

## یک اینورتر بهبود یافته تمام پل هفت کلید و هفت سطحی با تعداد کلیدهای فعال کم تر نسبت به ساختارهای متداول برای کاربردهای ولتاژ متوسط

امیرحسین اکبری<sup>۱</sup>، پورنگ اردلان<sup>۲</sup>، ادیب ابریشمی<sup>۳</sup>

a.hosein.a70@gmail.com

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشیار دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

اینورترهای چندسطحی استفاده‌های زیادی در کاربردهای ولتاژ متوسط و توان زیاد دارند و هم‌چنین به علت بازدهی مناسب، کاربردهای فوتوولتائیک بسیار استفاده می‌شوند. هرچه تعداد سطح‌های ولتاژ خروجی افزایش یابد، میزان تلفات در فیلتر خروجی کاهش می‌یابد ولی هزینه اینورتر افزایش می‌یابد. از این رو باید بین تعداد سطح‌ها و هزینه تمام شده یک مصالحه صورت گیرد. با اضافه شدن سطح‌های بیش تر اغتشاش هارمونیک کل در شکل موج ولتاژ و جریان خروجی کاهش پیدا می‌کند. در این مقاله، یک اینورتر تمام پل اصلاح شده هفت سطحی و هفت کلیدی ارائه شده است. اینورتر پیشنهادی نسبت به اینورترهای هفت سطحی دیگر دارای تعداد کلید فعال و در نتیجه تلفات هدایتی کم تر و مدار کنترلی ساده است. مدولاسیون استفاده شده باعث می‌شود که اینورتر پیشنهادی تحت هر دو شرایط توان اکتیو و توان راکتیو عمل کند. شبیه سازی اینورتر در توان 30kVA به وسیله نرم افزار PSpice، صحت توپولوژی پیشنهادی و روش مدولاسیون را تایید می‌کند.

واژگان کلیدی: اینورتر چندسطحی، ولتاژ متوسط، کاربردهای فوتوولتائیک، تلفات هدایتی کم تر، توان اکتیو و راکتیو.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۵/۱۲

## ۱- مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر<sup>۱</sup> در حدود ۱۹٪ از کل منابع انرژی مصرف شده در سال ۲۰۱۲ را به خود اختصاص داده‌اند [۱]. این منابع شامل خورشیدی<sup>۲</sup>، بادی و ... می‌باشند. منابع تجدیدپذیر، منابع در دسترس، پاکیزه و تمام‌نشده انرژی می‌باشند. در حال حاضر، با توجه به رشد روزافزون جمعیت جهان، صنعتی شدن کشورهای در حال توسعه و بهبود سطح زندگی مردم، میزان مصرف سوخت‌های فسیلی رو به افزایش است. مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی، نه تنها منجر به کاهش ذخایر انرژی فسیلی شده، بلکه سبب افزایش آلودگی هوا و در نتیجه افزایش بیماری‌های ناشی از آن می‌شود. بنابراین، با توجه به مشکلات سوخت‌های فسیلی و افزایش انرژی مورد نیاز جهان، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. توسعه سیستم‌های بهره‌برداری از انرژی تجدیدپذیر سبب حل مشکلاتی از قبیل بهبود قابلیت اطمینان تولید انرژی، کاهش آلودگی زیست‌محیطی، حل مشکلات تأمین انرژی محلی و بهبود استاندارد زندگی می‌شود.

با کاهش هزینه سلول‌های خورشیدی، تمرکز قیمت از روی سلول خورشیدی برداشته شده و بر روی اینورترهای مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از اینورترهای دوسطحی معمول، برخلاف سادگی در ساختار و مدار کنترلی آن، تلفات زیادی دارد که این خود سبب کاهش بازدهی کل ماژول فوتوولتائیک می‌گردد. از این رو، تمرکز بر روی اینورترهای بیش‌تر از دو سطح قرار گرفته است. از مزیت‌های اینورترهای چندسطحی در مقایسه با مبدل‌های ولتاژ دو سطحی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- پله ولتاژ خروجی کوچک‌تر

- هارمونیک کم‌تر

- سازگاری الکترومغناطیسی بیش‌تر

- تلفات کلیدزنی کم‌تر

هم‌چنین به وسیله افزایش تعداد سطح‌ها در مبدل، پله‌های بیش‌تر در ولتاژ خروجی در شکل موج پله‌ای تولید می‌شود و تعداد هارمونیک‌ها کاهش خواهد یافت.

برای کاهش میزان کل اعوجاج هارمونیک<sup>۳</sup> از روش‌های مختلفی نظیر بهبود تکنیک‌های مدولاسیون، طراحی فیلتر

غیرفعال خروجی یا فیلترهای فعال و استفاده از اینورترهای چندسطحی می‌توان بهره‌گرفت. هرچه تعداد سطوح ولتاژ خروجی افزایش یابد، ساختار فیلتر مورد نیاز ساده‌تر خواهد شد. از این رو، استفاده از اینورترهای چندسطحی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

اینورترهای چند سطحی تقریباً دارای شکل موج خروجی سینوسی، جریان خروجی با مشخصات هارمونیک فیلتر شده است و از این رو فیلتر با ابعاد کوچک‌تری نیاز است. در سال‌های اخیر، ساختارهای مختلفی از اینورترهای چندسطحی با سطوح مختلف ارائه شده‌اند [۴-۹]. از متداول‌ترین نوع اینورترهای چندسطحی، اینورترهای محدود شده با دیود است که به علت ساختار ساده خود بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در راه اندازی موتورهای توان زیاد و فیلتر توان اکتیو بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹-۱۲]. با این وجود، نیاز به استفاده بسیاری از ادوات نیمه‌هادی قدرت در مدار و مدار کنترلی پیچیده از مشکل‌های اینورترهای محدود شده با دیود است. در این اینورترها، برای تولید ۷ سطح ولتاژ در خروجی اینورتر، نیاز به ۱۰ کلید قدرت و ۸ دیود محدود شده است. از این رو، هزینه پیاده‌سازی این ساختارها بسیار گران هست. اینورتر محدود شده با خازن شناور ساختاری دیگری برای دستیابی به عمل‌کرد مدولاسیون عرض پالس چندسطحی است. مشکل این نوع از ساختارهای نیز تعداد زیاد خازن‌های استفاده شده می‌باشد که این عامل سبب افزایش هزینه تمام شده ماژول فوتوولتائیک می‌شود [۱۳ و ۱۴].

در این مقاله یک اینورتر هفت‌سطحی تمام پل بهبود یافته با THD ولتاژ کم و تعداد کلیدهای کم‌تر نسبت به اینورترهای مشابه پیشنهاد شده است. به علت کاهش کلیدهای قدرت، توان تلفاتی هدایتی و کلیدزنی ساختار پیشنهادی نیز کاهش چشم‌گیری در قیاس با ساختارهای هفت‌سطحی دیگر دارد. این عامل سبب می‌شود که استفاده از اینورتر پیشنهادی در کاربردهای ولتاژ متوسط مانند سیستم تحرک الکتریکی شک شناور بسیار مقرون به صرفه باشد.

## ۲- اینورترهای هفت سطحی متداول

اینورترهای هفت سطحی انواع مختلفی دارند که عبارت

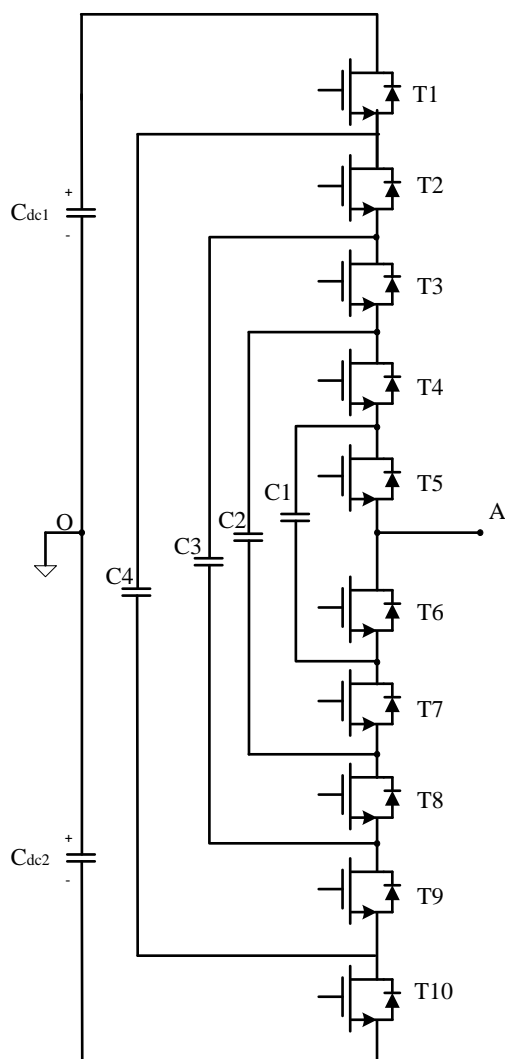
<sup>3</sup> Total Harmonic Distortion (THD)

