

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲۸

## طراحی و ساخت اینورتر منبع جریان چندسطحی ماژولار بر مبنای ماژول‌های دوکلیدی

فرهاد محجل کاظمی<sup>۱</sup>، محمدرضا بنائی<sup>۲\*</sup>، مهراں صباحی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

f.mohajelkazemi@azaruniv.edu

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

m.banaei@azaruniv.edu

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

sabahi@tabrizu.ac.ir

**چکیده:** این مقاله معرفی ساختار جدیدی از مبدل‌های منبع جریان است که می‌تواند به صورت جایگزین در کاربردهای توان پایین / متوسط اجرا شود. این ساختار از بلوک‌های مبدل‌های ماژول‌متصل سری تشکیل شده است. اساس این ساختار چندسطحی که در این مقاله پیشنهاد شده، اتصال متناسب منابع جریان DC در طرحی مناسب با کمک مبدل H-bridge است. مبدل پیشنهادی، جریان خروجی AC چندسطحی مورد نیاز را با کلیدزنی جدید پیشنهادی تولید می‌کند. در این روش توصیه شده تعداد منابع جریان DC، کلیدها و مدارهای راه‌انداز مربوط در مقایسه با مبدل‌های چندسطحی قدیمی، کاهش پیدا کرده‌اند و در نتیجه هزینه و حجم در ساختار پیشنهادی کمتر شده است. برای نشان دادن مزیت‌های ساختار پیشنهادی و عملی بودن آن، مبدل شبیه‌سازی شده و همچنین نتایج آزمایشگاهی برای یک مبدل تک‌فاز هفت‌سطحی آماده و ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مبدل منبع جریان چندسطحی، مبدل‌های ماژولار، مبدل‌های سوئیچ کاهش‌یافته، روش‌های کلیدزنی اینورتر منبع جریان.

## ۱. مقدمه

امروزه، مبدل‌های چندسطحی منبع ولتاژ<sup>۱</sup> (VSI) و مبدل‌های منبع جریان چندسطحی<sup>۲</sup> (CSI) که در واقع دوگان مبدل‌های منبع ولتاژند و مبدل‌های با قدرت بالا محسوب می‌شوند، برای کاربردهای متعددی استفاده می‌شوند. توسعه کلیدهای قدرت نیمه‌رسانا با کارایی بالا مثل ترانزیستورهای دوقطبی با گیت روپوش‌دار<sup>۳</sup> (IGBTs) و MOSFETs باعث افزایش توجه به استفاده از مبدل‌های با قدرت بالا شده است [۱]. همان‌طور که مبدل‌های منبع ولتاژ چندسطحی با لینک DC ولتاژ چندسطحی در طرف بار ایجاد می‌کنند، اینورترهای منبع جریان نیز جریان خروجی با شکل موج چندسطحی در طرف بار ایجاد می‌کنند.

به‌تازگی استفاده مبدل‌های چندسطحی گسترش یافته است و برای بسیاری از کاربردها مانند ریزشبه‌ها<sup>۴</sup> [۴-۱]، سیستم‌های قدرت توزیع‌شده<sup>۵</sup> [۸-۵]، تنظیم سرعت موتورهای الکتریکی [۹-۱۱]، جبران‌سازی استاتیک قدرت راکتیو استفاده می‌شوند.

کیفیت توان بالا، استرس ولتاژ کمتر تجهیزات، سازگاری الکترومغناطیسی پایین‌تر، تلفات کلیدزنی (سوئیچینگ) کمتر، توانایی تولید ولتاژ و جریان بالاتر، قابلیت طراحی با استفاده از کلیدهای با فرکانس کلیدزنی پایین‌تر و همچنین اعوجاج هارمونیک کلی کمتر، از مزایای مشترک تمامی انواع مختلف مبدل‌های چندسطحی نسبت به مبدل‌های معمولی هستند [۱۲].

در استانداردهای بین‌المللی متفاوت مثل IEEE-929, EN-61000-3-2, 1547 کیفیت توان مثل طیف‌های هارمونیک و همچنین (THD)<sup>۶</sup> جریان و ولتاژ با همه جزئیات توضیح داده شده است.

علاوه بر ساختار مدار، روش کنترل و کلیدزنی اینورتر روی عملکرد مبدل و کیفیت جریان و ولتاژ خروجی تأثیر مستقیم دارد. برای بهبود عملکرد و کیفیت توان در مبدل‌های چندسطحی، روش‌های کلیدزنی و ساختارهای قدرتی مختلفی ارائه شده‌اند که هرکدام مزایا و ویژگی‌های متفاوتی دارند [۱۳-۱۵].

در شبکه‌های قدرت، برای برقراری ارتباط بین AC و DC اینورترهای منبع جریان چندسطحی می‌توانند یکی از بهترین جایگزین‌ها به‌جای اینورترهای مرسوم منبع ولتاژ باشند. کنترل شبکه

متصل به CSI در مقایسه با VSI آسان‌تر است؛ همچنین ایزوله کردن جریان خروجی از نوسانات ولتاژ شبکه، تولید جریان ازپیش تعیین‌شده مطلوب بدون نیاز به فیدبک خروجی، ضریب توان بالا و مقاوم بودن در برابر اتصال کوتاه شبکه از دیگر مزایای اینورترهای منبع جریان هستند [۱۶]. به‌طور کلی، موازی کردن چندین CSI سه‌سطحی پل H، که CHB<sup>۷</sup> قرارداد نامیده می‌شود، معمول‌ترین راه برای تولید شکل موج جریان چندسطحی است [۱۷]. این ساختار نیازمند منابع جریان DC جدا شده، تعداد زیادی از کلیدهای قدرت و همچنین مدارهای راه‌انداز [۱۸]، مانند دوگان خود، VSI چندسطحی کسکد (Cascaded) است.

