

## بررسی و مقایسه بهره‌وری روش‌های کلیدزنی نرم در مبدل DC-DC سه‌سطحی برای سیستم توزیع نیرو در شناورها

رضا مسافری<sup>۱\*</sup>، سید ادیب ابریشمی<sup>۲</sup>

plcreza@yahoo.com

۱- کارشناس ارشد مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)

۲- دانشیار مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

برای تبدیل سطوح مختلف ولتاژ DC در شناورها از مبدل‌های DC-DC استفاده می‌شود. به دلیل ایده‌آل نبودن عناصر نیمه‌هادی قدرت و همچنین عدم پیکربندی مناسب ساختار مداری، این مبدل‌ها و همچنین سایر مبدل‌های قدرت از تلفات هدایت و کلیدزنی برخوردار می‌شوند. مهم‌ترین تلفاتی که مبدل‌های قدرت از آن رنج می‌برند تلفات کلیدزنی است که برای حل آن روش‌های کلیدزنی نرم پیشنهاد شده است. در واقع این روش‌ها از هم‌پوشانی ولتاژ و جریان در مقادیر زیاد به‌هنگام قطع و وصل کلید جلوگیری می‌کنند. از طرفی انتخاب و به‌کارگیری ساختار سه‌سطحی باعث می‌شود تا افت ولتاژ کلیدهای قدرت برابر با نصف ولتاژ ورودی باشد. این امر نیز تأثیر به‌سزایی در کاهش تلفات، افزایش بهره‌وری و همچنین افزایش طول عمر مبدل‌های قدرت دارد. به همین دلیل مبدل DC-DC سه‌سطحی با کلیدزنی نرم به دلیل ویژگی‌هایی که دارد در صنعت کشتی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو در این مقاله پس از تعریف و مفاهیم کلیدزنی نرم، دو نوع مهم از روش‌های کلیدزنی نرم از لحاظ بهره‌وری در چهار نمونه مبدل DC-DC سه‌سطحی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. همچنین در ادامه نیز یک نمونه از مبدل‌های DC-DC سه‌سطحی توسط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و نتایج حاصل از کلیدزنی آن در انتها ارائه خواهد شد.

واژگان کلیدی: مبدل DC-DC سه‌سطحی، کلیدزنی نرم، ZVCS، ZVS.

تاریخ دریافت مقاله : ۱۳۹۶/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۷/۱۷

## ۱- مقدمه

مبدل‌های DC-DC سیستم‌های الکترونیکی هستند که برای تبدیل سطوح مختلف ولتاژ DC در شناورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. سه سطحی بودن ساختار مداری در این مبدل‌ها باعث می‌شود تا افت ولتاژ کلیدهای قدرت برابر با نصف ولتاژ ورودی گردد [۱ و ۲]. بنابراین تلفات کلیدزنی این مبدل‌ها نسبت به مبدل‌های مرسوم و معمولی کم‌تر و بهره‌وری آن نیز زیادتر خواهد بود. بهره‌وری مشخصه‌ای است که در صنایع مختلف به ویژه صنعت کشتی‌سازی دارای اهمیت می‌باشد. معمولاً این مشخصه برای مبدل‌های DC-DC بیش از ۷۵ درصد است. برای رسیدن به چنین سطحی از بهره‌وری نیاز است تا تلفات عناصر مختلف مدار به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کند [۳]. جهت تحقق این امر مهم، روش‌های بسیاری توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است تا عملکرد عناصر کلیدزنی بهبود یابد. این روش‌ها که از آن‌ها به‌نام روش‌های کلیدزنی نرم یاد می‌شود شامل کلیدزنی در ولتاژ صفر<sup>۱</sup> [۴ و ۵]، کلیدزنی در جریان صفر<sup>۲</sup> [۶] و کلیدزنی در ولتاژ و جریان صفر<sup>۳</sup> [۷] می‌باشد. البته روش‌های ذکر شده فقط چند نمونه از روش‌های کلیدزنی نرم به‌شمار می‌آید. مشخصه‌ی دیگری که در طراحی مبدل‌های DC-DC برای شناورها از اهمیت فراوانی برخوردار است فرکانس کلیدزنی می‌باشد. به دلیل محدودیت فضا و طرح جانمایی آن در شناورها باید حجم و سایز مبدل‌ها تا حد امکان کاهش یابد. به‌منظور کاهش حجم و اندازه مبدل‌های قدرت باید فرکانس کلیدزنی افزایش پیدا کند [۸]. هنگامی که مبدل‌های مدولاسیون عرض پالس<sup>۴</sup> در فرکانس‌های زیاد کار می‌کنند پدیده پراکندگی عناصر آثار منفی بر عملکرد مدار خواهد داشت. توجه به این نکته در طراحی حائز اهمیت است. به‌ویژه این که این تلفات در توان‌های زیاد بیش‌تر به چشم می‌خورد. دلیل دیگر به‌کارگیری از ساختار سه‌سطحی از این جهت که افت ولتاژ بر روی عناصر مدار در مقایسه با مبدل‌های دوسطحی کم‌تر است می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در نتیجه می‌توان از

عناصری استفاده کرد که با ولتاژهای پایین‌تر کار می‌کنند. از این رو قیمت تمام شده کم‌تر خواهد بود [۹].

