

استحصال انرژی بوسیله شارژر پمپ مبتنی بر ترانزیستورهای تک الکترونی مجتبی ایاز^۱، تیمور قنبری^{۲*}

۱- گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده

در این تحقیق یک مبدل DC-DC افزایش ولتاژ، با بازدهی بالا مبتنی بر شارژر پمپ برای برداشت انرژی از منابع کم توان ولتاژ پایین پیشنهاد شده است. کلیدهای استفاده شده در این ساختار از نوع ترانزیستورهای تک الکترونی می باشند. ترانزیستورهای تک الکترونی ادواتی نوظهور در الکترونیک قدرت هستند که چشم اندازهای جدیدی را برای الکترونیک قدرت در مقیاس نانو باز نموده اند. نرخ تونل زنی سریع، تلفات هدایتی و سوئیچینگ بسیار کم و نیز قابلیت بالای مجتمع سازی این سوئیچها، آنها را برای استفاده در مبدل‌های با فرکانس سوسچینگ بالا و در مقیاس نانو مناسب نموده است. در صورت بکارگیری آنها در مبدل‌های DC-DC افزایش ولتاژ، با ولتاژ گیت مناسب می توان ولتاژهای ورودی بسیار پایین را نیز تقویت نمود. در مبدل پیشنهادی با استفاده از ترانزیستورهای تک الکترونی، امکان تقویت ولتاژها و توانهای پایین با بازدهی بالا فراهم شده و قابلیت ساخت مبدل بصورت خود درایو در ابعاد بسیار کوچک محقق شده است. نتایج شبیه سازی ساختار پیشنهادی در محیط MATLAB/SIMULINK نشان می دهد که این مبدل قادر است ولتاژهای بسیار کم را تقویت نموده و در توان های ورودی بسیار کم بازدهی بالایی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: ترانزیستورهای تک الکترونی، مبدل DC-DC افزایش ولتاژ پایین، برداشت انرژی، شارژر پمپ

ghanbarih@shirazu.ac.ir

مشکلی که در رابطه با ژنراتورهای ترموالکتریک وجود دارد این است که ولتاژ تولیدی آنها معمولا به قدری پایین است که نمی توان مستقیما از آن برای تغذیه بارهای الکتریکی استفاده کرد. بنابراین استفاده از یک مبدل افزایش ولتاژ برای برداشت انرژی و پردازش توان این منابع ضروری است. مبدل مورد استفاده باید بتواند با ولتاژهای پایین راه اندازی شده و همچنین به دلیل پایین بودن سطح توان بازده بالایی داشته باشند.

در مطالعات پیشین ساختارهای افزایش ولتاژ DC-DC ولتاژ پایین مختلفی پیشنهاد شده است. در برخی از ساختارها که به آنها ساختارهای اسیلاتوری گفته می شود، از یک ترانسفورماتور و یک کلید JFET برای کار و راه اندازی با ولتاژهای پایین استفاده شده است [۲-۴]. مشکلی که در رابطه با این نوع مبدل‌ها وجود دارد این است که ولتاژ خروجی آنها در پلاریته منفی با ولتاژ ورودی بوده و کلید استفاده شده در آنها تلفات هدایتی بالایی دارد. در نتیجه بازده این مبدل‌ها عموما پایین است. همچنین به دلیل استفاده از ترانسفورماتور مبدل ساخته شده حجم بالایی خواهد داشت.

در ساختارهای پیشنهادی در [۵] و [۶]، برای بالا بردن بازده این نوع مبدل‌ها از یک کلید MOSFET به موازات کلید JFET استفاده شده است، به طوری که کلید JFET تنها در حالت راه اندازی در مدار است. همچنین برای رفع مشکل پلاریته منفی ولتاژ خروجی در مرجع [۷] ساختاری دو طبقه پیشنهاد شده است که طبقه اول آن یک اسیلاتور بوده و در طبقه دوم از یک مبدل افزایش ولتاژ استفاده شده است. در مرجع [۸] مبدل افزایش ولتاژ ارائه شده است که راه اندازی آن مکانیکی است.

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از وسایل الکترونیکی کم توان قابل حمل، سنسورهای هوشمند بدون سیم، تجهیزات پزشکی نصب شونده در بدن انسان و ... به طور روزافزونی در حال گسترش است. این وسایل برای کار نیاز به توان پایینی دارند که عمدتا به وسیله باتری‌هایی تامین می شود. عمر باتری‌های استفاده شده معمولا کوتاه بوده و پس از مدتی لازم است جایگزین گردند. جایگزین کردن باتری کاری هزینه بر و گاه بسیار دشوار است.