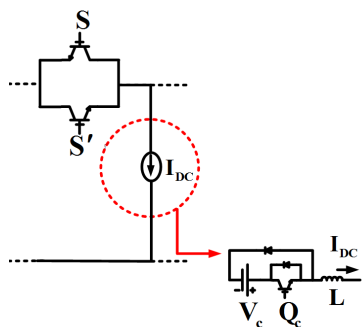
ساختارهای معرفی‌شده در مراجع [۱۹] و [۲۰] از خانواده اینورترهای منبع جریان CHB هستند که هرکدام نسبت به ساختار مرسوم مزایا و ویژگی‌های متفاوتی دارند. در مرجع [۱۹]، تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت کاهش یافته ولی تعداد منابع جریان DC ورودی در مقایسه با ساختار مرسوم CHB بیشتر است. در مرجع [۲۰]، با تغییر ساختار علاوه بر کاهش تعداد کلیدهای الکترونیک قدرت نسبت به ساختار CHB، تعداد منابع جریان DC تغییری نکرده است.

خانواده دیگر مبدل‌های منبع جریان چندسطحی ساختارهای چندسلولی مبتنی بر سلف است. اما مهم‌ترین مشکل این ساختار وجود سلف‌های بزرگی است که ثابت نگه داشتن جریان این سلف‌ها در مقدار مطلوب از مشکلات اساسی می‌باشد [۲۱]. اگرچه راه‌های فراوانی برای حل این مشکلات پیشنهاد شده است، همچنان استفاده از این سلف‌های بزرگ هزینه‌های هنگفتی نیاز دارد و باعث ایجاد محدودیت در این‌گونه ساختارهای CSI می‌شود [۲۱]. در مرجع [۲۲] یک روش کنترلی جدید برای کنترل جریان سلف‌های بزرگ در CSI چندسطحی مبتنی بر سلف پیشنهاد شده است که این ساختار نیز نیازمند سلف‌های بزرگ برای تثبیت جریان‌های هر سطح در مقدار مطلوب است که باعث تلفات بیشتر و کاهش بازده انتقال توان می‌شود و همچنین روش کنترلی بسیار پیچیده می‌باشد.

متأسفانه ساختارهای CSI تا به امروز زیاد مورد توجه قرار نگرفته‌اند، بنابراین نیازمند توجه و کار بیشتری است. مزایای بسیاری برای ساختارهای چندسطحی شمرده شده، ولی در کنار این مزیت‌ها، معایبی نیز دارند که اساسی‌ترین مشکل نیاز به تعداد زیادی از قطعات قدرت است که این مشکل، پیچیدگی مدار را افزایش می‌دهد و در نتیجه، هزینه افزایش و قابلیت اطمینان مبدل

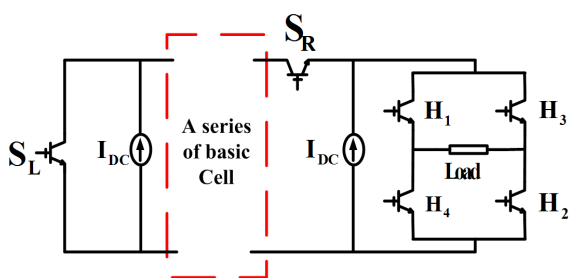
1. Voltage Source Inverters
2. Current Source Inverters
3. Insulated Gate Bipolar Transistor
4. Micro Grids
5. Distributed Power Systems
6. Total Harmonic Distortion

7. Cascaded H-Bridge



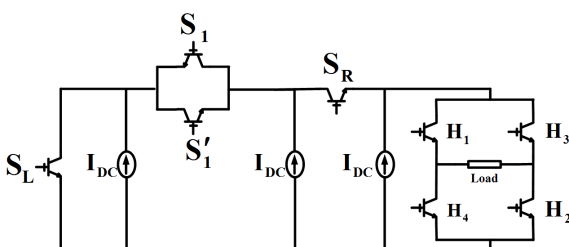
شکل (۱): واحد اساسی ساختار مبدل چندسطحی پیشنهادی

یک منبع جریان DC و کلیدهای الکترونیک قدرت دو طرفه، دو المان استفاده شده برای ساختن هر سلول اساسی هستند. در شکل (۲) ساختار پیشنهادی به نمایش گذاشته شده است، که اتصال سری از چندین واحد اساسی در یک اتصال مناسب با پل H و دو منبع DC با کلیدهای مربوط می‌باشد. در ساختار پیشنهادی، دامنهٔ منابع جریان DC برابر با  $I_{DC}$  است.



شکل (۲): ساختار مبدل چندسطحی پیشنهادی

همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است، دو منبع جریان با دامنهٔ  $I_{DC}$  و کلیدهای  $S_L$  و  $S_R$  و ساختار پل H یک قسمت اساسی و ثابت مدار هستند. قسمت دیگر ساختار پیشنهادی، سری شدن ماژول‌های دوکلیدی به مدار هستند که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. هرچقدر تعداد ماژول بیشتری سری شود، تعداد سطوح جریان خروجی افزایش می‌یابد. برای مثال با سری کردن فقط یک ماژول<sup>۵</sup> با این ساختار می‌توان یک جریان خروجی هفت‌سطحی از مبدل به دست آورد (شکل ۳).



شکل (۳): ساختار مبدل پیشنهادی هفت‌سطحی با استفاده از یک ماژول سری شده

کاهش می‌یابد [۱۹]. بنابراین، مهم‌ترین مسئله از لحاظ ساختاری، کاهش تعداد قطعات است. بنابراین ارائهٔ مدارهای مبدل‌های چندسطحی جدید با دستاورد بهتر و کاهش تعداد قطعات، می‌تواند ایدهٔ مناسبی در نظر گرفته شود.