## ۲- کلیدزنی در مبدل‌های قدرت

کلیدزنی در مبدل‌های قدرت به دو نوع سخت<sup>۵</sup> و نرم<sup>۶</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. روش کلیدزنی سخت، بسیار مرسوم بوده و در اغلب مدارهای الکترونیکی به‌کار می‌روند. اما موضوعی که باعث می‌شود تا کلیدزنی نرم از جایگاه ویژه‌ای برخوردار باشد، کاهش تلفات توان ناشی از کلیدزنی عناصر نیمه‌هادی است. اگرچه کلیدزنی سخت مرسوم بوده و پیاده‌سازی آن آسان است اما در توان‌های زیاد، تلفات کلیدزنی این روش بسیار زیاد خواهد بود و بهره‌وری به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد [۱۰]. در واقع کلیدزنی نرم از هم‌پوشانی ولتاژ و جریان در مقادیر زیاد جلوگیری می‌نماید و از این طریق تلفات توان کلید کاهش پیدا می‌کند. انتخاب روش‌های کلیدزنی نرم در طراحی مدار به عوامل بسیاری بستگی دارد. نمونه‌ای از این عوامل می‌تواند کلیدهای قدرت، فرکانس کلیدزنی و ساختار مداری باشد [۱۱ و ۱۲]. کلیدزنی نرم در دسته‌هایی تقسیم‌بندی می‌شوند که سه نوع مهم آن عبارت‌اند از:

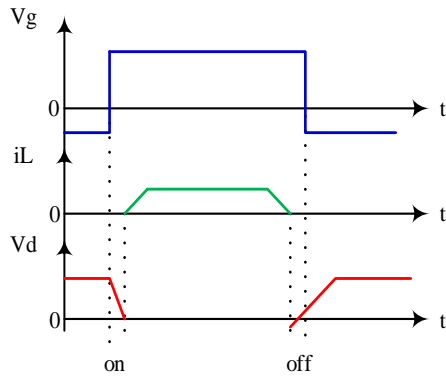
- ۱- کلیدزنی در جریان صفر
- ۲- کلیدزنی در ولتاژ صفر
- ۳- کلیدزنی در ولتاژ و جریان صفر

## ۲-۱ کلیدزنی در جریان صفر

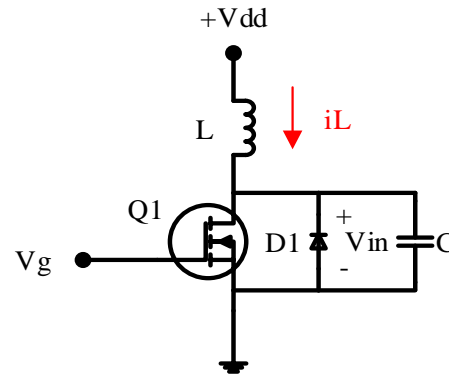
شکل ۱ شمای یک کلید و شکل موج‌های آن را برای کلیدزنی در جریان صفر (ZCS) نشان می‌دهد. طبق این شکل یک سلف با عنصر کلیدزنی به‌طور سری قرار داده شده افزایش یابد، ولتاژ درین (یا کلکتور برای ترانزیستورهای دوقطبی) به نزدیکی صفر افت می‌کند. در نتیجه تلفات کلیدزنی روشنی کمی به وجود خواهد آمد. در این حالت کلیدزنی انرژی ذخیره شده در خازن پراکندگی درین-سورس کلاً تلف خواهد شد. این تلفات در فرکانس‌های زیاد بسیار حائز اهمیت می‌شود است. بنابراین به هنگام روشنی و قبل از آن که جریان

- 1 Zero Voltage Switching (ZVS)
- 2 Zero Current Switching (ZCS)
- 3 Zero-Voltage and Zero-Current Switching (ZCZVS)
- 4 Pulse Width Modulation (PWM)

- 5 Hard Switching
- 6 Soft Switching



(ب)



(الف)

شکل (۱) شمای مدار معادل ZCS و شکل موج آن (الف): مدار معادل ZCS. (ب): شکل موج کلید [۱۳]

در طی روشنی از طریق عنصر کلیدزنی تخلیه نمی‌شود چرا که قبل از آن، جریان مدار تشدید در جهت معکوس از دیود موازی ترانزیستور می‌گذرد و این می‌تواند ناشی از معکوس شدن جریان در مدار تشدید باشد. در طی معکوس شدن جریان، عنصر کلیدزنی قطع است. بنابراین در حالت ایده‌آل تلفات چندانی به‌هنگام خاموشی رخ نمی‌دهد [۱۳].

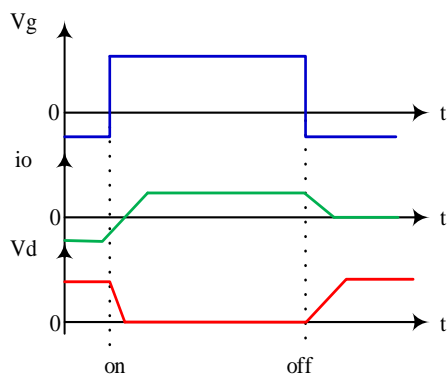
در مدارهای ZCS و به‌هنگام خاموشی، ولتاژ درین-سورس به نزدیکی صفر رسیده و معکوس می‌شود (یعنی جریان از دیود موازی ترانزیستور می‌گذرد) و این می‌تواند ناشی از معکوس شدن جریان در مدار تشدید باشد. در طی معکوس شدن جریان، عنصر کلیدزنی قطع است. بنابراین در حالت ایده‌آل تلفات چندانی به‌هنگام خاموشی رخ نمی‌دهد [۱۳].

در مدارهای ZCS و به‌هنگام خاموشی، ولتاژ درین-سورس به نزدیکی صفر رسیده و معکوس می‌شود (یعنی جریان از دیود موازی ترانزیستور می‌گذرد) و این می‌تواند ناشی از معکوس شدن جریان در مدار تشدید باشد. در طی معکوس شدن جریان، عنصر کلیدزنی قطع است. بنابراین در حالت ایده‌آل تلفات چندانی به‌هنگام خاموشی رخ نمی‌دهد [۱۳].

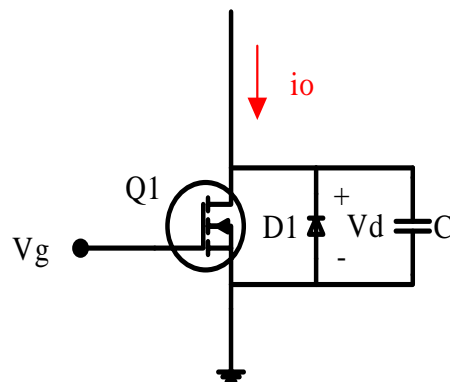
در مدارهای ZCS و به‌هنگام خاموشی، ولتاژ درین-سورس به نزدیکی صفر رسیده و معکوس می‌شود (یعنی جریان از دیود موازی ترانزیستور می‌گذرد) و این می‌تواند ناشی از معکوس شدن جریان در مدار تشدید باشد. در طی معکوس شدن جریان، عنصر کلیدزنی قطع است. بنابراین در حالت ایده‌آل تلفات چندانی به‌هنگام خاموشی رخ نمی‌دهد [۱۳].

