر جریان بار، خروجی بازده مناسبی دارد و در جریان بار ۶ میکروآمپر حداکثر بازده ۵۲٪ را دارد.

۸- نتیجه‌گیری

تاکنون انواع مختلفی از مبدل‌های ولتاژ DC-DC با مشخصات و ویژگی‌های متنوع برای طیف گسترده‌ای از کاربردها طراحی شده است. مبدل ارائه‌شده در این مقاله به گونه‌ای طراحی گردیده که مشخصات آن برای برداشت انرژی محیطی از مولدهای الکتریکی کوچک مناسب باشد. از جمله این مشخصات ولتاژ بسیار پایین ورودی مبدل، تمام مجتمع بودن آن و نیازنداشتن مبدل به عنصر بیرون از تراشه است. این ویژگی‌ها برای سیستم‌های الکترونیکی مانند مدارها و سنسورهای بی‌سیم، دستگاه‌های قابل حمل، ابزارهای الکترونیکی پوشیدنی و ایمپلنت‌های پزشکی بسیار راهگشا خواهد بود. مشخصه دیگری که در تعیین کاربرد یک مبدل ولتاژ نقش دارد حداکثر توان خروجی مبدل و چگالی توان مبدل است. در این کار حداکثر توان خروجی مبدل ۱۰ میکرووات می‌باشد که با توجه به مساحت بهینه ۰٫۲ میلی‌متر مربع آن بر روی تراشه، چگالی توان مبدل ۵۰ میکرووات بر میلی‌متر مربع بوده که مقدار قابل ملاحظه‌ای نسبت به موارد مشابه خود دارد. کیفیت و چگالی ظرفیت خازن‌های یک تکنولوژی تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد مبدل ولتاژ خازنی و افزایش چگالی توان مبدل دارد. در تکنولوژی‌های غیر متعارف خازن‌های مجتمع مانند deep-trench و SOI امکان ساخت مبدل‌هایی با عملکرد بهتر وجود دارد. گزارش‌های

ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۰ از دانشگاه آلاباما آمریکا به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مدارهای مجتمع توان پایین، میکروسنسورها و مدارهای وابسته آن.

فرشید علیرضایی دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه شهید بهشتی است که در زمینه مدارهای مجتمع توان پایین فعال می‌باشد.

AEU-Intl. J. of Electronics and Communications, vol. 98, no. 1, pp. 8-18, Jan. 2019.

[16] E. Kordetoodeshki and A. Hassanzadeh, "Design of low voltage low power DC-DC converters using adiabatic technique," *J. of Circuits Systems and Computers*, vol. 27, no. 6, 20 pp., 15 Jun. 2017.

علیرضا حسن‌زاده تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۷۷ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و علم و صنعت ایران و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به