در این مقاله، یک ساختار جدید مبدل منبع جریان چندسطحی مقارنی<sup>۱</sup> پیشنهاد می‌شود که می‌تواند در کاربردهای با قدرت کم و متوسط، جایگزین خوبی برای مبدل‌های مرسوم باشد. اینورتر منبع جریان چندسطحی پیشنهادی با توجه به خاصیت افزایش‌دهنده، در کاربردهایی مانند اتصال تک‌مرحله‌ای منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله اتصال پانل‌های خورشیدی<sup>۲</sup> [۲۳] و سلول‌های سوختی<sup>۳</sup> [۲۴] به شبکه می‌تواند عملکرد بسیار مطلوبی داشته و قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به اینورترهای منبع ولتاژ ایجاد کند.

برای نشان دادن عملکرد مناسب مبدل پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی و عملی آزمایشگاهی ارائه داده شده است. در بخش دوم مقاله، ساختار پیشنهادی، روش کنترلی و کلیدزنی توضیح داده می‌شود. در بخش سوم، مقایسهٔ ساختار پیشنهادی با ساختارهای مرسوم از نظر تعداد منابع، تعداد کلید، مدارات راه‌انداز و تلفات مبدل ارائه می‌شود. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی و نتایج عملی نشان داده شده‌اند و در نهایت بخش آخر نتیجه‌گیری کلی از مقاله است.

## ۲. مبدل پیشنهادی

اصلی‌ترین نقص مبدل‌های چندسطحی نیازمند بودن به تعداد زیادی از قطعات قدرت است. به‌طور کلی، تعداد عناصر مورد نیاز بستگی به سطح جریان خروجی دارد. در نتیجه، افزایش تعداد سطوح در جریان خروجی، باعث افزایش تعداد قطعات می‌شود. در ساختار مبدل‌های چندسطحی، عناصر مهم عبارت‌اند از: منبع تغذیهٔ DC، سلف‌ها، کلیدها و مدارهای راه‌انداز مربوط. اتصال چندین سلول به روش مناسب با کمک شش کلید و دو منبع تغذیهٔ DC اضافی، اساس کار روش پیشنهادی‌اند. در این ساختار راه‌های متفاوتی برای تولید شکل‌موج جریان خروجی با همهٔ سطوح و با پلاریتهٔ مثبت و منفی در شکل‌موج خروجی ارائه می‌شود. شکل (۱) نشان‌دهندهٔ واحد اساسی<sup>۴</sup> ساختار مبدل چندسطحی پیشنهادی است.

1. Symmetric Multilevel Current Source Inverter
2. Photovoltaics
3. Fuel Cells
4. Basic Unit

و کاهش تعداد المان‌های مورد نیاز می‌تواند ایده خوبی باشد. مقایسه المان‌های استفاده‌شده در مبدل چندسطحی پیشنهادشده، با ساختار مرسوم CHB و مبدل‌های چندسطحی متقارن پیشنهادشده در مراجع [۱۹] و [۲۰] هدف اصلی این بخش از مقاله است.

به‌منظور مقایسه منطقی، حداکثر مقدار جریان خروجی و نیز تعداد سطوح خروجی برای همه مبدل‌های ذکرشده، یکسان در نظر گرفته می‌شود. کاهش تعداد منابع DC هزینه‌های کلی را کاهش می‌دهد، زیرا منابع DC در مقایسه با سایر المان‌ها گران هستند. به‌عبارت دیگر، مسئله اصلی که باعث گرانی مبدل‌ها شده، وجود تعداد زیاد منابع DC در ساختار مبدل است.

طبق جدول (۱) تعداد منابع DC ساختار پیشنهادی در مقایسه با مبدل پیشنهادشده مرجع [۱۹] نصف شده و در مقایسه با مبدل CHB و مبدل مرجع [۲۰] تعداد منابع برابر است. تعداد کلیدهای مورد نیاز برای مبدل پیشنهادشده در مقایسه با مبدل CHB با همان تعداد سطوح خروجی کاهش یافته و تقریباً به نصف رسیده است که در جدول (۱) مشخص است. همچنین طبق جدول (۱) در مقایسه با مرجع [۲۰] نیز تعداد کلیدها کاهش یافته است.

علاوه بر این، در مرجع [۱۹] از چندین دیود که بر هزینه تأثیرگذارند، استفاده شده است که آن‌ها در مقایسه‌ها محاسبه نمی‌شوند. اگر هزینه دیودها به‌عنوان نصف هزینه IGBT در نظر گرفته شود، هزینه نهایی [۱۹] بسیار بیشتر از مبدل پیشنهادی در این مقاله است. میزان قدرت کلیدها که نقش کلیدی را در هزینه‌های کلی مبدل بازی می‌کند، جدی‌ترین نگرانی است. اگرچه کمی افزایش در مجموع SDP سیستم کلی در مقایسه با مبدل‌های مرسوم مشاهده می‌شود، می‌توان به دلیل کاهش چشمگیر در تعداد کلیدها، نادیده گرفت. با توجه به اینکه برای مبدل پیشنهادشده، تعداد کمتری از کلیدهای قدرت مورد نیاز است، مدارهای راه‌انداز کمتری برای ساختار ارائه‌شده استفاده می‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه در ساختار پیشنهادی بیشتر کلیدها امیتر مشترک‌اند، پیاده‌سازی مدار راه‌انداز ساده‌تر می‌شود.