<sup>1</sup> Renewable Energy Sources

<sup>2</sup> Photovoltaic

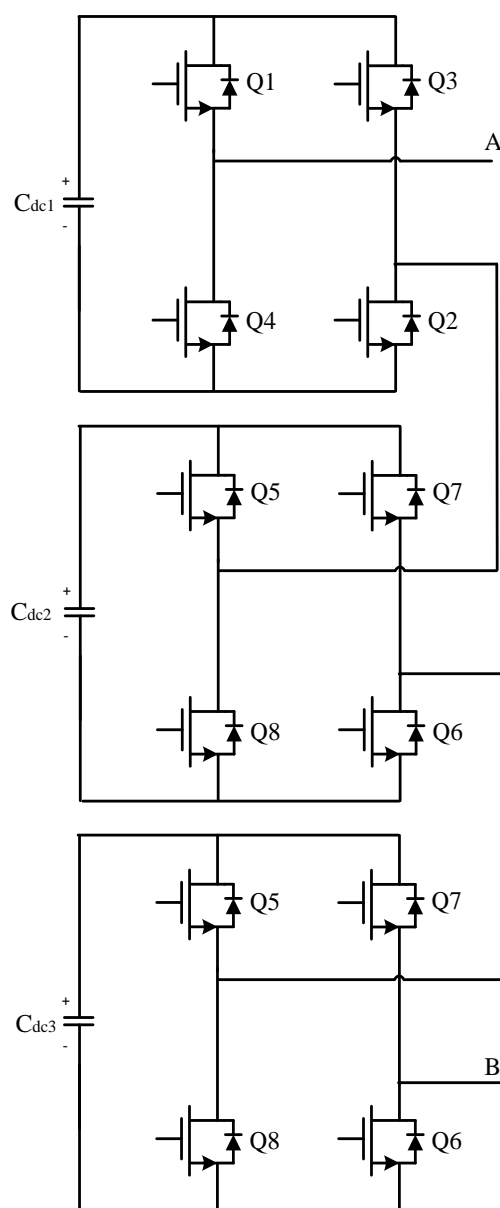
شکل (۲) ساختار یک اینورتر هفت سطحی FC را نشان می‌دهد. همان‌طور که هم دیده می‌شود، برای تشکیل ۷ سطح در خروجی نیاز به ۴ خازن شناور و ۲ خازن اتصال DC هست که نشان دهنده پیچیدگی اینورتر خازن شناور است. علاوه بر این تعداد خازن، ۱۰ کلید فعال نیز برای تشکیل خروجی اینورتر نیاز است.

همان‌طور که بررسی شد، نقطه مشترک این دو اینورتر، تعداد زیاد المان‌های استفاده شده و پیچیدگی کنترل آن‌ها است. هدف اصلی این مقاله، ارایه اینورتری است که پیچیدگی‌های بیان شده را نداشته باشد و از کم‌ترین تعداد کلید استفاده می‌کند. همچنین، حذف خازن شناور نیز یکی دیگر از اهدافی است که در ساختار پیشنهادی بررسی می‌شود. وجود خازن در مدار سبب کاهش قابلیت اطمینان مدار می‌شود.



شکل (۲) اینورتر هفت سطحی FC.

هستند از اینورترهای سری شده تمام پل<sup>۱</sup> و اینورترهای خازن شناور<sup>۲</sup> دو نوع معروف از اینورترهای هفت سطحی هستند. شکل (۱) اینورتر هفت سطحی CHB را نشان می‌دهد که از ۱۲ کلید فعال برای تشکیل هفت سطح استفاده می‌کند. علاوه بر استفاده کردن از ۱۲ کلید فعال، نیاز به سه منبع تغذیه ایزوله هم هست که این استفاده از این نوع اینورتر را سخت می‌سازد. مخصوصاً در کاربردهای فوتوولتائیک به دلیل وجود انرژی نشتی که به دلیل ایجاد شدن خازن بین صفحات فوتوولتائیک و زمین ایجاد می‌شوند، در مدار به وجود می‌آید، بازدهی آن‌ها را کم می‌کند.



شکل (۱) اینورتر هفت سطحی CHB.

<sup>2</sup> Floating Capacitor (FC)

<sup>1</sup> Cascaded H-bridge (CHB)

**(B) وضعیت عمل کرد دو: سطح ۲+**

در این وضعیت کلیدهای دوطرفه  $Q_6$  و  $Q_1$  روشن و دیودهای  $D_3$  و  $D_4$  در حالت هدایت مستقیم هستند. پس در نتیجه ولتاژ  $2V_{dc}/3$  به پایانه مثبت بار متصل هستند. کلید  $Q_2$  روشن و پایانه منفی بار به زمین متصل است. کلیدهای کنترلی دیگر قطع هستند. ولتاژ اعمال شده به بار  $2V_{dc}/3$  است. شکل (۵) مسیره‌های جریانی فعال این مرحله را نشان می‌دهد.

**(C) وضعیت عمل کرد سه: سطح ۱+**

در این وضعیت کلیدهای دوطرفه  $Q_5$  و  $Q_1$  روشن و به پایانه مثبت بار متصل هستند. کلید  $Q_2$  روشن و به پایانه منفی بار به زمین متصل است. کلیدهای کنترلی دیگر قطع هستند. ولتاژ اعمال شده به بار  $V_{dc}/3$  است. شکل (۶) مسیره‌های جریانی فعال این مرحله را نشان می‌دهد.

**(D) وضعیت عمل کرد چهار: سطح ۰+ یا ۰-**

این سطح را می‌توان با دو نوع ترکیب کلیدزنی تولید کرد: کلیدهای  $Q_1$  و  $Q_3$  یا کلیدهای  $Q_2$  و  $Q_4$  وصل هستند. و کلیدهای کنترلی دیگر قطع هستند. در هر دو حالت، دو سر بار اتصال کوتاه و ولتاژ اعمال شده به بار صفر است. شکل (۷) و شکل (۱۱) مسیره‌های جریانی فعال این مرحله را نشان می‌دهد.

**(E) وضعیت عمل کرد پنج: سطح ۱-**

در این وضعیت کلیدهای دوطرفه  $Q_3$  و  $Q_5$  روشن و به پایانه مثبت بار متصل هستند. کلید  $Q_4$  روشن و پایانه منفی بار به  $-V_{dc}/3$  متصل است. کلیدهای کنترلی دیگر قطع هستند. ولتاژ اعمال شده به بار  $-V_{dc}/3$  است. شکل (۸) مسیره‌های جریانی فعال این را نشان می‌دهد.

**(F) وضعیت عمل کرد شش: سطح ۲-**

در این حالت کلیدهای دوطرفه  $Q_6$  و  $Q_3$  روشن و به پایانه مثبت بار متصل هستند. کلید  $Q_4$  روشن و پایانه منفی بار به زمین متصل است. کلیدهای کنترلی دیگر قطع هستند. ولتاژ اعمال شده به بار  $-2V_{dc}/3$  است. شکل (۹) مسیره‌های جریانی فعال این مرحله را نشان می‌دهد.

این عامل سبب می‌شود که اینورتری مانند خازن شناور که تعداد کلید کم‌تری از اینورتر CHB نیز دارد، کم‌تر مورد استفاده قرار بگیرد.

**۳- اینورتر هفت‌سطحی پیشنهادی**

در شکل (۳) اینورتر هفت‌سطحی و هفت کلیدی پیشنهاد شده، نشان داده شده است. برای رسیدن به توان تلفاتی کم و فرکانس کلیدزنی زیاد از ماس‌ف‌های قدرت به عنوان کلیدهای اصلی و کمکی استفاده شده است. ماس‌ف‌های قدرت دارای مزیت‌های جذابی مانند

- فرکانس کلیدزنی زیاد

- توان تلفات کلیدزنی کم

- افت ولتاژ هدایت مستقیم به علت مقاومت هدایتی کم و در نتیجه توان تلفاتی هدایتی کم است.

فرکانس کلیدزنی مبدل‌های قدرتی که در آن‌ها از ماس‌ف‌ها به عنوان کلید اصلی استفاده شده است، بیش‌تر از مبدل‌هایی است که در آن‌ها از ترانزیستورهای دو قطبی با گیت عایق شده<sup>۱</sup> استفاده شده است. این ویژگی برای کاهش ضریب جریان، کاهش میزان تلفات هدایتی و اندازه اجزای غیرفعال مدار مانند سلف و خازن مورد استفاده در فیلتر خروجی، بسیار مفید است.