## ۲-۲ کلیدزنی در ولتاژ صفر

در شکل ۲ شمای مداری کلیدزنی در ولتاژ صفر نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود اتلاف کم در طی خاموشی در اثر خازن متصل شده به دو سر عنصر کلیدزنی به‌دست می‌آید (این در تقابل با ZCS است که در آن اتلاف روشنی کم با اندوکتانس سری با عنصر کلیدزنی به‌دست می‌آید). خازن درین-سورس



(ب)



(الف)

شکل (۲) کلید قدرت در حالت ZVS (الف): شمای از کلید قدرت. (ب): شکل موج کلید در حالت ZVS [۱۳]

### ۲-۳ کلیدزنی در ولتاژ و جریان صفر

کلیدزنی در ولتاژ و جریان صفر ترکیبی از دو روش پیشین است. در این روش هدف ایجاد فرصت کلیدزنی نرم برای تمام کلیدهای قدرت مدار خواهد بود. این روش برای مبدل‌هایی بهینه است که از کلیدهای آی‌جی‌بی‌تی<sup>۱</sup> و یا ترکیبی از آی‌جی‌بی‌تی و ماس‌فت<sup>۲</sup> تشکیل شده است. معمولاً برای پیاده‌سازی این روش افزودن مدار کمکی مورد نیاز خواهد بود [۱۴].

انتخاب روش‌های کلیدزنی نرم بستگی به نوع عناصر نیمه‌هادی قدرت دارد. معمولاً کلیدهای ماس‌فت در مبدل‌های ZVS دارای راندمان بهتری هستند، زیرا تلفات خازنی ناشی از روشن شدن کلید در آن حذف شده است. آی‌جی‌بی‌تی‌ها نیز در مبدل‌های ZCS راندمان بهتری دارند، چرا که تلفات خاموشی به وجود آمده در آن‌ها توسط جریان چرخشی حذف شده است. بنابراین هر یک از این روش‌ها می‌تواند با توجه به طرح و خواسته مورد نظر به‌کارگیری شود. برای این منظور در ادامه دو روش مهم کلیدزنی نرم در ساختار سه‌سطحی از لحاظ بهره‌وری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

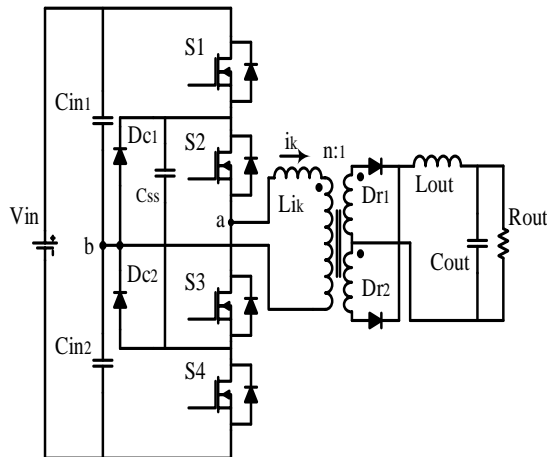
### ۳- بررسی روش‌های کلیدزنی نرم در ساختار سه‌سطحی

در این بخش دو روش کلیدزنی ZVS و ZVZCS به دلیل کاربرد گسترده آن در ساختار سه‌سطحی از لحاظ بهره‌وری بررسی می‌شود.

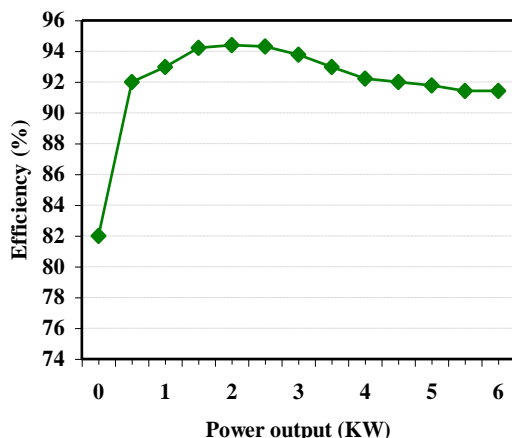
#### ۳-۱ مبدل DC-DC سه‌سطحی با کلیدزنی ZVS

شکل ۳ یک نمونه از مبدل DC-DC سه‌سطحی را نشان می‌دهد. این مبدل در [۱۵] برای سیستم توزیع نیرو در شناورهای الکتریکی پیشنهاد شده است. تمامی کلیدهای قدرت این مدار از نوع ماس‌فت می‌باشند. از این رو کلیدزنی ZVS برای این طرح مبدل مناسب خواهد بود. معمولاً برای تحقق ZVS از انرژی ذخیره شده در سیم‌پیچ نشستی ترانسفورماتور استفاده می‌شود. اما گسترش محدوده‌ی ZVS برای بارهای خروجی نیازمند افزایش مقدار ویژگی سلفی در مدار است. این امر نیز افزایش تلفات هدایت و نوسان‌هایی در دوسر دیویدهای یکسوساز

خروجی را به‌همراه دارد. عمل کلیدزنی این مبدل در شش مرحله اتفاق می‌افتد. خازن CSS که بین کلیدهای S2 و S3 متصل است اجازه می‌دهد تا تمامی کلیدها به‌صورت نرم عمل کنند. این مبدل به ازای ولتاژ ورودی ۶۶۰ الی ۸۰۰ ولت، ولتاژ خروجی ۴۲ الی ۵۸ ولت، جریان خروجی ۱۱۵ آمپر و فرکانس کلیدزنی ۱۰۰ کیلوهرتز در [۱۵] معرفی شده است. شکل ۴ بهره‌وری این مبدل را نشان می‌دهد. این تصویر، راندمان مبدل را به عنوان تابعی از توان خروجی به ازای ولتاژ ورودی ۸۰۰ ولت و ولتاژ خروجی ۵۲ ولت ترسیم می‌کند. حداکثر راندمان این مبدل ۹۴٫۲٪ است که در اطراف توان خروجی ۲۳۰۰ وات حاصل شده است. هم‌چنین راندمان این مبدل در شرایط بار کامل به مقدار ۹۱٫۳٪ کاهش پیدا می‌کند.