شکل (۴) میزان افزایش تعداد کلیدهای قدرت با افزایش تعداد سطوح خروجی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، ساختار پیشنهادی با استفاده از تعداد کمتری از کلیدهای قدرت در مقایسه با مبدل CHB و مبدل مرجع [۲۰] برای هر تعداد خاصی از سطح خروجی، به‌طور کامل نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، با سری شدن یک مازول شامل کلیدهای  $S_1$  و  $S'_1$  و منبع  $I_{DC}$  ساختار هفت‌سطح به دست آمده است. اگر یک مازول دیگر به این ساختار اضافه شود، ساختار پیشنهادی قابلیت تولید جریان سه‌سطحی در خروجی را خواهد داشت.

اگر  $m$  تعداد سطح در جریان خروجی در مبدل پیشنهادی متقارن باشد،  $n$  تعداد منابع جریان DC مورد نیاز و  $N_{Switch}$  تعداد کلیدهای مورد نیاز باشد، روابط زیر برای مبدل پیشنهادی برقرار است:

$$n = \frac{m-1}{2} \quad (1)$$

$$N_{Switch} = m + 1 \quad (2)$$

$$I_{o,max} = \sum_{i=1}^{m-1} I_i = \frac{m-1}{2} I_{DC} \quad (3)$$

در معادله (۳) حداکثر جریان خروجی مبدل با  $I_{o,max}$  و جریان هر مازول با  $I_i$  نشان داده شده است. پالس‌های مورد نیاز کلیدزنی برای هر کلید، با مدار راه‌انداز مربوط نشان داده شده‌اند. در ساختار پیشنهادی، تعداد مدارات راه‌انداز که با  $N_{Driver}$  معرفی شده و تعداد کلیدها که یکسان هستند، در معادله (۴) آمده است:

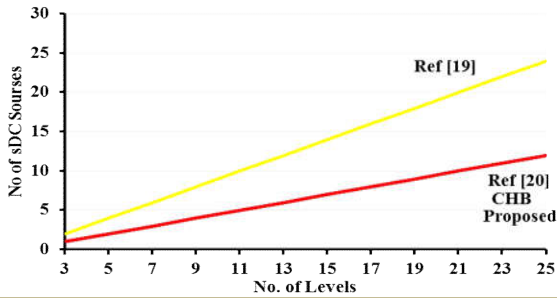
$$N_{Switch} = N_{Driver} \quad (4)$$

سطح توان کلید قدرت<sup>۱</sup> (SDP) یکی دیگر از فاکتورهای مهم مبدل‌های چندسطحی است. یکی از مهم‌ترین استانداردها برای اندازه‌گیری قیمت کلی، مبدل اجرایی SDP است که می‌تواند با معادله (۵) اندازه‌گیری شود. در این معادله، سطح توان کل مبدل با  $SDP_{Total}$  و سطح توان هر کلید با  $SDP_{Switch}$  بیان شده است. همچنین  $V_{Switch}$  و  $I_{Switch}$  به ترتیب ولتاژ دوسر کلید و جریان عبوری از کلید هستند.

$$SDP_{Total} = \sum_{j=1}^{N_{Switch}} SDP_{Switch_j} = \sum_{j=1}^{N_{Switch}} V_{Switch_j} \times I_{Switch_j} \quad (5)$$

### ۳. مقایسه ساختار پیشنهادی با ساختارهای مرسوم

همان‌طور که اشاره شد، نیاز به تعداد زیادی از قطعات الکترونیک قدرت، مشکل عمده مبدل‌های چندسطحی است. با افزایش تعداد قطعات، مدار پیچیده شده و باعث می‌شود که طرح و روش کنترل پیچیده‌تر باشد که هزینه را افزایش داده و قابل اطمینان مبدل را کاهش می‌دهد. پیشنهاد ساختار چندسطحی جدید با عملکرد بالا



شکل (۵): مقایسه تعداد منابع DC برحسب تعداد سطوح خروجی برای مبدل پیشنهادی و سه مبدل دیگر

### ۱.۳. تلفات توان مبدل‌ها

در حالت کلی تلفات توان مبدل‌های الکترونیک قدرت به دو بخش تقسیم می‌شود:

۱. تلفات هدایتی: این نوع تلفات به علت وجود مقاومت در مسیر و یک حالت افت ولتاژ از قطعات الکترونیک قدرت ایجاد می‌شود.

۲. تلفات کلیدزنی: این نوع تلفات به علت ویژگی‌های غیرایده‌آل کلیدهای قدرت در حالت کلیدزنی ناشی می‌شود.

محاسبه تلفات مبدل چندسطحی پیشنهادی به شرح زیر است:

#### ۱. محاسبه تلفات هدایتی

ارزیابی تلفات هر نوع کلید قدرت و دیدود در نهایت کل سیستم برای محاسبه تلفات هدایتی ضروری است. روابط زیر به ترتیب برای ارزیابی تلفات هدایتی IGBTها و دیودها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$P_{C,T}(t) = [V_T + R_T i^\beta(t)] i(t) \quad (6)$$

$$P_{C,D}(t) = [V_D + R_D i(t)] i(t) \quad (7)$$

در روابط بالا ولتاژ حالت یک ترانزیستور و دیود به ترتیب  $V_T$  و  $V_D$  نامیده می‌شود. مقاومت معادل ترانزیستور و دیود  $R_T$  و  $R_D$  بوده و  $t$  زمان ثابتی می‌باشد. مقاومت مشخصه ترانزیستور  $\beta$  در نظر گرفته شده است.

