

## شبیه سازی اینورتر سه فاز دوسطحی با کنترل کننده PI

### اسماعیل ایزدی ۱ و مجید آقابابایی ۲

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مدار مجتمع الکترونیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی نوشهر

۲-استادیار، گروه الکترونیک دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی نوشهر

#### چکیده

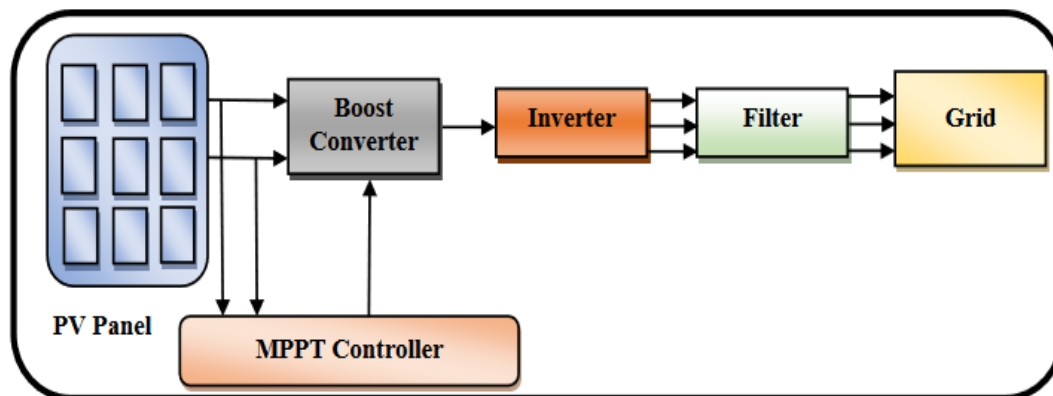
اینورترهای سه فاز متصل به شبکه اخیراً به دلیل راندمان بالا، قیمت پایین و ظرفیت تحمل انرژی زیاد توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. اینورترهای منبع ولتاژ (VSI) به خصوص توپولوژی های سه فاز بدون ترانسفورماتور دوسطحی، رایج ترین راه حل برای تبدیل ولتاژ DC به ولتاژ متناوب در هر سیستم قدرتی هستند. در این پژوهش اینورتر سه فاز دوسطحی شبیه سازی شده است بدین منظور از منبع سه فاز ورودی و از سه منبع سینوسی برای مدل کردن برق سه فاز ورودی استفاده شده است برای اندازه گیری ولتاژ لینک DC از یک سنسور ولتاژ استفاده شده است در بخش کنترل از کنترل کننده PI و از بلوک MATLAB Function بهره گرفته شده است و ولتاژهای مرجع محاسبه شده است شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB/Simulink انجام شده است. نتایج نشان داده است که یک ولتاژ DC با مقدار متوسط حدودی ۵۳۷ ولت در خروجی یکسوکننده ی تمام موج با فیلتر خازنی حاصل می شود. خطای خروجی برابر با صفر بوده و خروجی در زمان کوتاه و بدون بالازدگی در مقدار مرجع تثبیت می شود. جریان های موتور متعادل بوده و شکل تقریباً سینوسی را دارند ولتاژهای مرجع متعادل بوده و شکل کاملاً سینوسی دارند. پهنای پالس متناسب با مقدار سیگنال مرجع متغیر بوده و بدین ترتیب یک مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) برای کنترل اینورتر حاصل شده است.

**واژگان کلیدی:** اینورتر، سه فاز، دوسطحی

## ۱-مقدمه

اینورتر الکتریسیته DC را به AC تبدیل می کند. اینورتر یک جزء ضروری در حفظ ثبات و کیفیت جریان انرژی بین سیستم PV و شبکه است. در جهان، برای منابع انرژی تجدیدپذیر تقاضای زیادی وجود دارد و سیستم های PV متصل به شبکه یکی از راه های تولید برق هستند. دستیابی به سیستم PV متصل به شبکه به اثربخشی، قابلیت اطمینان و امنیت اینورتر بستگی دارد. سیستم PV خورشیدی برای تولید برق به سرعت در حال افزایش است، و سیستم های PV متصل به شبکه در حال حاضر گزینه ای محبوب برای تأمین برق منازل مسکونی، مشاغل و صنایع هستند. اینورترهای سه فاز متصل به شبکه اخیراً به دلیل راندمان بالا، قیمت پایین و ظرفیت تحمل انرژی زیاد توجه زیادی را به خود جلب کرده اند، به دلیل اثرات مضر گاز طبیعی، مانند تغییرات آب و هوایی، انتشار کربن و سایر خطرات، منابع انرژی تجدیدپذیر در حال حاضر نقش مهمی در جایگزینی سوخت های معمولی ایفا می کنند. [۱]