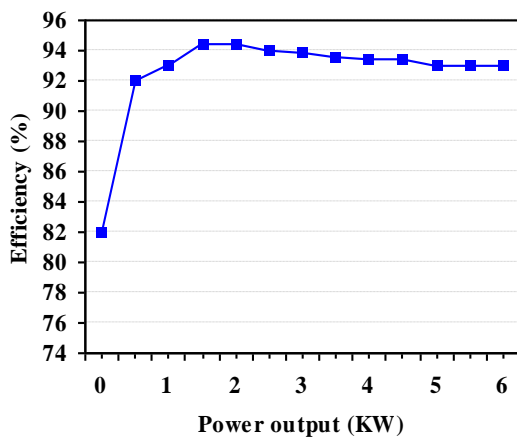
شکل (۳) مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVS [۱۵]



شکل (۴) راندمان مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVS [۱۵]

1 IGBT  
2 MOSFET

این مبدل به ازای ولتاژ ورودی ۶۶۰ الی ۸۰۰ ولت، ولتاژ خروجی ۴۲ الی ۵۸ ولت، جریان خروجی ۱۰۰ آمپر و فرکانس کلیدزنی ۱۰۰ کیلوهرتز در [۱۶] پیشنهاد شده است. در شکل ۶ بهره‌وری این مبدل بر اساس تابعی از توان خروجی به ازای ولتاژ ورودی ۸۰۰ ولت و ولتاژ خروجی ۵۲ ولت ترسیم شده است. این تصویر حداکثر راندمان مبدل را در اطراف توان خروجی ۲۱۰۰ وات نشان می‌دهد که برابر ۹۴٪ است. برای شرایط بار کامل این راندمان به مقدار ۹۳٫۵٪ کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۶) راندمان مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVZCS با مدار کمکی فعال [۱۶]

در شکل (۶) مشاهده می‌شود که راندمان در شرایط بار کامل نسبت به مبدل قبلی افزایش یافته است. اما از طرفی حداکثر راندمان به صورت بسیار ناچیز کاهش می‌یابد، این اتفاق از آن جهت اهمیت دارد که این امر در توان‌های کم‌تر اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر حداکثر راندمانی که در توان ۲۳۰۰ وات به وجود می‌آید اکنون در توان ۲۱۰۰ وات رخ می‌دهد. در ادامه مبدل DC-DC سه‌سطحی با کلیدزنی ولتاژ و جریان صفر توسط مدار کمکی غیرفعال بررسی می‌شود که این ایراد در آن برطرف شده است.

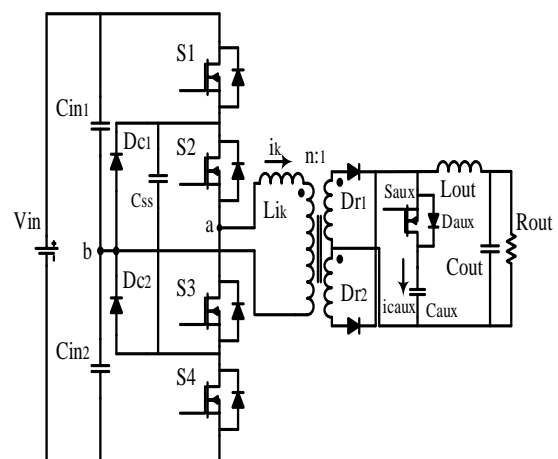
### ۳-۳ مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVZCS با مدار کمکی غیرفعال

یکی از معایب مبدل قبلی که بسیار حائز اهمیت است ضرورت اضافه کردن یک کلید فعال برای کاهش جریان چرخشی در طول عملکرد آزادانه است. این کلید علاوه بر افزایش قیمت مبدل باعث کاهش بهره‌وری مبدل می‌شود

در ادامه سه مبدل DC-DC با کلیدزنی نرم به روش ZVZCS آمده است. این روش ترکیبی از دو روش کلیدزنی در جریان صفر و ولتاژ صفر می‌باشد. کلیدزنی در جریان صفر برای کلیدهای آی‌جی‌بی‌تی و کلیدزنی در ولتاژ صفر برای کلیدهای ماس‌فت مناسب می‌باشد. بنابراین در طراحی مبدل‌هایی که در ادامه آمده است از این ویژگی برای بهبود بهره‌وری استفاده شده است.

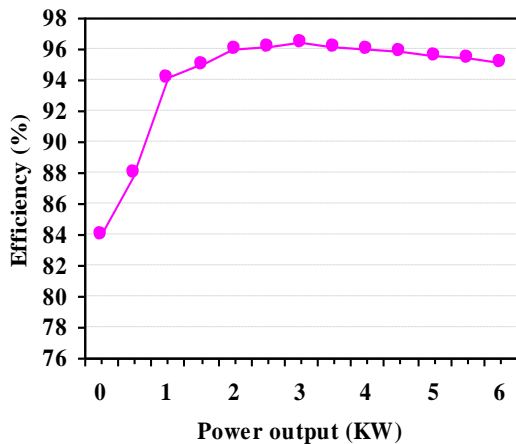
### ۲-۳ مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVZCS با مدار کمکی فعال

این مبدل در شکل ۵ نشان داده شده است. این مبدل در واقع بهبود یافته مبدل شکل ۳ می‌باشد. برای این منظور یک مدار کمکی فعال در سمت دوم ترانسفورماتور به مبدل اضافه شده است. خازن CSS سبب گردیده تا کلیدهای S1 و S4 با کلیدزنی ولتاژ صفر عمل کنند. هدف اصلی مدار کمکی این می‌باشد که جریان اولیه‌ی ترانسفورماتور در مرحله‌ی عملکرد آزادانه بازنشانی شود تا علاوه بر کاهش جریان چرخشی از این طریق کلیدهای S2 و S3 تحت کلیدزنی جریان صفر عمل کنند. این اتفاق زمانی می‌افتد که کلید Saux روشن باشد تا از این طریق خازن Caux به عنوان منبع ولتاژ موقتی انرژی لازم را برای بازنشانی جریان چرخشی فراهم کند. لازم به ذکر است که این مبدل در هشت مرحله‌ی از کلیدزنی عمل انتقال توان را انجام می‌دهد.