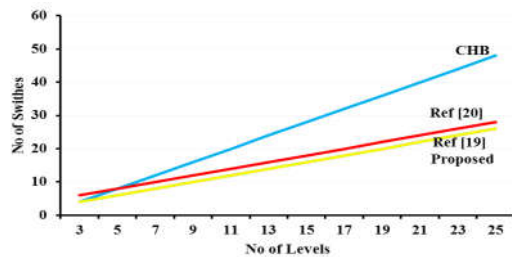
اگر  $x(t)$  و  $y(t)$  تعداد دیودها و ترانزیستورها در مسیر مبدل در هر لحظه از زمان در نظر گرفته شود با پیاده‌سازی (۶) و (۷)، تلفات هدایتی متوسط از مبدل چندسطحی پیشنهادی می‌تواند از رابطه زیر محاسبه شود [۱۰]:

$$P_C(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left[ \left( x(t)V_T + y(t)V_D + x(t)R_T i^\beta(t) + y(t)R_D i(t) \right) i(t) \right] d\omega t \quad (8)$$

1. Conduction Losses
2. Switching Losses

جدول (۱): مقایسه اینورتر پیشنهادی با اینورترهای مرسوم

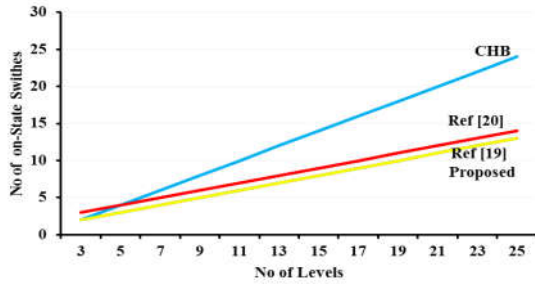
چندسطحی				
کمیت مورد مقایسه	ساختار [۲۰]	ساختار [۱۹]	ساختار مرسوم CHB	ساختار پیشنهادی
تعداد سطوح خروجی	$m$	$m$	$m$	$m$
بیشینه جریان خروجی	$\frac{m-1}{2} I_{DC}$	$\frac{m-1}{2} I_{DC}$	$\frac{m-1}{2} I_{DC}$	$\frac{m-1}{2} I_{DC}$
تعداد منابع DC	$\frac{m-1}{2}$	$m-1$	$\frac{m-1}{2}$	$\frac{m-1}{2}$
تعداد کلیدهای قدرت	$m+3$	$m+1$	$2m-2$	$m+1$
تعداد کلیدهای روشن	$\frac{m+3}{2}$	$\frac{m+1}{2}$	$m-1$	$\frac{m+1}{2}$
SDP (pu)	$\frac{m-1}{2} \times \frac{m+5}{2}$	$\frac{m+3}{2}$	$2m-2$	$\frac{m-1}{2} \times \frac{m+5}{2}$



شکل (۴): مقایسه تعداد کلیدهای قدرت برحسب تعداد سطوح خروجی برای مبدل پیشنهادی و سه مبدل دیگر

کاهش تعداد کلیدها در ساختار پیشنهادی نسبت به CHB به‌طور کامل مشهود است. همچنین مبدل پیشنهادی دو کلید کمتر از مبدل [۲۰] دارد و بنابراین هزینه مبدل پیشنهادی در این مقاله کمتر از این دو ساختار خواهد شد. همچنین اگر هزینه‌های دیودهای مرجع [۱۹] در نظر گرفته شود، ساختار پیشنهادی نسبت به ساختار مرجع [۱۹] مزیت داشته و از این به بعد کم‌هزینه‌تر است.

از طرف دیگر، هزینه منابع جریان DC مورد نیاز یک عامل اصلی دیگر قیمت مبدل‌هاست. بنابراین تعداد کلید و تعداد منابع DC دو عامل مهم در هزینه‌های کلی مبدل است. در شکل (۵) تعداد منابع جریان DC برحسب تعداد سطوح خروجی نشان داده شده است. بر اساس این شکل در مبدل پیشنهادی، تعداد منابع جریان DC در مقایسه با مرجع [۱۹] کمتر است و با تعداد منابع جریان مبدل CHB و مبدل [۲۰] برابر است.



شکل (۶): مقایسه تعداد کلیدهای روشن (تلفات مبدل) برحسب تعداد سطوح خروجی برای مبدل پیشنهادی و سه مبدل دیگر

## ۴. نتایج شبیه‌سازی و عملی مبدل پیشنهادی

### ۱.۴. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش از مقاله برای به اثبات رساندن عملکرد مطلوب مبدل چندسطحی پیشنهادی، مطالعات شبیه‌سازی آماده شده است. شبیه‌سازی مبدل در نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام شده است و یک نمونه متقارن شامل سه منبع DC و هشت کلید که در واقع ساختار هفت‌سطحی نشان داده شده در شکل (۳) می‌باشد، با جریان ۳۰ آمپر شبیه‌سازی شده است. در طرف بار یک مقاومت ۱۵ اهم با یک سلف ۱۵ میلی‌هائری سری شده است. همچنین با توجه به ماهیت اینورترهای چندسطحی منبع جریان، خازن ۱۰۰ میکروفاراد با این بار موازی شده است تا در برابر جهش جریان از  $di/dt$  محافظت کند [۱۸].

حالت‌های کلیدزنی مبدل پیشنهادی برای ایجاد هفت سطح مختلف در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در تمامی سطوح نصف کلیدها روشن بوده و همچنین یک مزیت مهم مبدل پیشنهادی این است که در تغییر از یک سطح به سطح دیگر، فقط یک کلید تغییر وضعیت می‌دهد که این مزیت موجب کمینه شدن تلفات کلیدزنی می‌شود. همچنین کلیدهای پل H می‌توانند از نوع فرکانس پایین انتخاب شوند چون با فرکانس قدرت تغییر وضعیت می‌دهند.