برای حل این مشکل، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تامین کل یا بخشی از انرژی این تجهیزات از منابع انرژی تجدیدپذیر موجود در محیط اطراف آنها صورت پذیرفته است. این منابع انرژی تجدیدپذیر می تواند سلول‌های خورشیدی، منابع ترموالکتریک، منابع پیزوالکتریک، سلول‌های سوختی میکروبی و ... باشد. این منابع انرژی سازگار با محیط زیست ضمن پایین آوردن هزینه‌های تامین انرژی و هزینه نگهداری، قابلیت اطمینان را با فراهم آوردن عملکردی بدون وقفه بالایی برنند. در میان این منابع انرژی استفاده از انرژی گرمایی اتلافی در محیط به وسیله ژنراتورهای ترموالکتریک به دلیل مزایایی که نسبت به سایر منابع دارند بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مزایای ژنراتورهای ترموالکتریک می توان به سادگی ساختار، نداشتن قسمت متحرک، عمر طولانی، متراکم بودن و در دسترس بودن منبع توان ورودی اشاره کرد [۱].

ترانزیستورهای تک الکترونی کلیدهایی با ابعاد بسیار کوچک (در حد نانومتر) بوده که با اضافه شدن یک الکترون به آن‌ها روشن و خاموش می‌شوند [۱۴]. در شکل ۱ (الف) شمای کلی یک SET و در شکل ۱ (ب) مدل مداری آن نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، یک SET از یک جزیره و الکترودهای گیت، درین و سورس تشکیل شده است. جزیره از طریق دو پیوند تونلی به الکترودهای درین و سورس و از طریق یک خازن به الکترودهای گیت متصل می‌گردد. مطابق شکل ۱ (ب) هر پیوند تونلی به وسیله یک خازن و یک مقاومت نشان داده می‌شود. زمانی که هیچ یک از الکترودها دارای بایاس مثبت نباشند، الکترودها دارای انرژی کافی برای تونل‌زنی از طریق پیوندها نیستند.

در حرکت الکترون از درین به سورس دو سد وجود دارد: ۱- انسداد کولنی و ۲- وجود سطوح مختلف انرژی. بنابراین ولتاژ گیت باید به اندازه‌ای باشد که بر این دو سد غلبه کند:

$$V_{gate} > V_{th} = \frac{e}{C_{total}} \quad (1)$$

در نامساوی (۱)، C_{total} مجموع ظرفیت خازن‌های پیوند درین، سورس و گیت بوده، V_{th} ولتاژ آستانه و e مقدار بار الکترونی یک الکترون است. همچنین مقدار انرژی کولنی برابر است با:

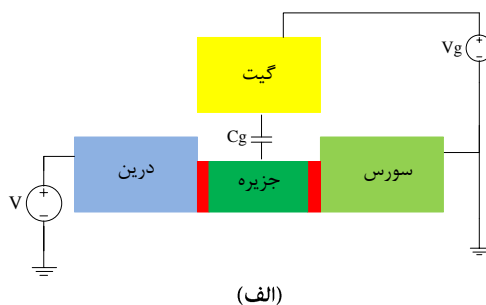
$$E_c = \frac{1}{2} \frac{e^2}{C_{total}} \quad (2)$$

با افزایش ولتاژ گیت جریان تونل‌زنی به صورت پله‌ای تغییر خواهد کرد [۱۵]. شکل ۲ مشخصه جریان-ولتاژ تونل‌زنی الکترون-ها را نشان می‌دهد. در تعیین میزان جریان الکترونی که با عنوان پلکان کولنی شناخته می‌شود باید مقدار انرژی گرمایی سیستم کمتر از انرژی کولنی باشد، به طوریکه برای عملکرد یک SET در دمای اتاق داریم [۱۶]:

$$KT \ll \frac{e^2}{2C} \quad (3)$$

$$C \ll \frac{e^2}{2KT} \approx 3.09 \times 10^{-18} F \quad (4)$$

مقدار خازن با فاصله بین دو پیوند متناسب است. بنابراین با توجه به نامساوی (۴) برای عملکرد SET در دمای اتاق باید فاصله بین دو الکتروده کمتر از ۱۰ nm باشد.



(الف)

به این صورت که در ابتدا برای لحظاتی باید کلید مکانیکی آن در حالت وصل نگه داشته شود تا خازن خروجی مبدل تا اندازه‌ای شارژ گردد و پس از آن مبدل مانند یک مبدل افزایشنده DC-DC کلاسیک عمل خواهد کرد. در برخی دیگر از مقالات از مبدل افزایشنده DC-DC با ساختار کلاسیک برای برداشت انرژی از منابع کم توان ولتاژ پایین استفاده شده است. این ساختارها برای راه-اندازی با ولتاژ پایین به یک منبع ولتاژ اضافی نیاز دارند که می‌تواند یک خازن شارژ شده یا باتری باشد [۹] و [۱۰].

شارژ پمپ‌ها نیز از ساختارهایی هستند که در کاربردهای ولتاژ پایین معمولا به عنوان بخش راه‌انداز مبدل DC-DC افزایشنده ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱] و [۱۲]. شارژ پمپ‌ها قادرند با ولتاژهای ورودی بسیار پایین شروع به کار کرده و با مکانیزمی که در بخش سوم توضیح داده خواهد شد، بسته به تعداد طبقات بکارگیری شده، ولتاژ ورودی را چند برابر نماید. مبدل‌های مبتنی بر شارژ پمپ نسبت تبدیل بالایی داشته و به دلیل عدم استفاده از ترانسفورماتور و سلف ابعاد کوچکی دارند، اما برای داشتن نسبت تبدیل بالا در یک شارژ پمپ باید از تعداد کلیدهای زیادی استفاده کرد که این کار باعث بالا رفتن تلفات و پایین آمدن بازده خواهد شد.