شکل (۵) مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVZCS با مدار کمکی فعال [۱۶]

این نمودار تضمین می‌کند که راندمان مبدل نسبت به مبدل قبلی ارتقا یافته است. می‌توان مشاهده کرد که حداکثر بهره‌وری این مبدل در اطراف توان خروجی ۲۴۰۰ وات رخ می‌دهد که مقدار آن برابر با ۹۶٫۲٪ می‌شود. بر اساس این نمودار، مبدل جدید در شرایط بار کامل از مقدار بهره‌وری ۹۵٫۱٪ برخوردار می‌گردد. از این رو شاهد افزایش ۱٫۶٪ راندمان نسبت به مبدل قبلی هستیم.



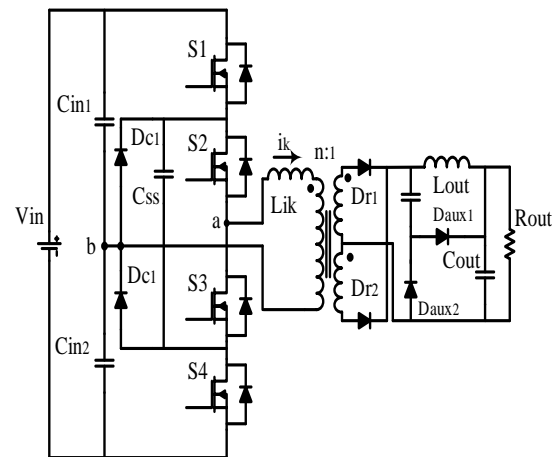
شکل (۸) راندمان مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVZCS با مدار کمکی غیرفعال [۱۷]

### ۴-۳ مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVZCS با مدار

#### کمکی غیرفعال در سمت نخست ترانسفورماتور

این مبدل در شکل ۹ نشان داده شده است. عمل کلیدزنی این مبدل در پنج مرحله رخ می‌دهد. مدار کمکی این مبدل تنها شامل دو دیود و یک ترانسفورماتور کمکی با سه سیم‌پیچ کوچک می‌باشد. سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور کمکی به صورت سری با سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور اصلی قرار دارد. هم‌چنین دو سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور کمکی بین دیودهای کمکی DA1 و DA2 و کلیدهای S1 و S4 متصل شده است. کلیدهای S1 و S4 تحت شرایط کلیدزنی ولتاژ صفر و کلیدهای S2 و S3 به یاری مدار کمکی، تحت شرایط کلیدزنی جریان صفر عمل می‌کند. کلیدزنی جریان صفر از طریق جذب انرژی سیم‌پیچ نشتی LİK توسط مدار کمکی اتفاق می‌افتد. سیم‌پیچ نشتی LİK مجموع سیم‌پیچ نشتی ترانسفورماتور اصلی و کمکی است. زمانی که جریان اولیه ILK مثبت است دیود DA1 روشن می‌شود و عکس این قضیه برای روشن شدن DA2 اتفاق می‌افتد.

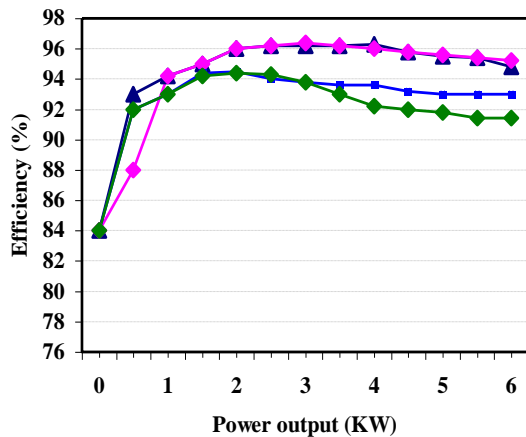
زیرا خاموش شدن آن به صورت سخت اتفاق می‌افتد. به منظور بهبود مبدل قبلی، در این قسمت یک مبدل DC-DC سه‌سطحی با کلیدزنی ولتاژ و جریان صفر با مدار کمکی ساده در سمت دوم ترانسفورماتور در [۱۷] بررسی شده است. این بررسی افزایش کارایی مبدل قبلی را نشان می‌دهد. این مبدل را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. طبق تصویر، مدار کمکی فقط شامل دو دیود و یک خازن است که علاوه بر سادگی نسبت به مبدل قبلی، قیمت آن نیز کاهش یافته است. هم‌چنین از آنجایی که تلفات هدایت و کلیدزنی کم‌تری به دست می‌آید راندمان مبدل بهتر می‌شود.



شکل (۷) مبدل DC-DC سه‌سطحی ZVZCS با مدار کمکی غیرفعال [۱۷]

این مبدل در هشت مرحله عمل کلیدزنی را انجام می‌دهد. کلیدهای S1 و S4 به صورت کلیدزنی ولتاژ صفر و کلیدهای S2 و S3 به صورت کلیدزنی جریان صفر عمل کلیدزنی را انجام می‌دهند. مدار کمکی این مبدل مانند مدار کمکی مبدل قبلی عمل بازنشانی جریان اولیه ترانسفورماتور را بر عهده دارد. وقتی کلیدهای S1 و S4 خاموش هستند خازن اسنابر Caux به‌عنوان یک منبع ولتاژ موقتی برای بازنشانی جریان چرخشی موجود در سمت اولیه عمل می‌کند. این مبدل به ازای ولتاژ ورودی ۶۶۰ الی ۸۰۰ ولت، ولتاژ خروجی ۴۲ الی ۵۸ ولت، جریان خروجی ۱۱۵ آمپر و فرکانس کلیدزنی ۱۰۰ کیلوهرتز در [۱۷] پیاده‌سازی شده است. بهره‌وری این مبدل به‌عنوان تابعی از توان خروجی و به ازای ولتاژ ورودی ۸۰۰ ولت و ولتاژ خروجی ۵۲ ولت طبق شکل ۸ ترسیم شده است.