جدول (۲): حالت‌های کلیدزنی مبدل پیشنهادی

Output Voltage	$S_R S_L S_1 H_1 H_2 H_3 H_4$
$3 I_{dc}$	( 1011100)
$2 I_{dc}$	( 1101100)
$I_{dc}$	( 0101100)
0	( 0101010)
$-I_{dc}$	( 0100011)
$-2 I_{dc}$	( 1100011)
$-3 I_{dc}$	( 1010011)

## ۲. محاسبه تلفات کلیدزنی

این نوع تلفات برای یک کلید قدرت محاسبه می‌شود و سپس نتایج برای مبدل پیشنهاد شده از روی تعداد قطعات عمومیت پیدا می‌کند. تلفات کلی کلیدزنی قدرت به دو بخش تلفات IGBT و تلفات دیودهای موازی تقسیم می‌شود که می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود.

$$P_{sw,T} = (E_{on,T} + E_{off,T}) f_{sw} \quad (9)$$

$$P_{sw,Anti-D} = (E_{on,Anti-D} + E_{off,Anti-D}) f_{sw} \quad (10)$$

$$P_{sw,Anti-D} \approx E_{on,Anti-D} f_{sw}$$

اگر  $P_{sw,T}$  به عنوان تلفات قدرت کلیدزنی IGBT محسوب شود، میزان انرژی لازم برای روشن و خاموش کردن IGBT به ترتیب  $E_{on,T}$  و  $E_{off,T}$  و فرکانس کلیدزنی  $f_{sw}$  نامیده می‌شوند. اندیس  $Anti-D$  فاکتور مناسب برای دیودهای موازی معکوس را نشان می‌دهد. فرکانس کلیدزنی و روش مدولاسیون دو عامل مهم هستند که تلفات کلیدزنی به آن بستگی دارد. در نهایت، مجموع تلفات قدرت کلیدزنی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$P_{sw} = \sum_1^i P_{sw,T_i} + P_{sw,Anti-D_i} \quad (11)$$

درحالی که تعداد کلیدهای قدرت  $i$  است.

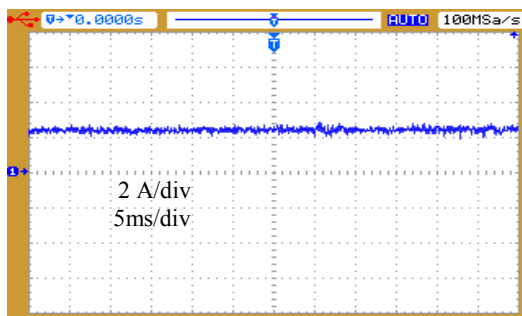
با توجه به روابط (۸) و (۱۱) تلفات کل مبدل چندسطحی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$P_{loss} = P_{sw} + P_C \quad (12)$$

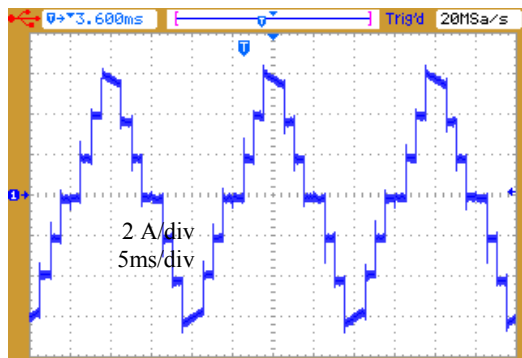
در ساختارهای منبع جریانی، معمولاً دیود موازی معکوس نیاز نیست، در نتیجه تلفات دیود می‌تواند صفر در نظر گرفته شود. تلفات قدرت کلی که مربوط به کلیدهای حالت روشن است، به عنوان مهم‌ترین عامل در مقایسه مبدل‌های مرسوم و مبدل پیشنهاد شده می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد، تلفات هدایتی به علت مقاومت معادل و افت ولتاژ همزمان بر روی کلیدهای قدرت است. شکل (۶) نشان‌دهنده تعداد کلیدهای حالت روشن برای مبدل پیشنهادی چندسطحی و سه مبدل دیگر است. همان‌طور که در شکل (۶) واضح است، تعداد کلیدهای قدرت حالت روشن مبدل پیشنهادی کمتر از CHB و مبدل [۲۰] بوده و بنابراین تلفات هدایتی کمتر خواهد بود. همچنین شایان ذکر است که حضور دیودها در مسیر جریان در مدار [۱۹] در این مقایسه ذکر نشده است. اگر تلفات دیودها محاسبه شود، تلفات ساختار [۱۹] بیشتر از تلفات مبدل پیشنهادی در این مقاله خواهد بود.

## ۲.۴. نتایج عملی

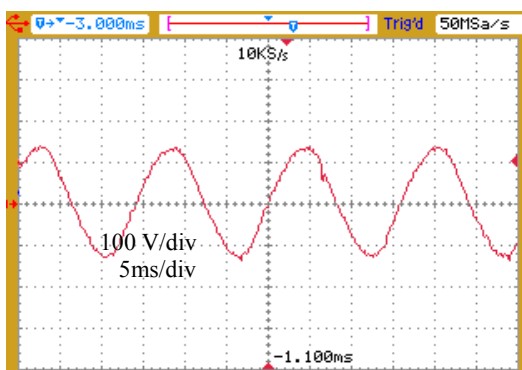
شکل (۳) می‌تواند نشان‌دهنده اجزای یک نمونه آزمایشگاهی تک‌فاز از مبدل پیشنهادی متقارن هفت سطحی باشد. همان‌طور که از شکل مشخص است، هشت ترانزیستور (IGBT) و سه منبع DC مورد نیاز است که مقدار منابع DC برای نمونه آزمایشگاهی ۲ آمپر در نظر گرفته شده و IGBTها از نوع BUP314 انتخاب شده‌اند [۲۵]. همچنین برای کلیدزنی IGBT از درایور HCPL316J استفاده شده است. بار انتخابی یک بار اهمی-سلفی با مقادیر ۱۵ اهم و ۲۰ میلی‌هنری می‌باشد که یک خازن ۱۰۰ میکرو فاراد با بار موازی شده است. شکل موج جریان خروجی و ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده در شکل (۸) نمایش داده شده است.