در این مقاله، یک مبدل DC-DC افزایشنده ولتاژ مبتنی بر شارژ پمپ برای کاربردهای توان پایین و ولتاژ پایین پیشنهاد می‌گردد. در ساختار پیشنهادی به جای استفاده از کلیدهای MOSFET معمول، از ترانزیستورهای تک الکترونی (SET) استفاده شده است. در مبدل‌های مبتنی بر SET اگر سویچها با ولتاژ بالاتری درایو شوند می‌توان سطوح پایینتری را پردازش نمود. بنابراین با استفاده از خروجی مبدل DC-DC افزایشنده، در قالب یک مبدل خود درایو می‌توان SETها را کلیدزنی نمود تا سطوح پایین تری قابل افزایش باشد. علاوه بر این بازده مبدل بالا رفته و همچنین ابعاد و وزن مبدل به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در ادامه، در بخش دوم به تشریح نحوه کار و مدار معادل SET پرداخته می‌شود. در بخش سوم ساختار و نحوه کار یک شارژ پمپ ارائه می‌شود. به منظور تأیید کارایی مبدل پیشنهادی، ساختار پیشنهادی در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی انجام شده است که نتایج آن در بخش چهارم ارائه شده است. بخش پنجم مقاله به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- ترانزیستورهای تک الکترونی

در این بخش به معرفی ترانزیستورهای تک الکترونی پرداخته می‌شود. در این راستا ابتدا بخش‌های مختلف و نحوه عملکرد آن تشریح شده و سپس منحنی مشخصه و مدار معادل آن ارائه می‌گردد.

۲-۱- اصول کار ترانزیستورهای تک الکترونی

به طور کلی پدیده‌های تک الکترونی به اثرات ناشی از تزریق و استخراج الکترون‌های تکی از یک سیستم مزوسکوپی و تغییرات انرژی ناشی از آن اشاره دارد. این اثرات اساس کار دسته‌ای از وسایل مانند SETها، حافظه‌های تک الکترونی و . . . هستند [۱۳].

۳-۲- مدار معادل یک SET

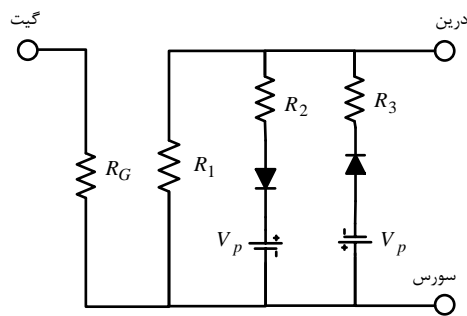
به منظور مدل‌سازی ترانزیستورهای تک الکترونی، مدار معادل-های مختلفی در مطالعات گذشته پیشنهاد شده است. یکی از بهترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی در کاربردهای کلیدزنی در مرجع [۱۷] ارائه شده است. شکل ۴ این مدل را نشان می‌دهد. در این مدل R_G مقاومت بین گیت و سورس بوده و در رنج $100 \text{ G}\Omega$ است. وجود مقاومت، دیود و منبع ولتاژ مشابه در شاخه‌های دوم و سوم به مشخصه جریان-ولتاژ متقارن ترانزیستور بر می‌گردد. همانطور که مشاهده می‌شود، جهت منبع و دیودها در دو شاخه خلاف یکدیگر است که باعث می‌شود جریان در هر دو جهت بایاس درین-سورس جاری گردد. مقاومت R_1 نشان دهنده ناحیه انسداد کولنی و مقاومت‌های R_2 و R_3 فابیشگر ناحیه‌های هدایت مثبت و منفی در مشخصه جریان-ولتاژ ترانزیستور هستند.

در یک SET، انرژی شارژ وابسته به ولتاژ گیت بوده و به صورت دوره‌ای تغییر می‌کند و باید این ویژگی در اندازه مقاومت‌های مدل کننده ترانزیستور (R_1 , R_2 , R_3) لحاظ گردد. این مقاومت‌ها از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آیند:

$$R_1(V_G) = CR_1 + CR_2 \cos(CF_1 V_G) \quad (5)$$

$$R_2(V_G) = R_3(V_G) = \frac{CV_p}{CI_2 - \frac{2CV_p}{R_1(V_G)}} \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶) پارامترهای CF_1 , CR_1 , CR_2 , CF_1 و CI_2 مقادیر ثابتی بوده که برای تنظیم مشخصه جریان-ولتاژ SET در ولتاژهای گیت مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.