ساختار پیشنهادی شامل یک پل H و ۳ کلید کمکی است. استفاده از چهار دیود  $D_1$ - $D_4$  سبب کاهش بیش‌تر تلفات هدایتی می‌شود.

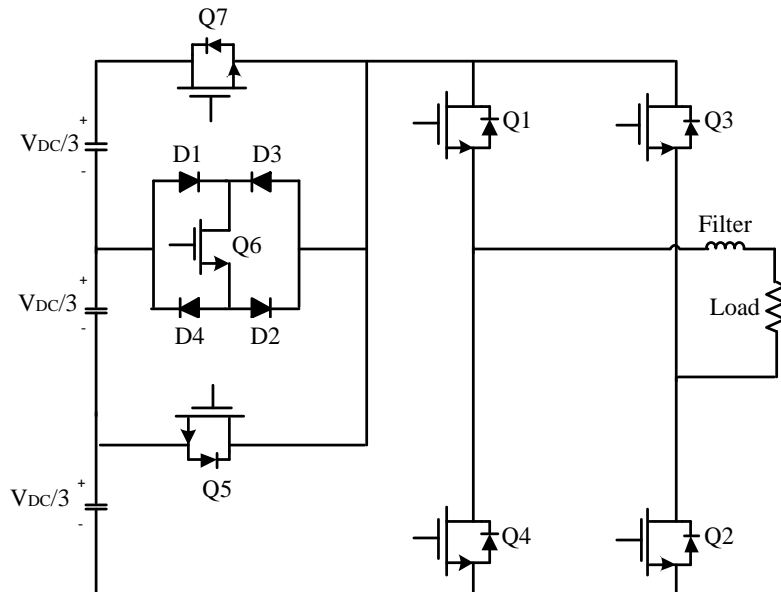
**۳-۱- اصول عمل کرد اینورتر هفت‌سطحی پیشنهادی**

اینورتر چند سطحی تک فاز پیشنهادی می‌تواند ۷ سطح  $(V_{dc}, 2V_{dc}/3, V_{dc}/3, 0, -V_{dc}, -2V_{dc}/3, -V_{dc}/3)$  ایجاد کند. قسمت ورودی اینورتر به وسیله تقسیم برابر ولتاژ منبع DC  $(V_{dc})$  توسط سه خازن به سه قسمت مساوی تقسیم می‌شود.

**(A) وضعیت عمل کرد یک: سطح ۳+**

در این وضعیت کلیدهای  $Q_7$  و  $Q_1$  روشن هستند و پایانه مثبت بار به  $V_{dc}$  متصل است. کلید  $Q_2$  روشن و پایانه منفی بار به زمین متصل است. کلیدهای کنترلی دیگر قطع هستند. ولتاژ اعمال شده به بار  $V_{dc}$  است. شکل (۴) مسیر جریانی فعال این سطح را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Isolated Gate Bipolar Transistor (IGBT)



شکل (۳) اینورتر هفت سطحی و هفت کلید پیشنهاد شده.

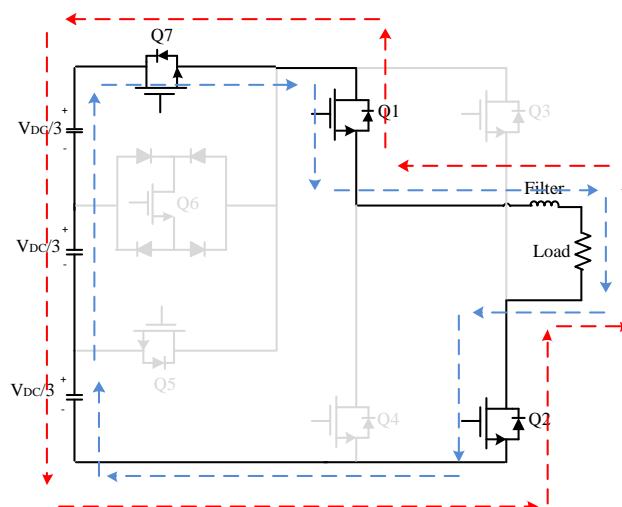
جدول (۱) حالت‌های عمل کردی اینورتر پیشنهاد شده.

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7
+۳	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
+۲	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰
+۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰
+۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰
-۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
-۲	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰
-۳	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱
-۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰

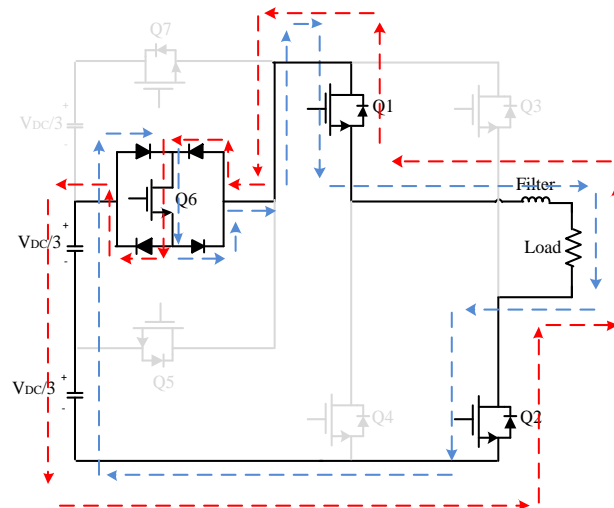
### G وضعیت عمل کرد هفت: سطح ۳-

در این وضعیت کلیدهای دوطرفه Q3 و Q7 روشن هستند و پایانه منفی بار به -Vdc متصل است. کلید Q4 روشن است و پایانه مثبت بار به زمین متصل است. کلیدهای کنترلی دیگر قطع هستند. ولتاژ اعمال شده به بار -Vdc است. شکل (۱۰) مسیرهای جریانی فعال این مرحله را نشان می‌دهد.

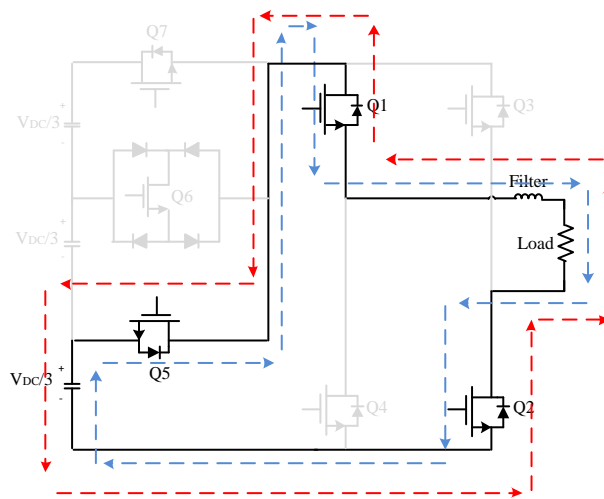
جدول (۱) نشان‌دهنده حالت‌های عمل کردی اینورتر پیشنهاد شده است. همان‌طور که مشخص است، برای تشکیل هر سطح نیاز به تنها سه کلید روشن است. علاوه بر این، در سطح‌های مثبت، کلیدهای Q1 و Q2 همواره روشن است که این سبب کاهش تلفات کلیدزنی نیز می‌شود.



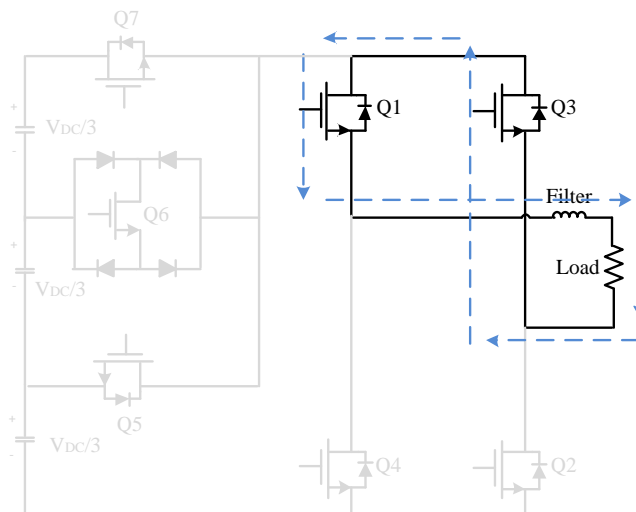
شکل (۴) مسیر تولیدکننده سطح +۳ در اینورتر پیشنهادی.