(الف)



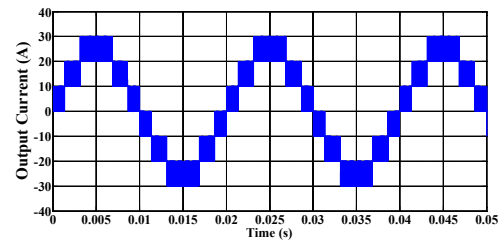
(ب)



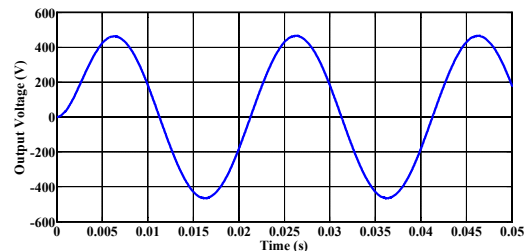
(ج)

شکل (۸): نتایج عملی: الف. جریان تثبیت‌شده هر منبع DC؛ ب. جریان هفت‌سطحی خروجی مبدل؛ ج. ولتاژ خروجی مبدل

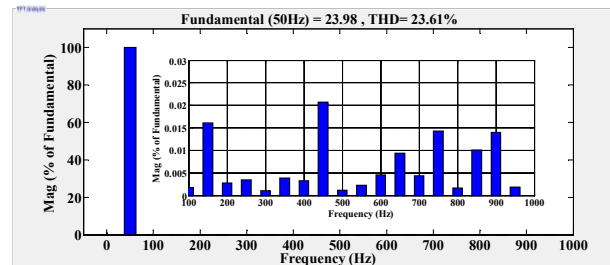
شکل (۷) به صورت جامع شکل موج جریان خروجی، ولتاژ خروجی، طیف و محتوای هارمونیک ولتاژ خروجی و طیف و محتوای هارمونیک جریان خروجی را نشان می‌دهد. در شکل (۷-الف) نشان داده شده که مبدل پیشنهادی جریان هفت‌سطحی مطلوبی در خروجی تولید کرده است و با توجه به بار اهمی-سلفی ولتاژ خروجی یک ولتاژ سینوسی با هارمونیک بسیار پایین است که طیف هارمونیک نیز نشان داده شده است.



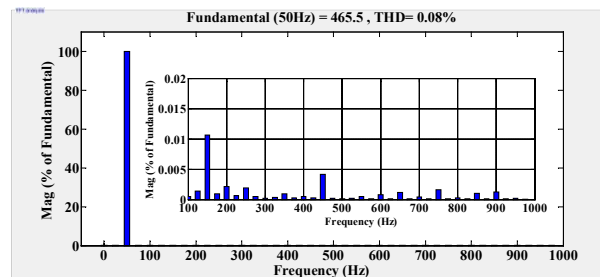
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی: الف. شکل موج جریان خروجی؛ ب. شکل موج ولتاژ خروجی؛ ج. طیف و محتوای هارمونیک جریان خروجی؛ د. طیف و محتوای هارمونیک ولتاژ خروجی

مقارن پیشنهاد می‌کند که تعداد قطعات استفاده‌شده در این اینورتر پیشنهادی، کمتر است. در حقیقت، در این ساختار تعداد منابع جریان و کلیدها و مدارهای راه‌انداز کمتری نسبت به دیگر ساختارهای مطرح‌شده نیاز است؛ بنابراین قیمت کلی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و همچنین کنترل و کلیدزنی مبدل آسان‌تر شده است. بخش مقایسه، نتایج سنجش بین مبدل پیشنهادی با مبدل مرسوم CHB و مبدلی را که اخیراً در مراجع معتبر طرح شده است، نشان می‌دهد که ثابت می‌کند مدار ارائه‌شده در این مقاله در مقایسه با ساختارهای دیگر، به‌طور قطعی منافع بیشتری دارد. برای اثبات امکان‌پذیری ساختار CSI چندسطحی پیشنهادی، یک نمونه آزمایشگاهی از ساختار مقارن پیشنهادی آماده شده است و طبق نتایج به‌دست‌آمده از مدار عملی، شکل امواج آزمایشی و عملی، مطابق با نتایج کامپیوتری مطلوب هستند.

همان‌طور که نشان داده شده، بیشینه جریان خروجی ۶ آمپر است که در واقع مجموع جریان منابع DC می‌باشد که هرکدام ۲ آمپر هستند. ولتاژ خروجی با توجه به نوع بار و عبور جریان هفت سطحی مطلوب یک ولتاژ تقریباً سینوسی مناسب با هارمونیک کم است.

با توجه به نتایج عملی، توانایی مبدل پیشنهادی در تولید شکل موج جریان خروجی به‌طور کامل نشان داده شده است. عملی بودن و قابل اعتماد بودن مبدل چندسطحی مقارن پیشنهادی شده را می‌توان در شکل (۸) مشاهده کرد که می‌تواند تمام سطوح مثبت و منفی جریان را برای یک مدار نمونه آزمایشگاهی تولید کند.