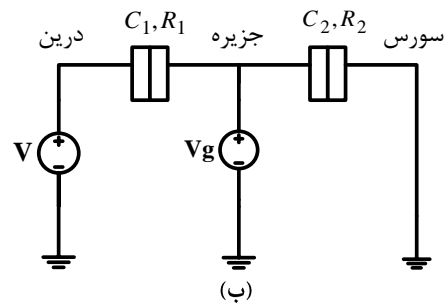
شکل ۴ مدار معادل الکتریکی یک SET

۳- شارژ پمپ مبتنی بر ترانزیستورهای تک الکترونی

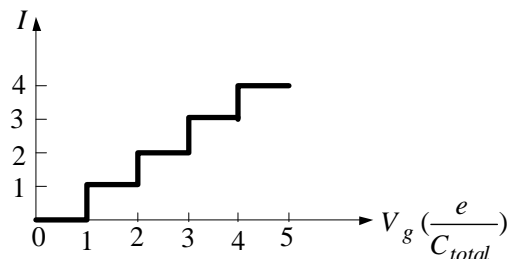
در این بخش به بررسی نحوه کار یک شارژ پمپ می‌پردازیم. در این راستا ابتدا به تشریح نحوه کار یک شارژ پمپ یک طبقه خواهیم پرداخت و در ادامه همین بحث را به یک شارژ پمپ N طبقه تعمیم خواهیم داد.

۳-۱- شارژ پمپ یک طبقه

شکل ۵ (الف) ساختار یک شارژ پمپ یک طبقه را نشان می‌دهد. این مبدل از یک خازن پمپ کننده C، کلیدهای S_1 و S_2 و یک سیگنال کلاک تشکیل شده است. بار خروجی به وسیله یک منبع جریان ایده‌آل مدل شده و C_{out} نشان دهنده خازن خروجی است.



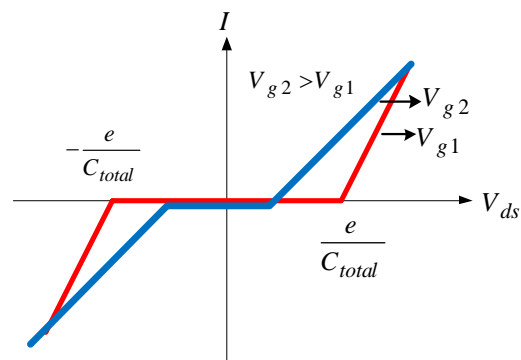
شکل ۱ الف) شمای کلی یک ترانزیستور تک الکترونی (ب) مدل مداری



شکل ۲ مشخصه جریان-ولتاژ تونل‌زنی الکترون‌ها در یک SET

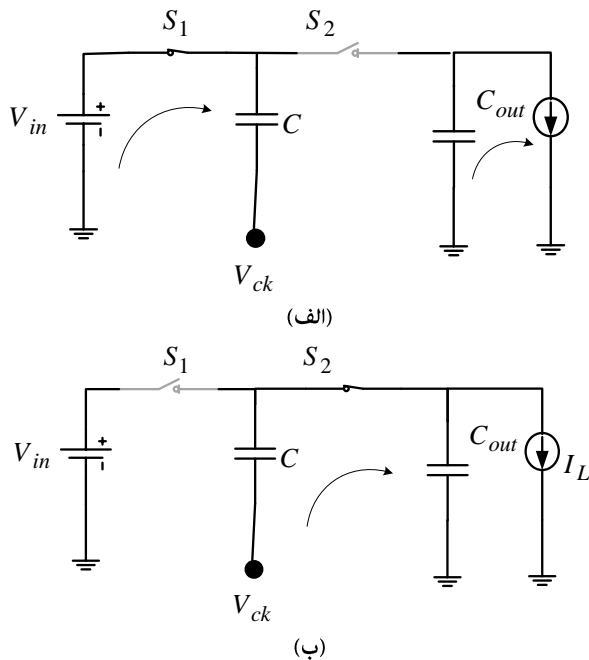
۳-۲- مشخصه جریان-ولتاژ یک SET

شکل ۳ مشخصه جریان-ولتاژ یک SET دارای پیوندهای متقارن را نشان می‌دهد. در یک SET با پیوندهای متقارن $C_1 = C_2$ و $R_1 = R_2$ است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود اگر باشد، جریان برابر صفر است. این ناحیه انسداد کولنی نامیده می‌شود. اگر ولتاژ بایاس اعمالی به پیوند از مقدار آستانه بیشتر باشد بر انسداد کولنی غلبه شده و جریان جاری می‌گردد. این ناحیه از مشخصه جریان-ولتاژ شبیه مشخصه یک مقاومت است.



شکل ۳ مشخصه جریان-ولتاژ یک SET دارای پیوندهای متقارن

ولتاژ آستانه در ترانزیستورهای تک الکترونی در حدود میلی ولت است که مقدار آن نسبت به سایر ترانزیستورها بسیار کمتر بوده و آن را برای کاربردهای ولتاژ پایین بسیار مناسب می‌سازد. باید توجه گردد که با افزایش ولتاژ گیت-سورس، ولتاژ آستانه کاهش می‌یابد. در شکل ۳ تاثیر افزایش ولتاژ گیت روی مشخصه جریان-ولتاژ نشان داده شده است. شایان ذکر است که اگر پیوندها نامتقارن باشند به طوری که باشد، حرکت الکترون‌ها از یک الکتروود به الکتروود دیگر بسیار سریع بوده و مشخصه جریان-ولتاژ به صورت پله‌ای خواهد بود.