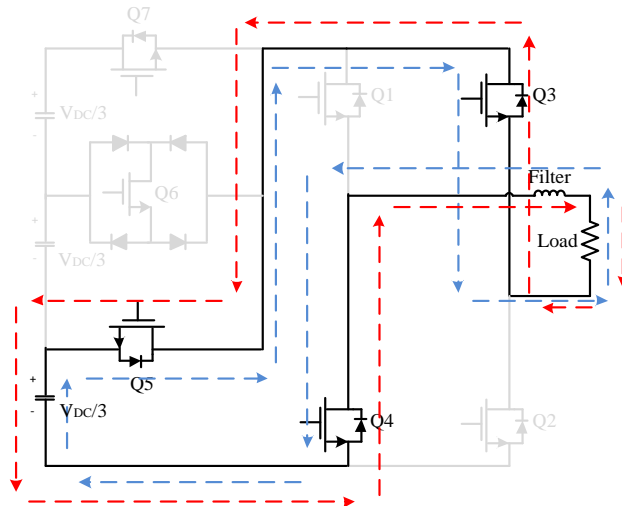
شکل (۵) مسیر تولیدکننده سطح +۲ در اینورتر پیشنهادی.



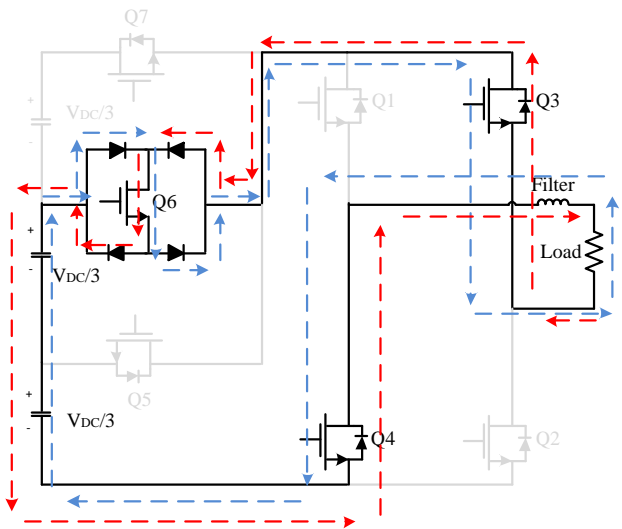
شکل (۶) مسیر تولیدکننده سطح +۱ در اینورتر پیشنهادی.



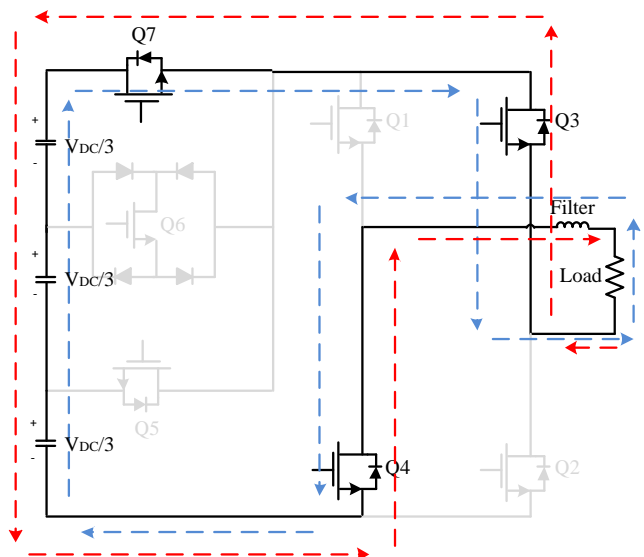
شکل (۷) مسیر تولیدکننده سطح +۰ در اینورتر پیشنهادی.



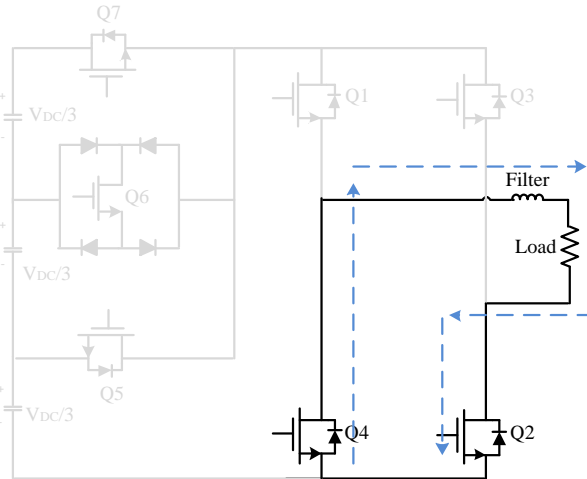
شکل (۸) مسیر تولیدکننده سطح ۱- در اینورتر پیشنهادی.



شکل (۹) مسیر تولیدکننده سطح ۲- در اینورتر پیشنهادی.



شکل (۱۰) مسیر تولیدکننده سطح ۳- در اینورتر پیشنهادی.



شکل (۱۱) مسیر تولیدکننده سطح ۰- در اینورتر پیشنهادی.

فرکانس ۵۰ هرتز که برای تولید سیگنال های گیت مورد نیاز استفاده می شود. در این شکل،  $V_{Load}$  ولتاژ نمونه گرفته شده خروجی اینورتر است و با  $V^*$  که ولتاژ مرجع اینورتر است، مقایسه می شود. خروجی کنترل کننده PR یک سیگنال سینوسی مرجع است که پس از مقایسه با سیگنال های مثلثی، سیگنال های مورد نیاز برای کلیدها تولید می شود. شکل (۱۳) پاسخ فرکانسی کنترل کننده PR ایده آل را نشان می دهد. تابع تبدیل کنترل کننده جریان تناسبی - نوسانی  $G_{PR}(s)$  به صورت رابطه (۱) بیان می شود.

$$G_{PR}(s) = K_p + K_I \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (1)$$

$K_I$  و  $K_p$  به ترتیب بهره تناسبی و انتگرالی و  $\omega_0$  فرکانس نوسان هستند. رابطه (۱)، رابطه یک کنترل کننده تناسبی - نوسانی ایده آل است که دارای بهره نامحدود در  $\omega_0$  و هیچ بهره ای را در فرکانس های دیگر قرار نمی دهد [۵]. پارامتر  $K_p$  باعث پایدار شدن رفتار دینامیکی سیستم، پهنای باند، حاشیه فاز و حاشیه بهره می شود [۱۶].

همین طور نیز برای سطح های منفی کلیدهای Q3 و Q4 روشن می ماند. هرچه تعداد تغییر وضعیت کلیدها کمتر باشد، تلفات کلیدزنی نیز کمتر می شود. در جدول (۲)، تعداد کلیدها، خازن ها و دیودها در ساختارهای هفت سطحی مختلف مقایسه شده است که همان طور مشخص است، ساختار پیشنهادی کمترین تعداد المان را دارد.