## ۵. نتیجه‌گیری

این مقاله یک ساختار جدید برای مبدل منبع جریان چندسطحی

## مراجع

- [1] Barzegarkhoo, R., Farhangi, M., Sing Lee, S., Aguilera, R., Siwakoti, Y., and Pou, J., "Nine-Level nine-switch common-ground switched-capacitor inverter suitable for high-frequency ac-microgrid applications", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 37, No.5, pp. 6132-6143, 2022.
- [2] Herrera. M., and Balal. A., "Implementing multilevel inverters and multiport DC-DC converters for microgrids", International Conference on Smart Communities, 2021.
- [3] Jayan, V., and Ghias, A.M., "A single-objective modulated model predictive control for a multilevel flying-capacitor converter in a DC microgrid", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 37, No. 2, pp.1560-1569, 2022.
- [4] Zhang, L., Sun, K., Huang, Z. and Li, Y. W., "A grid-tied photovoltaic generation system based on series-connected module integrated inverters with adjustable power factor", Proc. 2015 IEEE Energy Convers, pp. 6864-6870, 2015.
- [5] Yu Y., Konstantinou, G., Hredzak, B. and Agelidis, V. G., "Power balance of cascaded h-bridge multilevel converters for large scale photovoltaic integration", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, No. 1, pp. 292-303, 2016.
- [6] Jakkula, S., Jayaram, N., Pulavarthi, S., Shankar, Y., and Rajesh, J., "A generalized high gain multilevel inverter for small scale solar photovoltaic applications", IEEE Access, Vol. 10, No. 1, pp. 25175-25189, 2022.
- [7] Chen, Su. Y., Ming, Li. H., Lin Chen, P., and Tai Cheng. P., "Integration of PV panels and EV chargers on the modular multilevel converter based SST", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 68, No. 9, pp.6428-6437, 2022.
- [8] Kumar, S., Mishra, N., and Singh, B., "Multilevel converter with nearest level control for integrating solar photovoltaic system", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 58, No. 4, pp.5117-5126, 2022.
- [9] Elserougi, A., Abdelsalam, I., Massoud, A., and Ahmed, S., "Modular multilevel converter with self-energy equalization for medium



- voltage AC drive applications*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 68, No. 12, pp. 11881-11894, 2022.
- [10] Kirankumar, B., Siva Reddy, Y. V. and Vijayakumar, M., "Multilevel inverter with space vector modulation: intelligence direct torque control of induction motor", IET Power Electronics, Vol. 10, No. 10, pp. 1129-1137, 2017.
- [11] Cheerangal, M., Kumar Jain, A., Das, A., "Multiple fault tolerant control strategy for rotor field oriented induction motor drive fed from CHB converter with redundant cells", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 1, pp. 852-861, 2023.
- [12] Banaei, M.R., Jannati Oskuee, M.R. and Mohajel Kazemi, F., "Series h-bridge with stacked multicell inverter to quadruplicate voltage levels", IET Power Electronics, Vol. 6, No. 5, pp. 878- 884, 2013.
- [13] Lei, R., Chunying, G., Kaiyi, H. and Zhao, Y., "Modified hybrid modulation scheme with even switch thermal distribution for h-bridge hybrid cascaded inverters", IET Power Electronics, Vol. 10, No. 2, pp. 261-268, 2017.
- [14] Li, Y., Diao, F., Zhao, Y., and Mantooth, H., "A hybrid model predictive control for a seven-level hybrid multilevel converter with independent low-frequency and high-frequency stages", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 37, No. 5, pp. 5256-5271, 2022.
- [15] Banaei, M.R., Mohajel Kazemi, F. and Jannati Oskuee, M.R., "New mixture of hybrid stacked multicell with half-cascaded converter to increase voltage levels", IET Power Electronics, Vol. 6, No. 7, pp. 1406-1414, 2013.
- [16] Kwak, S. and Toliyat, H. A., "Multilevel converter topology using two types of current-source inverters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 6, pp. 1558-1564, 2006.
- [17] Suroso, Noguchi, T., "Multilevel current waveform generation using inductor cells and h-bridge current-source inverter", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 27, No. 3, pp. 1090-1098, 2012.
- [18] Das, R., and Le, H., "Gate driver circuits with discrete components for gan-based multilevel mlti-inductor hybrid converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 70, No. 2, pp. 1105-1114, 2023.
- [19] Suroso, Noguchi, T., "Common-Emitter topology of multilevel current-source pulse width modulation inverter with chopper-based dc current sources", IET Power Electronic, Vol. 4, No. 7, pp. 759-766, 2011.
- [20] Seifi Najmi, E. and Ajami, A., "Modular symmetric and asymmetric reduced count switch multilevel current source inverter", IET Power Electronics, Vol. 9, No. 1, pp. 51-61, 2016.
- [21] McGrath, B. P. and Holmes, D. G., "Natural current balancing of multicell current source inverter", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 23, No. 3, pp. 1239-1246, 2008.
- [22] Pablo Aguirre, M., Calvino, L., Inés Valla, M., "Multilevel current-source inverter with fpga control" IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, pp. 3-10, 2013.
- [23] Gnanasambandam, K., Edpuganti, A. and Kumar, A., "Modified synchronous pulse width modulation of current-fed five-level inverter for solar integration", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 32, No. 5, pp. 3370-3381, 2017.
- [24] Cossutta, P., Pablo Aguirre, M., Cao, A., Raffo, S. and Inés Valla, M., "Single-Stage fuel

*cell to grid interface with multilevel current-source inverters*", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 62, No. 8, pp. 5256-5264, 2015.

- [25] Data sheet of IGBT 'BUP 406', Available at: [www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)