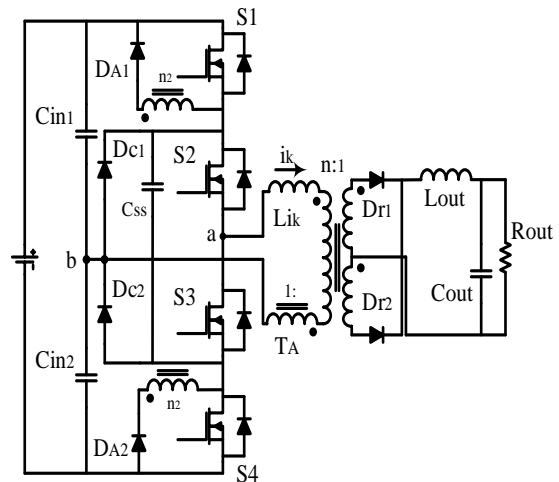
است. واضح است که این بهبود بهره‌وری به دلیل کاهش انرژی چرخشی در مبدل به دست آمده است. طبق این نمودار مشخص است که بهره‌وری حاصله در شرایط بار کامل برای مبدل سه سطحی با کلیدزنی ولتاژ و جریان صفر با مدار غیرفعال در سمت ثانویه کمی بهتر است.



شکل (۱۱) مقایسه بهره‌وری مبدل DC-DC سه سطحی ZVS و ZVZCS

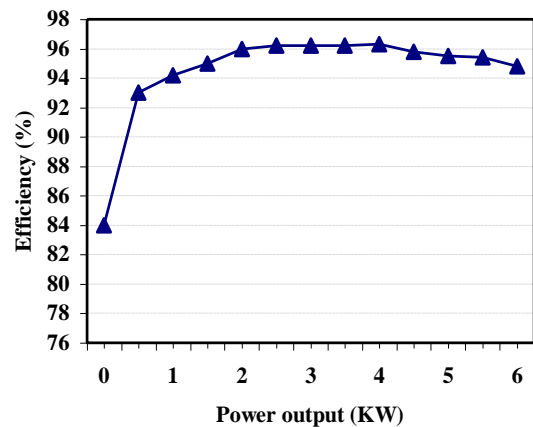
#### ۵- شبیه‌سازی

در این بخش مبدل DC-DC سه سطحی [۱۹] که در مقالات متعددی گزارش شده شبیه‌سازی می‌شود تا عملکرد کلیدزنی آن بررسی شود. طبق شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در این مبدل از ساختار سه سطحی به منظور کاهش فشار ولتاژ بر روی کلیدهای قدرت استفاده شده است. این وظیفه بر عهده خازن‌های مقسم ولتاژ ورودی  $C_{i1}$  و  $C_{i2}$  می‌باشد. بنابراین افت ولتاژ بر روی هر کلید نصف ولتاژ ورودی است. دیودهای  $D_5$  و  $D_6$ ، دیودهای مهارکننده هستند که وظیفه محدود کردن ولتاژ کلیدهای  $S_1$  و  $S_4$  را بر عهده دارند چراکه ولتاژ این کلیدها از نصف ولتاژ ورودی تجاوز می‌کنند بنابراین باید محدود گردد. خازن  $C_{ss}$  که خازن شناور نامیده می‌شود مسیری است برای شارژ و دشارژ ولتاژ خازن‌های پارازیتی  $S_1$  و  $S_4$  که از این طریق کلیدزنی در ولتاژ صفر را برای کلیدها مهیا می‌سازد. کلیدهای  $S_1$  و  $S_4$  ماسفت هستند و خازن پارازیتی این کلیدها منجر به ایجاد تلفات توان می‌شود، اما با به‌کارگیری روش کلیدزنی در ولتاژ صفر باعث می‌شود وجود این خازن‌های پارازیتی فرصتی برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم فراهم آورد.



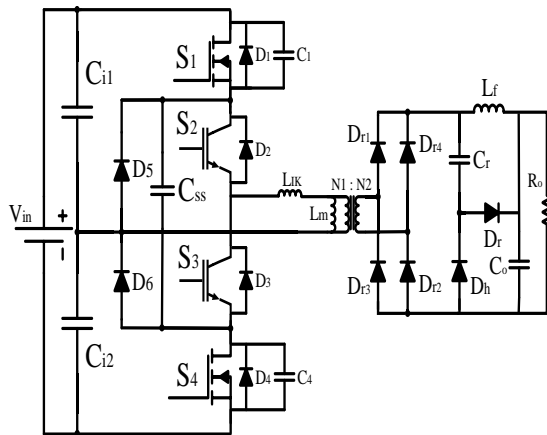
شکل (۹) مبدل DC-DC سه سطحی ZVZCS با مدار کمکی غیرفعال [۱۸].

نمودار بهره‌وری این مبدل به ازای ولتاژ ورودی ۸۰۰ ولت و خروجی ۵۲ ولت در شکل ۱۰ ترسیم شده است. این نمودار حداکثر بهره‌وری مبدل را در اطراف توان خروجی ۳۵۰۰ وات برابر ۹۶٫۲٪ نشان می‌دهد. در صورتی که این مقدار بهره در مبدل قبلی به ازای توان خروجی ۲۴۰۰ وات به دست می‌آمد.



شکل (۱۰) راندمان مبدل DC-DC سه سطحی ZVZCS با مدار کمکی در سمت نخست ترانسفورماتور [۱۸].

در ادامه نموداری آمده است که بهره‌وری این چهار مبدل را به‌طور هم‌زمان از لحاظ توان خروجی مقایسه می‌کند. این نمودار را می‌توان در شکل ۱۱ مشاهده کرد. طبق این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که بهره‌وری تمامی مبدل‌های DC-DC سه سطحی با کلیدزنی ولتاژ و جریان صفر از مبدل DC-DC سه سطحی با کلیدزنی ولتاژ صفر پیش‌تر



شکل (۱۲) شمای مداری مبدل DC-DC شبیه‌سازی شده [۱۹].