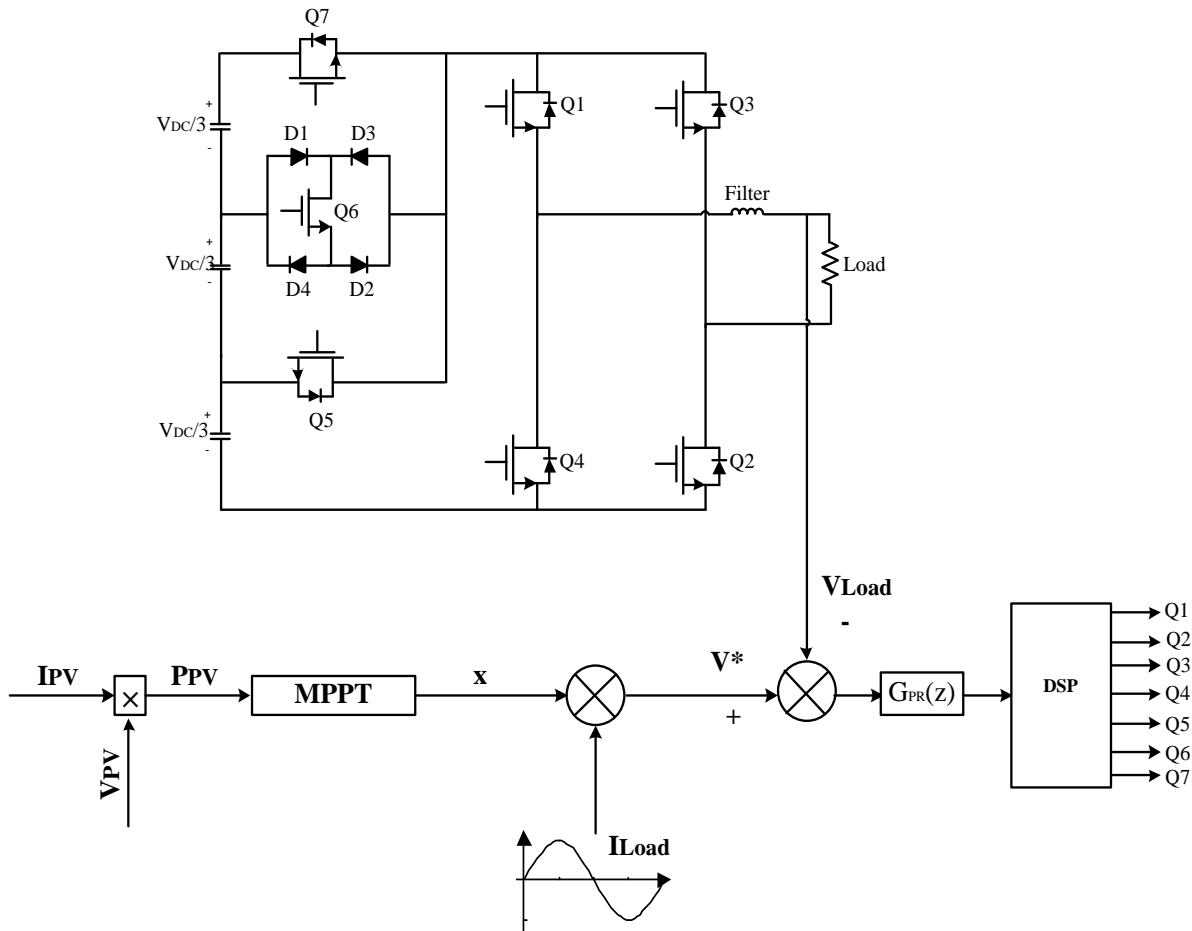
#### ۴ - کنترل اینورتر پیشنهادی

شکل (۱۲) مدار حلقه بسته اینورتر پیشنهادی همراه با کنترل کننده ولتاژ با استفاده از کنترل کننده تناسبی - رزونانسی در اینورتر هفت سطحی پیشنهاد شده را نمایش می دهد. ابتدا پس از نمونه گیری از ولتاژ و جریان لحظه ی سلول خورشیدی و رد یابی نقطه بیشینه توان آن، سیگنال دیگری تولید می شود. این سیگنال پس از مقایسه با سیگنال جریان نمونه گیری شده از خروجی به سیگنال ولتاژ تبدیل می شود. این سیگنال ولتاژ نیز پس از مقایسه با سیگنال ولتاژ نمونه گیری شده از خروجی، به یک سیگنال مرجع تبدیل می شود. این سیگنال مرجع یک سیگنال سینوسی است با

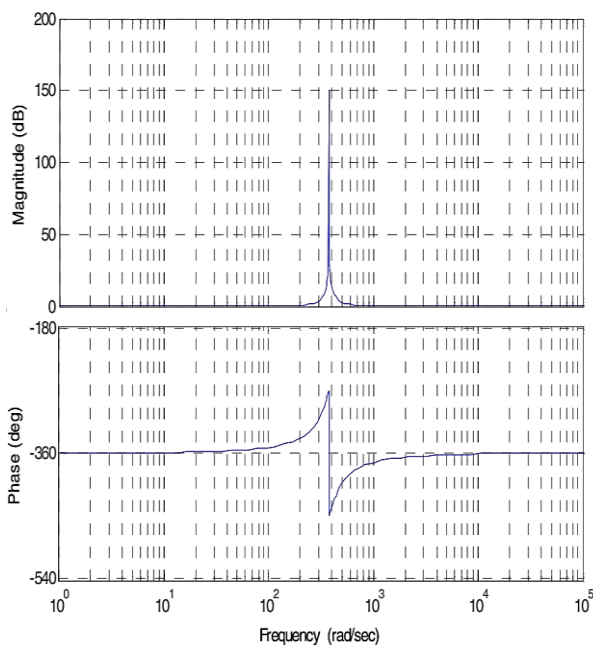
جدول (۲) مقایسه تعداد المان های استفاده شده در اینورترهای هفت سطحی مختلف با اینورتر پیشنهادی.

	اینورتر هفت سطحی دیود محدود شده	اینورتر هفت سطحی خازن شناور	اینورتر هفت سطحی آبشاری	اینورتر هفت سطحی نقطه خنثی	اینورتر پیشنهادی [۱۹]	اینورتر هفت سطحی پیشنهادی
تعداد کلیدها	۱۰	۱۰	۱۲	۱۲	۱۰	۷
تعداد دیودها	۸	۰	۰	۱۹	۰	۴
تعداد خازن ها	۶	۱۴	۰	۰	۰	۰





شکل (۱۲) مدار حلقه بسته کنترلی استفاده شده.



شکل (۱۳) پاسخ فرکانسی کنترل کننده PR ایده آل.

کنترل کننده تناسبی - نوسانی بیان شده در (۱)، به دلیل داشتن بهره نامحدود در فرکانس تشدید، دارای مشکل پایداری است. با اضافه کردن مقاومت میراکننده به کنترل کننده تناسبی - نوسانی (غیرایده آل کردن کنترل کننده تناسبی - نوسانی) می توان از این مشکل دوری کرد. تابع تبدیل کنترل کننده تناسبی - نوسانی غیرایده آل به صورت (۲) است. شکل (۱۴) پاسخ فرکانسی کنترل کننده PR غیرایده آل را نشان می دهد.

$$G_{PR}(s) = K_P + K_I \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (2)$$

که در آن  $\omega_c$  پهنای باند اطراف فرکانس  $\omega_0$  است. در رابطه (۲) بهره کنترل کننده تناسبی - نوسانی در فرکانس  $\omega_0$  محدود و اما این بهره هنوز برای فراهم کردن خطای حالت پایدار خیلی کوچک، به اندازه کافی بزرگ است.

محاسبه می‌شود [۱۳ و ۱۴].

$$C_{f,\max} = \frac{0.05 p_n}{\omega_0 V_g^2} \quad (۳)$$

که در آن توان خروجی مربوطه و ولتاژ موثر شبکه است. مقدار  $L_I$  باید بر اساس میزان ضریب جریان محاسبه گردد [۱۳ و ۱۴].

$$0.15 \leq \frac{\Delta I_0}{I_n} \leq 0.4 \quad (۴)$$

که در آن  $\Delta I_0$  میزان ضریب جریان و  $I_n$  نیز دامنه جریان شبکه است. ضریب جریان برای اینورتر پنج‌سطحی به صورت (۵) تعریف می‌شود [۱۳ و ۱۴].

$$\Delta I_0 = \frac{V_{DC}}{16 L_1 f_c} \quad (۵)$$

که  $f_c$  فرکانس موج‌های حامل است. با استفاده از (۴) و (۵)، اندوکتانس سمت اینورتر از (۶) محاسبه می‌شود [۱۳ و ۱۴].

$$\frac{V_{DC}}{6.4 I_n f_c} \leq L_1 \leq \frac{V_{DC}}{2.4 I_n f_c} \quad (۶)$$

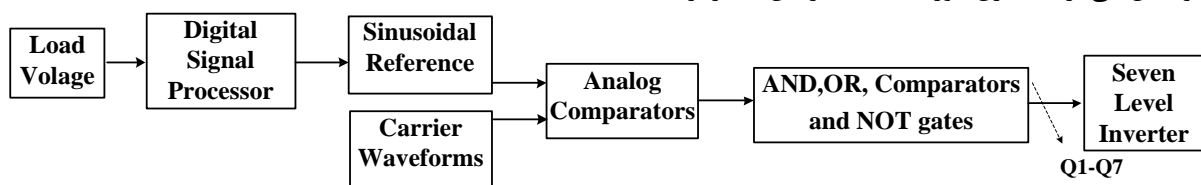
اندوکتانس سمت شبکه را می‌توان از (۷) محاسبه نمود [۱۳ و ۱۴].

$$10 \omega_0 < \omega_r = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C_f L_1 L_2}} < \frac{1}{2} \omega_s \quad (۷)$$

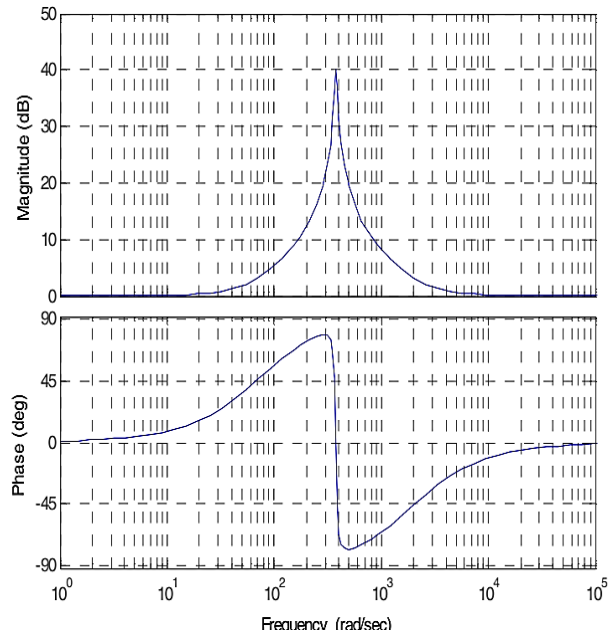
که در آن  $\omega_r$  فرکانس تشدید فیلتر است.