شکل ۶ نحوه کلیدزنی شارژر پمپ یک طبقه (الف) بازه $[0, \frac{T}{2}]$ (ب) بازه $[\frac{T}{2}, T]$

بنابراین در این بازه زمانی، اولین خازن C به اندازه ولتاژ ورودی شارژ شده و خازن‌های طبقات فرد توسط خازن طبقه قبلی خود شارژ می‌شوند. توجه گردد که اگر تعداد طبقات زوج باشد خازن خروجی توسط خازن طبقه آخر شارژ می‌گردد. در بازه زمانی، سیگنال برابر V_{GS} و برابر صفر بوده و کلیدهای طبقات زوج وصل می‌باشند. در این بازه زمانی، خازن‌های شارژ شده طبقات فرد بار ذخیره شده خود را به طبقات بعدی خود منتقل می‌کنند. این روند در بازه‌های زمانی بعدی بطور متناوب تکرار می‌شود. بنابراین در هر دوره تناوب، هر خازن مقداری بار الکتریکی از خازن طبقه قبل خود دریافت و این بار را به خازن طبقه بعد انتقال می‌دهد. به طور خلاصه می‌توان گفت در هر دوره زمانی یک انتقال بار از منبع به بار خروجی اتفاق می‌افتد. با تعمیم رابطه (۷) برای یک مبدل با ساختاری N طبقه ولتاژ خروجی مبدل برابر است با:

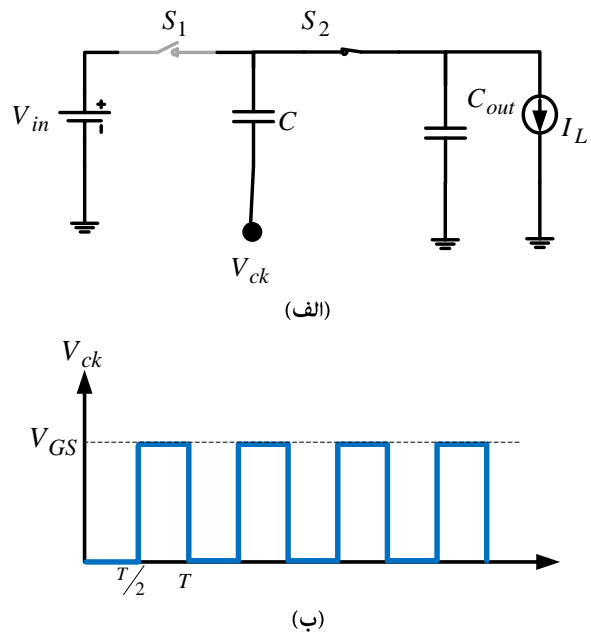
$$V_{o/steady-state} = (N+1)V_{in} - N \frac{I_L T}{C} \quad (8)$$

همچنین با فرض کوچک بودن مقدار خازن‌های پمپ کننده نسبت به خازن خروجی، رپل ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V_{ripple} = \frac{I_L T}{C_{out}} \quad (9)$$

شکل ۷ (ب) ساختار شارژر پمپ پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. در واقع مبدل DC-DC افزایش ولتاژ پیشنهادی در این مقاله یک شارژر پمپ چهار طبقه است که کلیدهای استفاده شده در آن از نوع SET هستند. استفاده از کلیدهای SET باعث می‌شود که مبدل بتواند با ولتاژهای ورودی بسیار پایین راه‌اندازی شود. علاوه بر آن، انتظار می‌رود که بازده این ساختار نسبت به

سیگنال کلاک دامنه‌ای به اندازه ولتاژ ورودی مبدل داشته و دوره تناوب آن برابر T است و در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است.



شکل ۵ (الف) شارژر پمپ یک طبقه (ب) سیگنال کلاک

همانطور که در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است، در بازه زمانی $[0, \frac{T}{2}]$ ، کلید S_1 بسته و کلید S_2 باز بوده و خازن C به منبع ورودی مبدل متصل می‌شود و به اندازه V_{in} شارژ می‌گردد. همچنین در این بازه زمانی، خازن خروجی بار را تغذیه کرده و به اندازه دشارژ می‌شود. مطابق شکل ۶ (ب)، در بازه زمانی $[\frac{T}{2}, T]$ ، کلید S_2 بسته و کلید S_1 باز است. در این بازه زمانی سیگنال کلاک برابر V_{GS} بوده و بار ذخیره شده در خازن C به خازن خروجی و بار منتقل می‌گردد. بنابراین در حالت ماندگار در پایان هر سیکل ولتاژ خروجی برابر است با [۱۸]:

$$V_{o/steady-state} = 2V_{in} - \frac{I_L T}{C} \quad (10)$$

۲-۳- شارژر پمپ N طبقه

مطابق شکل ۷ (الف) با افزودن طبقات بعدی به یک شارژر پمپ یک طبقه، می‌توان ساختار شارژر پمپ یک طبقه را به یک شارژر پمپ N طبقه توسعه داد. همانطور که در شکل ۷ (الف) مشاهده می‌شود هر طبقه از این مبدل از یک خازن پمپ کننده C و یک کلید S_K تشکیل شده است. در ساختار شارژر پمپ‌های چند طبقه به دو سیگنال کلاک که مکمل یکدیگرند نیاز است. در شکل، این دو سیگنال با V_{ck} و \bar{V}_{ck} نشان داده شده‌اند.

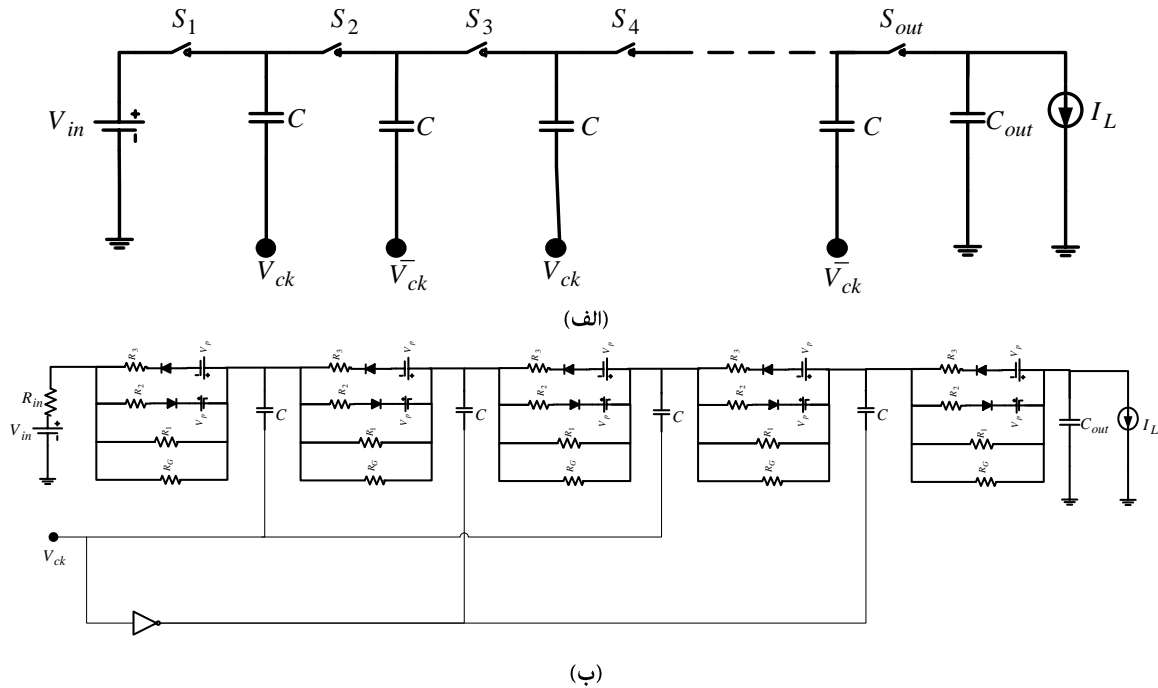
نحوه کار این مبدل مشابه شارژر پمپ یک طبقه است. بدین صورت که در بازه زمانی $[0, \frac{T}{2}]$ سیگنال V_{ck} برابر صفر و \bar{V}_{ck} برابر V_{GS} بوده و کلیدهای طبقات فرد وصل می‌باشند.

سازي شده است. مقادير امان‌هاي استفاده شده در اين مدار در جدول ۱ ارايه شده است. پارامترهاي CF_1 ، CR_1 ، CR_2 و CI_2 مقادير مطابق مقادير داده شده در مرجع [۱۷] مي باشد. مبدل مطرح شده براي برداشت انرژی از منابع انرژی تجدیدپذیر کم‌توان پیشنهاد می شود.

ساختارهایی که در آن از دیود یا کلیدهای MOSFET استفاده می‌کنند، بسیار بالاتر باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی عملکرد مبدل با ساختار پیشنهادی، مدار نشان داده شده در شکل ۷ در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه-سازی



شکل ۷ الف) ساختار یک شارژر پمپ N طبقه ب) ساختار مبدل پیشنهادی

سیگنال‌های V_{ck} و \bar{V}_{ck} در شکل ۸ الف) و ب) نشان داده اند. این دو سیگنال در فاز مخالف یکدیگر بوده و دارای فرکانس برابر 10 kHz و دامنه برابر 0.1 V می‌باشند. ولتاژ خروجی مبدل در شکل ۹ نشان داده شده است. مقدار حالت ماندگار ولتاژ خروجی برابر 0.49 V می‌باشد که بر یک ریپل کلیدزنی سوار است. در صورت ایده‌آل بودن کلیدها با جایگزین کردن مقادیر داده شده در جدول ۱ در رابطه ی (۸)، مقدار ولتاژ خروجی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_{o/steady-state} = 5 \times 0.1 - 4 \times \frac{0.1 \times 10^{-3} \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-6}} = 0.496 V$$