### ۵-۱ نتایج شبیه‌سازی

مبدل DC-DC سه‌سطحی [۱۹] به ازای ولتاژ ورودی ۸۰۰ ولت، ولتاژ خروجی ۲۵ ولت و فرکانس کلیدزنی ۶۵ کیلوهرتز شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی بر اساس مشخصه‌های عناصر این مبدل که در [۱۹] گزارش شده، صورت پذیرفته است. این مشخصه‌ها را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

جدول (۱) مشخصات عناصر مبدل [۱۳].

عناصر	مقدار
$C_{i1}, C_{i2}$	2.2mF
$C_o$	6600 $\mu$ F
$C_r$	1000 $\mu$ F
$L_f$	40 $\mu$ H
$L_m$	200 $\mu$ H
$L_{IK}$	2.2 $\mu$ H
$N_1:N_2$	5:1

شکل ۱۳ شکل موج ولتاژ و جریان کلید  $S_1$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هنگامی که کلید  $S_1$  وصل می‌شود جریان عبوری از آن در نزدیکی‌های صفر است. از این رو کلید  $S_1$  در کلیدزنی ولتاژ صفر روشن می‌شود. شکل ۱۴ نیز مربوط به کلید  $S_2$  می‌باشد. این تصویر بیان‌گر آن است که قبل از خاموشی کلید  $S_2$  ابتدا جریان عبوری از آن کاهش پیدا می‌کند. لذا به هنگام خاموشی کلید، هم‌پوشانی ولتاژ و جریان کمینه است. شکل موج کلید  $S_3$  و  $S_4$  به ترتیب مشابه  $S_1$  و  $S_2$  است.

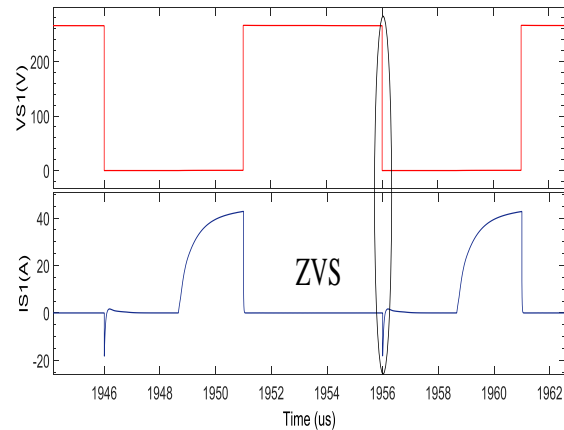
دشارژ خازن‌های پارازیتی کلیدهای  $S_1$  و  $S_4$  از طریق انرژی ذخیره در سلف ترانسفورماتور ( $L_{IK}$ ) صورت می‌گیرد که در نهایت باعث می‌شود تا این کلیدها در ولتاژ صفر هدایت کرده و یا قطع شوند که در این صورت تلفات توان به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. البته باید در نظر داشت که انتخاب مقدار سلف بسیار حائز اهمیت است چراکه تأثیر به‌سزایی در افزایش و کاهش تلفات توان دارد. کلیدزنی در ولتاژ صفر می‌شود و از سوی دیگر موجب افزایش جریان چرخشی در مدار شده و تلفات بیش‌تر را به‌همراه خواهد داشت. کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$  کلیدهای آی‌جی‌بی‌تی هستند و ضعف آن‌ها بازیابی کند و جریان دنباله می‌باشد. برای رفع این مشکل باید از روش کلیدزنی در جریان صفر بهره گرفت. برای این منظور یک مدار کمکی در خروجی مبدل قرار داده شده است تا در زمانی که جریان در سمت نخست ترانسفورماتور به‌صورت چرخشی است جریان خروجی را تأمین کند و از این طریق بتوان جریان چرخشی در سمت نخست را تا جای ممکن محدود کرد. با محدود کردن این جریان ضعف کلید آی‌جی‌بی‌تی تا حد زیادی برطرف شده و تلفات ناشی از آن کاهش محسوسی می‌یابد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد کلیدزنی در جریان صفر برای کلیدهای آی‌جی‌بی‌تی بهینه از کلیدهای ماسفت است، به همین دلیل از کلیدهای آی‌جی‌بی‌تی در این مبدل در استفاده شده است. ترانسفورماتور به‌کار رفته علاوه بر کاهش سطح ولتاژ خروجی، وظیفه جداسازی ورودی و خروجی را بر عهده دارد. دیودهای  $Dr_1$  الی  $Dr_4$  دیودهای یک‌سوساز سریع هستند و خروجی آن‌ها شکل موجی همراه با نوسان است که نیاز به فیلتر دارد. فیلتر خروجی شامل سلف  $L_f$  و خازن  $C_o$  می‌باشد که وظیفه کاهش نوسان جریان و ولتاژ را بر عهده دارد. وجود مدار کمکی در کنار فیلتر که شامل خازن  $C_r$  و دیودهای  $Dr$  و  $D_h$  می‌باشد کمکی برای فیلتر خروجی است. نحوه عملکرد مدار کمکی به این صورت است که از طریق سلف  $L_f$  و یا  $Dr$ ،  $C_o$  و  $R_o$  شروع به شارژ می‌کند و زمانی که جریان چرخشی در سمت نخست صفر می‌شود به فیلتر خروجی در تأمین جریان بار کمک می‌کند.



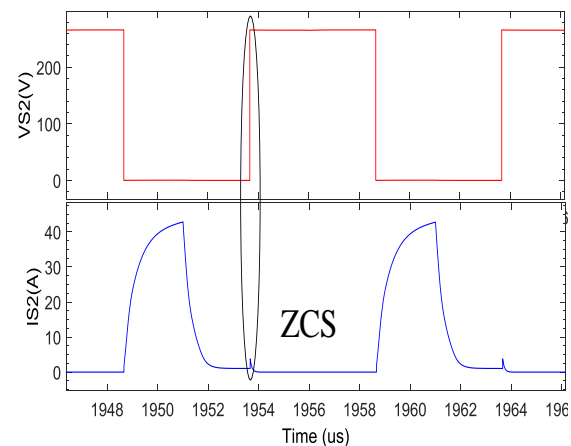
بهره‌وری زیاد در مبدل‌های قدرت بسیار حائز اهمیت در صنعت کشتی‌سازی خواهد بود.