#### ۶- شبیه‌سازی اینورتر پیشنهادی

شکل (۱۶) تکنیک مدولاسیون استفاده شده در اینورتر پیشنهادی را نشان می‌دهد. اساس تولید سیگنال‌های گیت در تکنیک مدولاسیون عرض پالس سینوسی<sup>۱</sup> به وسیله مقایسه سیگنال‌های مثلثی (شش سیگنال حامل) با یک سیگنال مرجع سینوسی است.



شکل (۱۵) بلاک کلی نحوه تولید سیگنال‌های گیت مورد نیاز برای کلیدها.



شکل (۱۴) پاسخ فرکانسی کنترل‌کننده PR غیر ایده‌آل.

همچنین این معادله به علت دقت محدود آن‌ها، باعث می‌شود که این کنترل‌کننده به راحتی قابل اجرا در سیستم‌های دیجیتال شود [۱۷]. شکل (۱۵) نحوه تولید سیگنال‌های مدولاسیون را به صورت اجمالی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۵) نیز نشان داده شده است، پس از نمونه‌گیری از ولتاژ و جریان خروجی و تولید سیگنال مرجع سینوسی، این سیگنال مرجع باید با حامل‌های مثلثی مقایسه گردند و سپس با عبور کردن از گیت‌های منطقی به سیگنال‌های مطلوب برای کنترل کردن کلیدهای اینورتر شوند. جهت کاهش ابعاد مدار و کاهش بیش‌تر میزان THD ولتاژ خروجی از یک فیلتر استفاده می‌شود.

#### ۵- فیلتر خروجی پیشنهادی

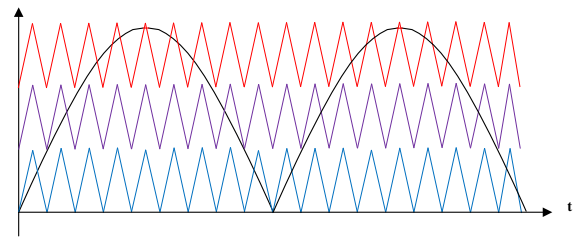
برای طراحی فیلتر LCL برای اینورتر پیشنهادی به صورت زیر عمل می‌گردد. خازن مورد استفاده در این فیلتر از (۳)

<sup>1</sup> Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

مدولاسیون برابر ۰/۹۵ انتخاب شده است. شبیه سازی اینورتر هفت سطحی پیشنهاد شده به وسیله نرم افزار PSpice انجام شده است. نرم افزار PSpice توانایی شبیه سازی مدارها را به صورت واقعی دارد که سبب می شود نتایج شبیه سازی به صورت واقعی تر حاصل شوند. در شکل (۱۷) اینورتر شبیه سازی شده توسط نرم افزار PSpice نشان داده شده است و پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی نیز در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳) پارامترهای مهم شبیه سازی.

ولتاژ DC	۴۵۰V
ماسفت	IRFPS43N50K
فرکانس کلیدزنی	۲۰KHz
میزان بار خروجی	۱۱/۲۵Ω
میزان ولتاژ خروجی	۷۵۰ V <sub>PP</sub>
میزان جریان خروجی	۴۰ A <sub>pp</sub>
میزان THD ولتاژ خروجی قبل از فیلتر	٪۱۵/۷
میزان THD ولتاژ خروجی بعد از فیلتر	٪۲/۵۲

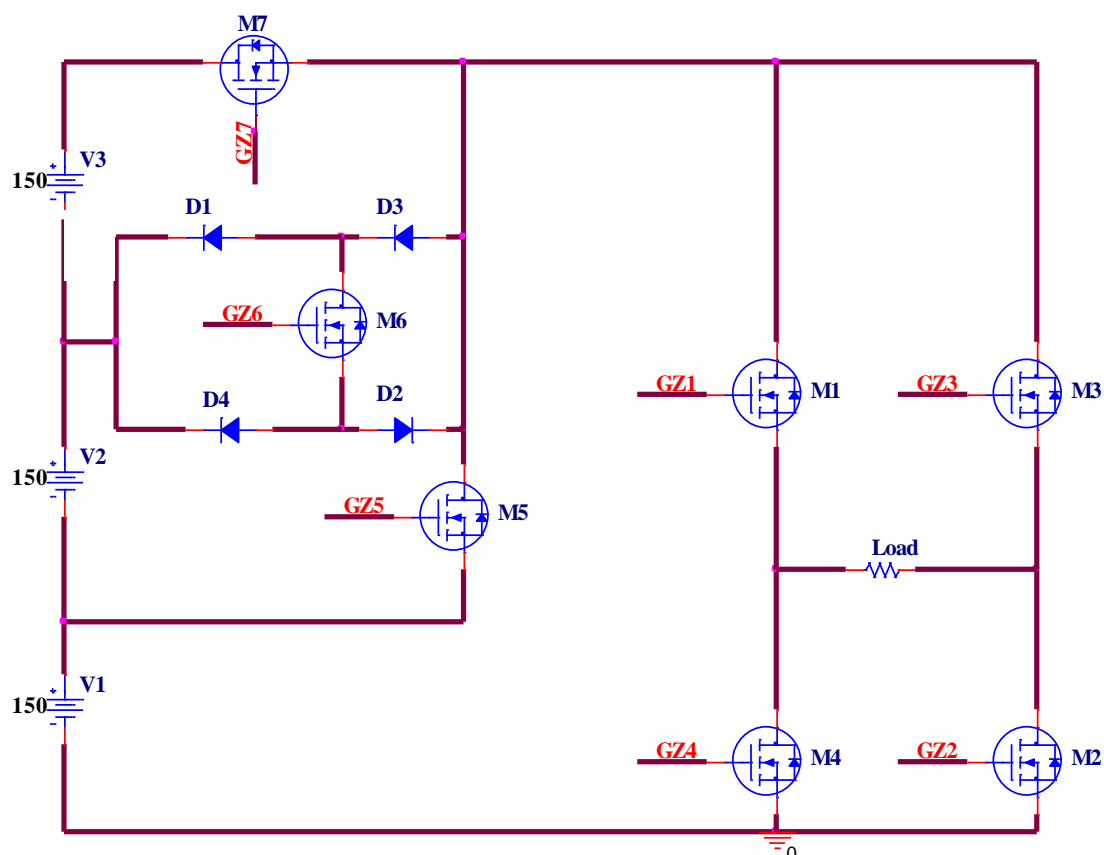


شکل (۱۶) تکنیک مدولاسیون استفاده شده.

سیگنال های حامل دارای فاز یکسان ولی با شیفیت دامنه هستند. مطابق با دامنه ولتاژ مرجع،  $V_{ref}$ ، و مقایسه با حامل های مشخص شده در شکل (۱۶)، حالت کاری اینورتر در هر لحظه مشخص می شود. ضریب مدولاسیون مربوط اینورتر هفت سطحی پیشنهادی نیز به صورت (۳) تعریف می شود.

$$M = \frac{A_M}{2A_C} \quad (9)$$

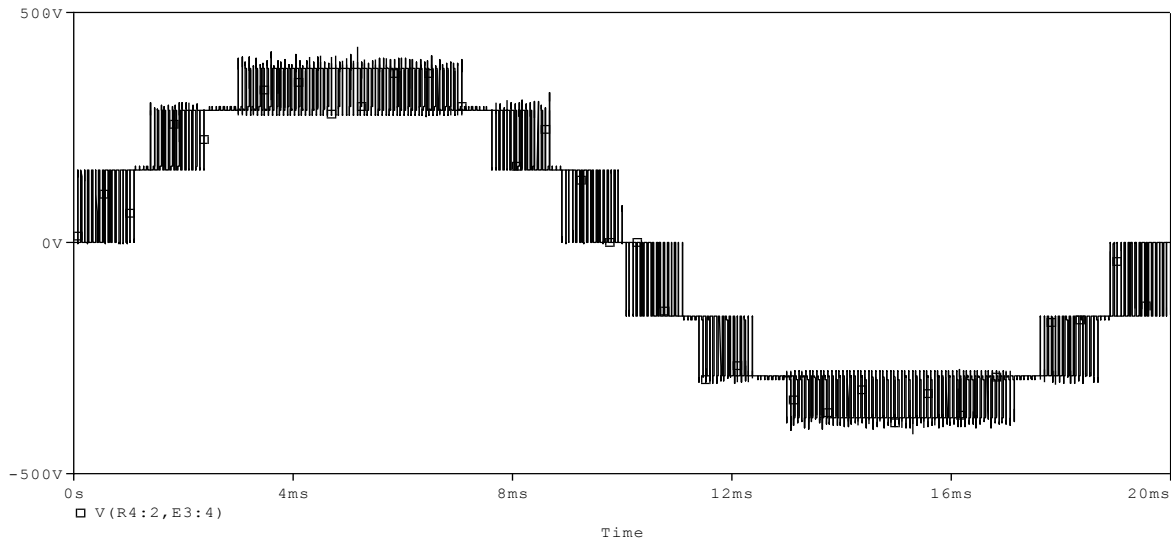
که در آن  $A_M$  مقدار اوج ولتاژ مرجع و  $A_C$  مقدار اوج موج جامل است. ضریب مدولاسیون پیشنهادی در این روش بین ۰/۶۶ و ۱ توصیه شده است که در این مقاله ضریب