مقدار ریپل ولتاژ خروجی بر اساس رابطه (۹) برابر است با:

$$V_{ripple} = \frac{0.1 \times 10^{-3} \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-6}} = 10 mV$$

در شبیه‌سازی با اندازه‌گیری افت ولتاژ روی مقاومت ورودی R_{in} ، جریان ورودی برابر 0.54 mA به دست می‌آید. بنابراین توان ورودی توسط منبع ترموالکتریک برابر است با:

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in} = 0.1 \times 0.54 \times 10^{-3} = 54 \mu W$$

با توجه به ولتاژ خروجی به دست آمده از شبیه‌سازی، توان خروجی برابر است با:

در این مطالعه، ورودی این مبدل یک ژنراتور ترموالکتریک است که از آن برای برداشت انرژی از انرژی گرمایی محیط استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۷ ب) نشان داده شده است، مدل مداری یک ژنراتور ترموالکتریک یک منبع ولتاژ DC سری شده با یک مقاومت است [۱۹]. همچنین بار خروجی به وسیله یک منبع جریان با دامنه 0.1 mA مدل‌سازی شده است.

جدول ۱ مقدار پارامترهای مدار شبیه‌سازی شده

پارامتر	مقدار
CF_1	60
CR_1	300×10^6
CR_2	100×10^6
CI_2	0.2×10^9
CV_p	0.02
V_{in}	100 mV
R_{in}	6 Ω
I_L	0.1 mA
V_p	10 mV
C	1 μF
C_{out}	0.1 μF

را در ابعاد نانو فراهم آورد. به علت عدم نیاز به ترانسفورماتور و المان‌های سلفی، این گونه شارژر پمپ‌ها قابلیت ساخت مبدل DC-DC افزایشنده در ابعاد نانو را فراهم می‌آوردند. از این ساختار می‌توان برای برداشت انرژی از منابع کم توان ولتاژ پایین استفاده نمود. یک نمونه شارژر پمپ چهار طبقه مبتنی بر ترانزیستور تک الکترونی در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه سازی گردید. نتایج نشان داد که این مبدل قادر است بدون نیاز به منبع خارجی با ولتاژهای بسیار کم شروع به کار کرده و در توان‌های پایین در حد $50 \mu W$ بازده نسبتاً بالایی در حد 90% داشته باشد.

۵. منابع

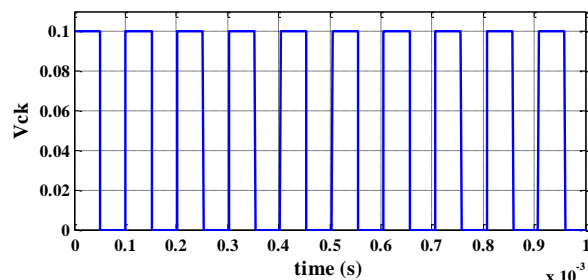
1. Liang Gaowei; Zhou Jiemin; Huang Xuezhang; Liang Gaowei; Output characteristics analysis of thermoelectric generator based on accurate numerical model. IEEE conference on power and energy engineering (APPEEC), 1-4, 2010.
2. S-E. Adami; N. Degrenne; C. Vollaie; B. Allard; F. Buret; F. Costa; Autonomous ultra-low power DC/DC converter for microbial fuel cells. 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuit and Systems (ICECS) 398-401, 2011.
3. S-E. Adami; V. Marian; N. Degrenne; C. Vollaie; B. Allard; F. Costa; Self-powered ultra-low power DC-DC converter for RF energy harvesting. IEEE Conference on Fiable Tension Fiable Consommation (FTFC), 1-4, 2012.
4. D.R. Brennan; O. Mostaghimil; K.V. Vassilevski; N.G. Wright; A.B. Horsfall; Novel SiC Self Starting DC-DC Converter for High Temperature Wireless Sensor Nodes. IEEE Conference on sensors, 1-4, 2012.
5. M. Ayaz; E. Farjah; T. Ghanbari; An Efficient Power Supply for Wireless Sensor Networks through Environmental Energy Harvesting. The 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, 1-6, 2016.
6. N. Degrenne; F. Buret; F. Morel; S-E. Adami; D. Labrousse; B. Allard; A. Zaoui; Self-starting DC:DC boost converter for low-power and low-voltage microbial electric generators. IEEE Conversion Congress and Exposition (IECCE) , 889-896, 2011.
7. M. Ayaz; E. Farjah; T. Ghanbari; A Novel Self-starting Ultra Low-power and Low-voltage Two-stage DC-DC Boost Converter for Microbial Energy Harvesting. IEEE International Conference on Power Electronics, Derive Systems and Technologies (PEDSTC), 498-502, 2015.