ژنراتور PV دستگاهی است که نور خورشید را با استفاده از مواد نیمه هادی به الکتریسیته تبدیل می کند. مدل های مختلفی از ژنراتور PV وجود دارد که هر کدام مشخصات و ویژگی های خاص خود را دارند. شکل (۱-۱) نمودار بلوکی ژنراتورهای فتوولتائیک سیستم PV متصل به شبکه دو مرحله ای را نشان می دهد که می توانند به عنوان ژنراتورهای فعلی با منابع ولتاژ انعطاف پذیر به جای منابع جریان یا ولتاژ ثابت دیده شوند. سلول خورشیدی در تاریکی، غیرفعال است هیچ جریان و ولتاژی تولید نمی کند. برای فعالیت سلول های پنل خورشیدی، اتصال نیمه هادی p-n لازم است. با قرار گرفتن در معرض نور، جریان DC تولید می شود. تابش خورشیدی جریان تولید شده را در یک خط مستقیم تغییر می دهد. مدل ژنراتور PV یک ابزار حیاتی برای برنامه ریزی و توسعه سیستم های انرژی خورشیدی و برای حداکثر ولتاژ است. نقطه توان حداکثر آرایه PV برای پیروی از تبدیل DC به DC کنترل می شود. با تغییر نسبت عملکرد سوئیچ، ولتاژ خروجی مبدل تقویت کننده تغییر می کند و تعیین می کند سوئیچ چه مدت نسبت به مدت چرخه روشن است ولتاژ خروجی با افزایش چرخه افزایش می یابد ولی نسبت عملکرد کاهش می یابد. مبدل های تقویت کننده اغلب در موقعیت های مختلف مانند تبدیل ولتاژ DC به DC، سیستم های انرژی تجدیدپذیر، دستگاه های باتری خور و منابع تغذیه الکترونیکی استفاده می شوند. آنها می توانند ولتاژ را به سطح مورد نظر افزایش دهند و در فعالیتهایی که ولتاژ ورودی کمتر از ولتاژ خروجی است، مفید هستند. [۱]