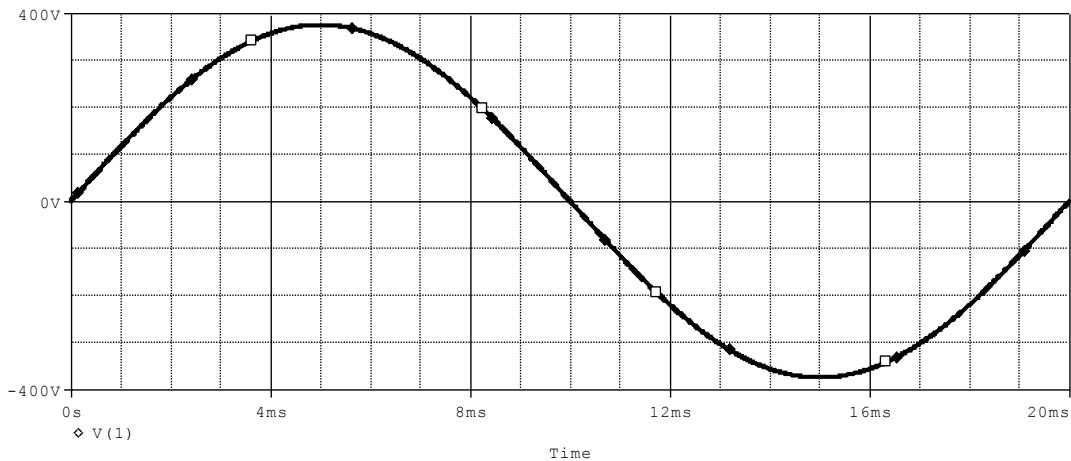
شکل (۱۷) شبیه سازی اینورتر پیشنهادی در نرم افزار PSpice.

۳۰ تا ۴۰ درجه بیشتر از دمای محیط در نظر گرفته شود و از این رو دمای اولیه ۶۰ فرض شده است. به ازای ۶۰ درجه تغییر دما، میزان THD از ۲,۵۲٪ به ۳,۱۵٪ رسیده است. به منظور بررسی پایداری مدار پیشنهادی، پاسخ پله سیستم باید در نظر گرفته شود. شکل (۲۲) و شکل (۲۳) رفتار اینورتر پیشنهادی در پاسخ به تغییرات پاسخ پله را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۲۲) ولتاژ مرجع در به صورت ناگهانی کاهش یافته است و پس از گذشت چند لحظه ولتاژ خروجی ولتاژ مرجع را دنبال می‌کند. در شکل (۲۳) ولتاژ مرجع به صورت لحظه‌ای افزایش می‌یابد و ولتاژ خروجی پس از مدت زمان گذار مشخصی، ولتاژ مرجع را دنبال می‌نماید. در هر دو مورد، سیستم بدون هیچ نوع اثر مخرب بر روی مدار، مقادیر ولتاژ و جریان خروجی، به سرعت پایدار می‌شود.

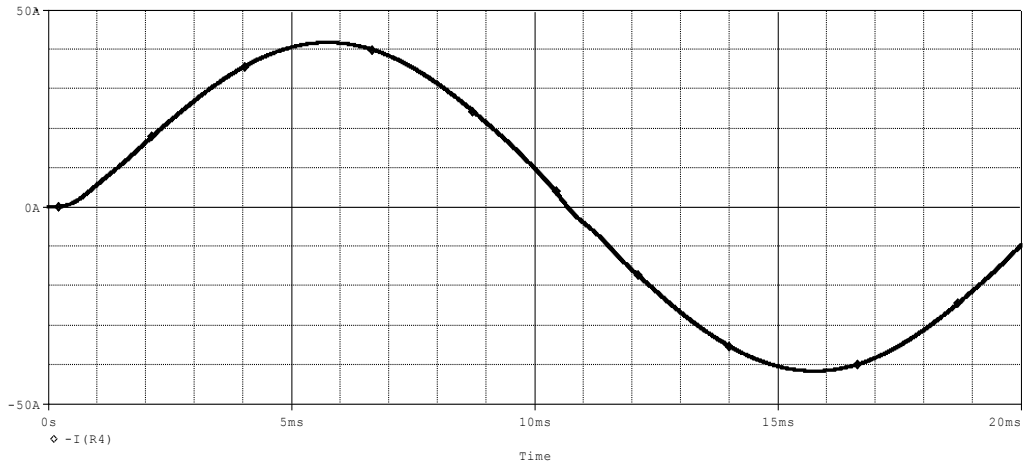
شکل‌های (۱۸) و (۱۹) ولتاژ خروجی اینورتر را قبل و بعد از فیلتر کردن نشان می‌دهد. می‌توان دید که فرآیند فیلتر کردن به درستی انجام شده است. میزان THD ولتاژ خروجی به‌ازای توان 30kVA برابر ۲,۵۲٪ اندازه‌گیری شده است. بیشینه ولتاژ خروجی اینورتر بعد از فیلتر شدن از ۴۵۰ ولت به ۳۷۵ ولت تغییر می‌کند. دلیل این امر این است که میزان ولتاژ خروجی اینورتر در سطح ۲ برابر ۳۰۰ ولت و در سطح ۳ برابر ۴۵۰ ولت است. از این رو، میزان ولتاژ خروجی میانگین ولتاژ این دو سطح خواهد شد که به میزان ۳۷۵ ولت خواهد رسید. شکل (۲۰) نیز جریان خروجی اینورتر پیشنهادی را نشان می‌دهد. اختلاف فاز ایجاد شده در جریان بار، به علت فیلتر LC خروجی است که بین ورودی و خروجی خود اختلاف فاز می‌دهد. شکل (۲۱) نشان دهنده تغییرات میزان THD به ازای تغییرات دمای محیط است. دمای اولیه شبیه سازی باید



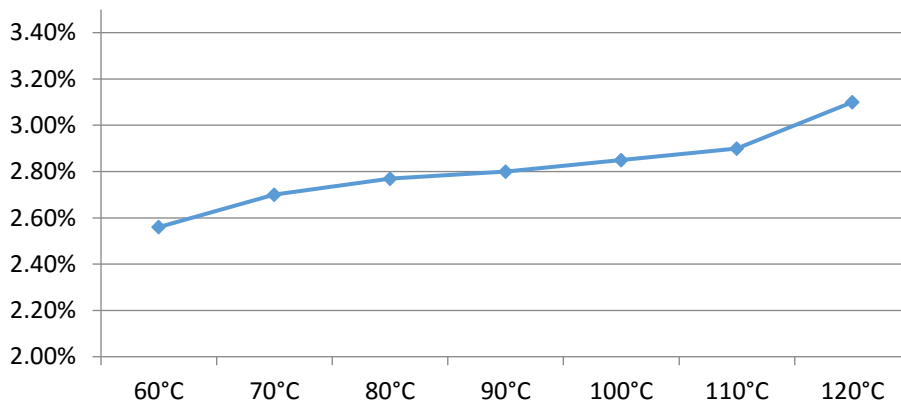
شکل (۱۸) ولتاژ خروجی بدون اعمال فیلتر برای جریان بار ۴۰ آمپر .