$$P_{out} = V_{out} \times I_L = 0.49 \times 0.1 \times 10^{-3} = 49 \mu W$$

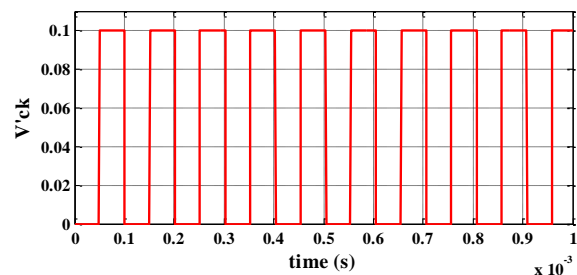
بنابراین بازده مبدل برابر است:

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{49}{54} \times 100 = 90\%$$

مشاهده می‌شود که استفاده از کلیدهای SET، بازده قابل قبولی را برای مبدل در توان‌های بسیار کم فراهم می‌آورد.

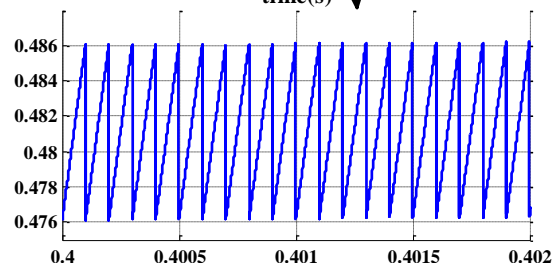
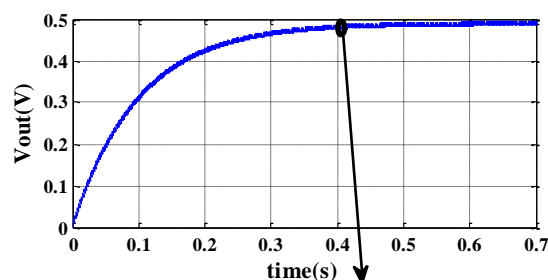


(الف)



(ب)

شکل ۸ سیگنال‌های کلاک اعمالی در شبیه‌سازی (الف) V_{ck} (ب) V'_{ck}



شکل ۹ ولتاژ خروجی مبدل در شبیه‌سازی (بالا) و ریپل ولتاژ خروجی آن (پایین)

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، استفاده از ترانزیستورهای تک الکترونی به عنوان سوچ در شارژر پمپ‌ها پیشنهاد گردید. نشان داده شد که با استفاده از این سوچ‌ها می‌توان هم سطوح ولتاژ پایین تری را توسط مبدل تقویت نمود و هم توانایی ساخت مبدل با بازده بالا

applications. IEEE Trans. Power electronics, Vol. 28, No. 8, 3827-3833, 2013.

8. J. W. Kimball; T. L. Flowers; P. L. Chapman; Issues with low-input-voltage boost converter design. IEEE Conference on Power Electronics Specialists, vol. 12, 2152-2156, 2004.
9. X. Cao; W-J. Chiang; Y-C. King; Y-K. Lee; Electromagnetic energy harvesting circuit with feedforward and feedback DC-DC PWM boost converter for vibration power generator system. IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 22, No. 2, 679-685, 2007.
10. Y.K.Ramadass; A. P. Chandrakasan; A battery-less thermoelectric energy harvesting interface circuit with 35 mV startup voltage. IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 46, No. 1, 333-341, 2011.
11. A. Meehan; H. Gao; Z. Lewandowski; Energy Harvesting With Microbial Fuel Cell and Power Management System. IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 26, No. 1, 176-181, 2011.
12. S. Carreon-Bautista; A. Eladawy; A. N. Mohieldin; E. Sanchez-Sinencio; Boost converter with dynamic input impedance matching for energy harvesting with multi-array thermoelectric generators. IEEE Trans. Ind. Electronics. accepted for publication in future. 2014.
13. Stephen M. Goodnick; J. Bird; Quantum-Effect and Single-Electron Devices. IEEE Trans. Nanotechnology, Vol. 2, No. 4, 368-385, 2003.
14. Monika Gupta; A Study of Single Electron Transistor (SET). International Journal of Science and Research (IJSR), Vol. 5, 474-479, 2016.
15. Gurinder pal Singh; Balwinder Raj; Single Electron Transistor Theory: A Review. IEEE Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN), 95-99, 2013.
16. A. Kumar; D. Dubey; Single Electron Transistor: Applications and Limitations. Advance in Electronic and Electric Engineering, Vol. 3, No. 1, 57-62, 2013.
17. Y. S. Yu; H. S. Lee; and S. W. Hwang; SPICE Macro-Modeling for the Compact Simulation of Single Electron Circuits. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 33, 1-14, 1998.
18. G. Palumbo; D. Pappalardo; Charge Pump Circuits: An Overview on Design Strategies and Topologies. IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol. 10 No. 1, 31-45, 2010.
19. J. Kim; C. Kim; A DC-DC boost converter with variation-tolerant MPPT technique and efficient ZCS circuit for thermoelectric energy harvesting