#### ۷- مراجع

- [1] L. M. Wu, and P.S. Chen, "Interleaved Three-Level LLC Resonant Converter with Fixed-Frequency PWM Control", IEEE International Conference Telecommunications Energy, pp. 1-8, 2014.
- [2] P. Das, M. Pahlevaninezhad and A. K. Singh, "A Novel Load Adaptive ZVS Auxiliary Circuit for PWM Three-Level DC-DC Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 4, pp. 2108-2126, 2015.
- [3] A. Mousavi and G. Moschopoulos, "A New ZCS-PWM Full-Bridge DC-DC Converter with Simple Auxiliary Circuits", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 3, pp. 1321-1330, 2014.
- [4] W. Xin, X. Yibo and F. Huajing, "Study on an Improved DC-DC Converter Based on ZVZCS PWM Three Level," Int. Conf. on E-Business and Info. Syst. Sec. (EBISS), 2010.
- [5] F. Liu, J. Yan and X. Ruan, "Zero-Voltage and Zero-Current-Switching PWM Combined Three-Level DC-DC Converter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 5, pp. 1644-1654, 2010.
- [6] J. A. Carr, B. Rowden and J. C. Balda, "A Three-Level Full-Bridge Zero-Voltage Zero-Current Switching Converter with a Simplified Switching Scheme", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 2, pp. 329-338, 2009.
- [7] M. Narimani, G. Moschopoulos and D. Wijeratne, "A Comparative Study of Three-Level DC-DC Converters", IEEE International Conference on Power Electronics, pp. 3971-3976, 2013.
- [8] Y. Shi and X. Yang, "Wide Range Soft Switching PWM Three-Level Combined DC-DC Converter without Added Primary Clamping Devices," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 10, pp. 5157-5171, 2014.
- [9] Y. Shi, and X. Yang, "Wide Load Range ZVS Three-Level DC-DC Converter: Four Primary Switches, Capacitor Clamped, Two Secondary Switches and Smaller Output Filter Volume", IEEE Transactions



شکل (۱۳) شکل موج کلید S1 مبدل شبیه‌سازی شده [۱۹].



شکل (۱۴) شکل موج کلید S2 مبدل شبیه‌سازی شده [۱۹].

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، دو روش کلیدزنی نرم ZVS و ZVZCS در مبدل DC-DC سه‌سطحی برای به‌کارگیری در سیستم توزیع نیروی شناورها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. مطابق با نمودارهای ترسیم شده بیشینه بهره‌وری مبدل DC-DC با ساختار سه‌سطحی تحت کلیدزنی ولتاژ و جریان صفر رخ می‌دهد. معمولاً برای تحقق ZVS از انرژی ذخیره شده در ترانسفورماتور استفاده می‌شود. افزایش ویژگی سلفی به‌منظور تحقق کلیدزنی در ولتاژ صفر تبعاتی از جمله تلفات بیشتر و نوسان ولتاژ در ثانویه ترانسفورماتور را به‌دنبال خواهد داشت. هم‌چنین افزایش بیش‌تر راندمان، پیچیدگی و افزایش قیمت مبدل را به همراه دارد. بنابراین طراحی هوشمندانه مدارهای کمکی نقش به‌سزایی در کاهش پیچیدگی و قیمت مبدل‌های قدرت دارد. از این رو طراحی مدار کمکی ساده و ارزان قیمت جهت تحقق کلیدزنی نرم و هم‌چنین برخورداری از

- [15] B. Song, R. Mcdowell and A. Bushnell, "A Three-Level DC-DC Converter with Wide-Input Voltage Operations for Ship-Electric-Power-Distribution Systems", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 32, No. 5, pp. 1856-1863, 2004.
- [16] F. Canales, P. Barbosa and F. C. Lee, "A Zero-Voltage and Zero-Current Switching Three-Level DC-DC Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 6, pp. 898-904, 2002.
- [17] F. V. C. Abarca, "Novel DC-DC Converters for High-Power Distributed Power Systems", Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, United States, 2003.
- [18] S. J. Jeon, F. Canales, P. M. Barbosa and F. C. Lee, "A Primary-Side-Assisted Zero-Voltage and Zero-Current Switching Three-Level DC-DC Converter with Phase-Shift Control", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 2, No. 3, pp. 641-647, 2002.
- [19] A. Jangwanitlert, "An Improved Three-Level Zero-Voltage and Zero-Current Switching PWM DC-DC Converter for Battery Charger", International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE), pp. 531-537, 2014.
- on Power Electronics, Vol. 31, No. 5, pp. 3431-3443, 2016.
- [10] P. Das, M. Pahlevaninezhad, G. Moschopoulos and P. Jain, "A Novel Three-Level DC-DC Converter with Load Adaptive ZVS Auxiliary Circuit", IEEE International Conference on Power Electronics, pp. 38-43, 2013.
- [11] B. R. Lin and C. H. Liu, "ZVS DC-DC Converter Based on Two Three-Level PWM Circuits Sharing the Same Power Switches", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 10, pp. 4191-4200, 2013.
- [12] K. Jin, X. Ruan, and F. Liu, "An Improved ZVS PWM Three-Level Converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, pp. 319-329, 2007.
- [۱۳] ادیب ابریشمی فر، منابع تغذیه سوئیچینگ، ۹-۱۶۶-۹۷۸-۹۶۴-۴۵۴، تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران، مرکز انتشارات، ۱۳۸۶.
- [14] E. Chu, X. Hou, H. Zhang, M. Wu and X. Liu, "Novel Zero-Voltage and Zero-Current Switching (ZVZCS) PWM Three-Level DC-DC Converter Using Output Coupled Inductor", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 3, pp. 1082-1093 2014.