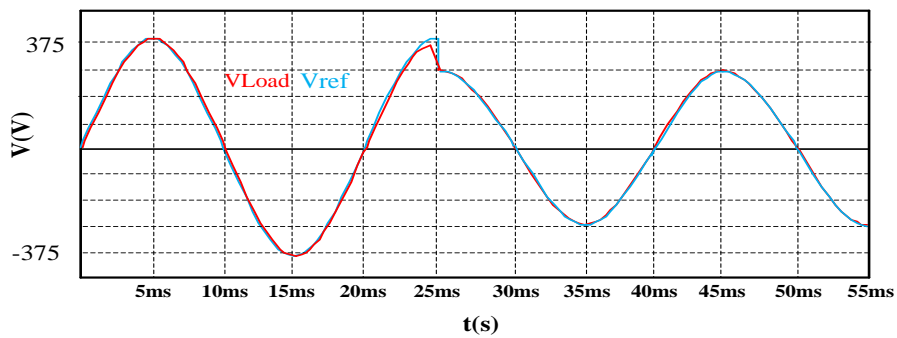
شکل (۱۹) ولتاژ خروجی با اعمال فیلتر مطلوب برای جریان بار ۴۰ آمپر .



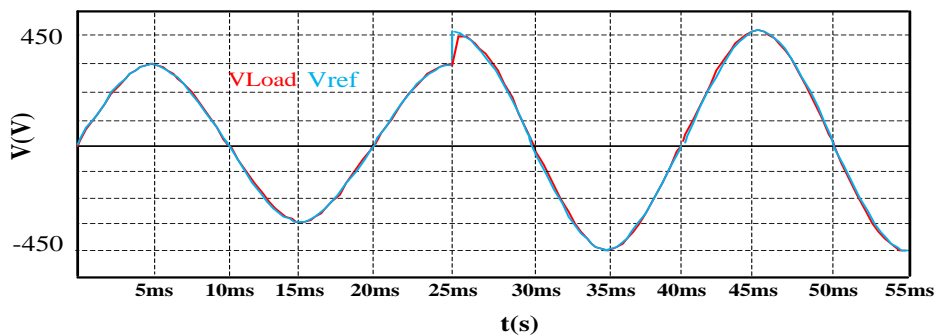
شکل (۲۰) جریان خروجی با اعمال فیلتر مطلوب برای جریان بار ۴۰ آمپر.



شکل (۲۱) تغییرات میزان THD ولتاژ خروجی با تغییرات دمای شبیه‌سازی برای جریان بار ۴۰ آمپر.



شکل (۲۲) پاسخ گذرای کنترل‌کننده ولتاژ به ازای تغییر پله کاهشی.



شکل (۲۳) پاسخ گذرای کنترل‌کننده ولتاژ به ازای تغییر پله کاهشی.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله یک اینورتر تمام پل بهبود یافته با تعداد کلیدهای کم نسبت به ساختارهای مشابه برای کاربردهای انرژی نو و ولتاژ متوسط مانند کاربردهای تحرک الکتریکی شناور پیشنهاد شده است. این اینورتر دارای مزیت‌های مانند THD ولتاژ بسیار کم، قابلیت اطمینان بسیار زیاد به علت تعداد کلیدها و المان‌های استفاده شده کم، فرکانس کلیدزنی بیشتر نسبت به ساختارهای مشابه و در نهایت توانایی تزریق توان راکتیو به شبکه یا بارهای سلفی است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار PSpice، بازده اینورتر پیشنهاد شده بیشتر از ساختارهای مشابه ارائه شده است. همچنین، با توجه به نتایج استخراج شده توسط شبیه‌سازی با نرم‌افزار PSpice، نسبت به تغییرات حرارتی وسیع محیطی پایداری بسیار خوبی دارد و میزان THD ولتاژ خروجی تغییر چندانی نمی‌کند. برای بررسی صحت مدار کنترلی پیشنهادی، دو تست انجام گردید که تمام نتایج شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار PSpice، ثابت می‌کند پایداری مبدل پیشنهاد شده بیشتر از مبدل [۱۹] است. ساختار پیشنهادی به علت تعداد کلیدهای کم نسبت به اینورترهای هفت سطحی دیگر، تلفات کم‌تر و در نتیجه بازدهی بیشتر قابلیت استفاده در توان‌های بسیار زیاد و کاربردهای ولتاژ متوسط (Medium Voltage) را از جمله کاربردهای تحرک الکتریکی شناور دارد. همچنین، هزینه تمام شده مدار مربوط به علت کم بودن المان‌های سازنده ی مدار به شکل چشم‌گیری نیز کاهش می‌یابد. به علت نیاز به سه منبع به عنوان منبع تغذیه ورودی، می‌توان از سلول‌های فوتوولتائیک که خاصیت رشته‌سازی را دارند، استفاده نمود. همچنین کاهش کلیدهای قدرت که سبب افزایش بازدهی می‌شود، این ساختار را برای استفاده در کاربردهای توان متوسط مناسب می‌سازد.

## ۸- مراجع

- Photovoltaic Power Systems, IEA PVPS T1-12:2003. [Online].
- [3] M. Noroozi, A. Akbari, and A. Abrishamifar, "A 5-Level Modified Full-Bridge Stand-Alone Inverter with Reduced Number of Switches", *International Transaction in Electrical Energy Systems*, 2018.
- [4] L. He and C. Cheng, "A Flying-Capacitor-Clamped Five-Level Inverter Based on Bridge Modular Switched-Capacitor Topology", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.63, No.12, pp.7814-7822, 2016.
- [5] F. Gao, "An Enhanced Single-Phase Step-Up Five-Level Inverter" *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.31, No.12, pp.8024-8030, 2016.
- [6] Y. Hu, Y. Xie, L. Cheng and D. Fu, "Characteristics Analysis of a New Single-Phase  $\pi$ -Type Five-Level Inverter," *IET Power Electronics*, Vol.9, No.6, pp.1290-1296, 2016.
- [7] F. Wang, Y. Wang, L. Hang and C. Wang, "Five-Level Inverter for Solar System and its Self-Adaptive Pulse-Width Modulation Strategy," *IET Power Electronics*, Vol.9, No.1, pp.102-110, 2016.
- [8] M. Hajizadeh and S. H. Fathi, "Selective Harmonic Elimination Strategy for Cascaded H-Bridge Five-Level Inverter with Arbitrary Power Sharing Among the Cells", *IET Power Electronics*, Vol.9, No.1, pp.95-101, 2016.
- [9] X. Sun, B. Wang, Y. Zhou, W. Wang, H. Du and Z. Lu, "A Single DC Source Cascaded Seven-Level Inverter Integrating Switched-Capacitor Techniques" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.63, No.11, pp.7184-7194, 2016.
- [10] M. B. Abadi, A. M. S. Mendes and S. M. A. Cruz, "Method to Diagnose Open-Circuit Faults in Active Power Switches and Clamp-Diodes of Three-Level Neutral-Point Clamped Inverters", *IET Electric Power Applications*, Vol.10, No.7, pp.623-632, 2016.
- [11] P. H. Raj, A. I. Maswood, G. H. P. Ooi and Z. Lim, "Voltage Balancing Technique in a Space \ Vector Modulated 5-level Multiple-Pole Multi level Diode Clamped Inverter", *IET Power Electronics*, Vol.8, No.7, pp.1263-1272, 2015.
- [12] D. Cui and Q. Ge, "A Novel Hybrid Voltage Balance Method for Five-Level Diode-Clamped Converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.65, No.8, pp.6020-6031, 2018.
- [13] P. Channegowda and V. John, "Filter Optimization for Grid Interactive Voltage Source Inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.57, No.12, pp.4106-4114, 2010.
- [14] W. Yao, Y. Yang, X. Zhang, F. Blaabjerg and P. C. Loh, "Design and Analysis of Robust Active Damping for LCL Filters Using Digital Notch Filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.32, No.3, pp.2360-2375, 2017.
- [15] N. A. Yusof, N. M. Sapari, H. Mokhlis and J. Selvaraj, "A comparative Study of 5-Level and 7-
- [1] K. K. Gupta, A. Ranjan, P. Bhatnagar, L. K. Sahu and S. Jain, "Multilevel Inverter Topologies With Reduced Device Count: A Review", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.31, No.1, pp.135-151, Jan. 2016.
- [2] Trends in Photovoltaic Applications. Survey Report of Selected IEA Countries Between 1992 and 2002. International Energy Agency

- Level Multilevel Inverter Connected to the Grid”, IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu, pp.542-547, 2012.
- [16] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, “Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems”, Wiley, 2011.
- [17] J. Sorocki, I. Piekarz, S. Gruszczynski and K. Wincza, “Low-Loss Directional Filters Based on Differential Band-Reject Filters With Improved Isolation Using Phase Inverter”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.28, No.4, pp.314-316, 2018.
- [18] G. Buticchi, E. Lorenzani, and G. Franceschini, “A Five-Level Single-Phase Grid-Connected Converter for Renewable Distributed Systems,” Ind. Electron. IEEE Trans., Vol.60, No.3, pp.906–918, 2013.
- [19] S. S. Lee and K. Lee, “Dual-T-Type Seven-Level Boost Active-Neutral-Point-Clamped Inverter”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.34, No.7, pp.6031-6035, 2019.