شکل ۱ بلوک دیاگرام سیستم PV متصل به شبکه دو مرحله ای

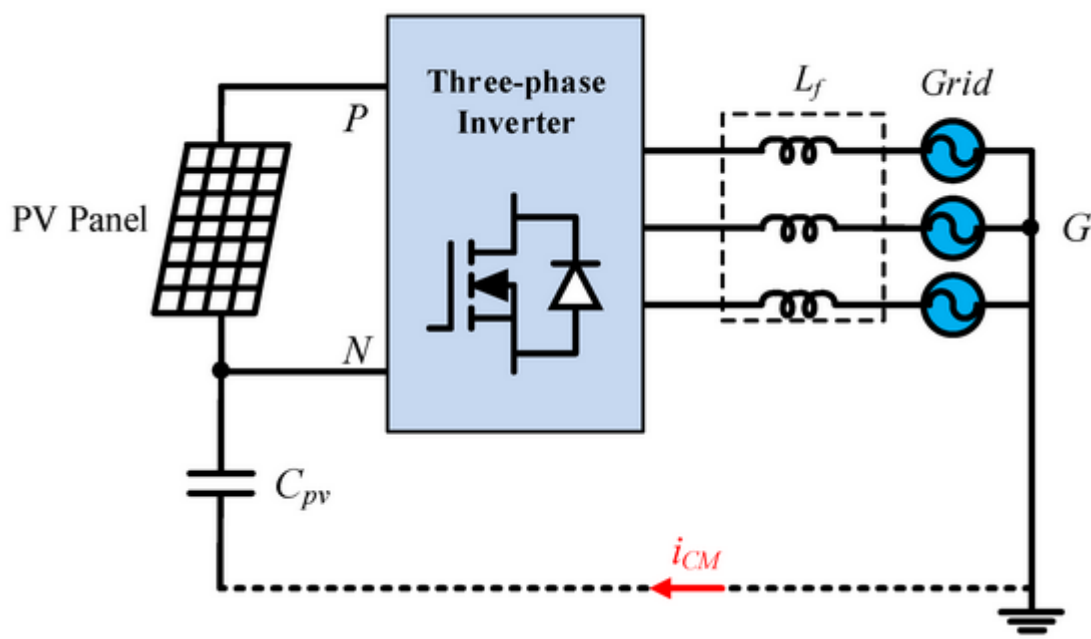
امروزه، منابع انرژی تجدیدپذیر نقش کلیدی در پشتیبانی از سیستم قدرت دارند در بین منابع انرژی تجدیدپذیر، منبع PV به دلیل اندازه نسبتاً کوچک، انرژی پاک، عملکرد بدون صدا و نصب ساده، یکی از مؤثرترین راه حل ها هستند [۲،۳،۴،۵]. برای اتصال آرایه PV با یک شبکه شهری، از اینورترهای متصل به شبکه برای سیستم های PV استفاده می شوند. اینورترها به دو دسته ترانسفورماتوری و بدون ترانسفورماتور تقسیم می شوند [۶،۷،۸،۹،۱۰] از ترانسفورماتور فرکانس بالا در سمت DC یا ترانسفورماتور فرکانس پایین و حجیم در سمت AC برای اطمینان از مسئله ایمنی و جداسازی گالوانیکی بین دو طرف خروجی و ورودی استفاده

میشود [۱۱،۱۲،۱۳]. با این اوصاف، توپولوژی های مبتنی بر ترانسفورماتور سنگین، پرهزینه و پرتلفات هستند. راندمان اینورتر بدون ترانسفورماتور می تواند تا ۲٪ بهبود یابد. [۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹].

اینورترهای منبع ولتاژ (VSI) به خصوص توپولوژی های سه فاز بدون ترانسفورماتور دوسطحی، رایج ترین راه حل برای تبدیل ولتاژ DC به ولتاژ متناوب در هر سیستم قدرتی هستند. از ویژگی های آنها می توان به هزینه کم، پیاده سازی آسان و تکنولوژی کامل اشاره کرد، با این حال، نقطه ضعف توپولوژی های بدون ترانسفورماتور، اتصال آرایه PV به شبکه بدون جداسازی گالوانیکی است.

آژانس های بین المللی برای اینورترهای PV استاندارد هایی را برای جلوگیری از نگرانی های ایمنی تنظیم کرده اند، دلیل اصلی این نگرانی های ایمنی وجود ظرفیت سرگردان بزرگ ((CPV بین پانل PV و زمین شبکه است. (شکل ۱-۱) ممکن است یک مسیر مستقیم زمین-جریان بین شبکه و پانل PV تشکیل شود. به دلیل وجود ظرفیت سرگردان بین پانل PV و زمین های شبکه، ولتاژ حالت مشترک ((CMV می تواند ظاهر شود. جریان ناشی از نوسانات CMV منشاء می گیرد. سپس، جریان ناشی از طریق زمین و آرایه PV جریان می یابد. و منجر به افزایش انتشار الکترومغناطیسی تابشی، هارمونیک های جریان بالاتر و تلفات و قابلیت اطمینان پایین توپولوژی های اینورتر بدون ترانسفورماتور PV متصل به شبکه می شود [۲۰،۲۱،۲۲].

باتوجه به این مسائل، جریان ناشی باید به دقت مدیریت شود. جریان ناشی باید کمتر از استاندارد VDE ۳۰۰ میلی آمپر باشد تا از اثرات نامطلوب در ۱-۱-۱۲۶ VDE جلوگیری شود، جریان ناشی را می توان با کاهش دامنه و فرکانس CMV یا شکستن آرایه PV شبکه در سمت DC سیستم اینورتر سرکوب کرد. [۲۳]



شکل ۲ پیکربندی معمولی VSI بدون ترانسفورماتور سه فاز با استفاده از یک فیلتر L

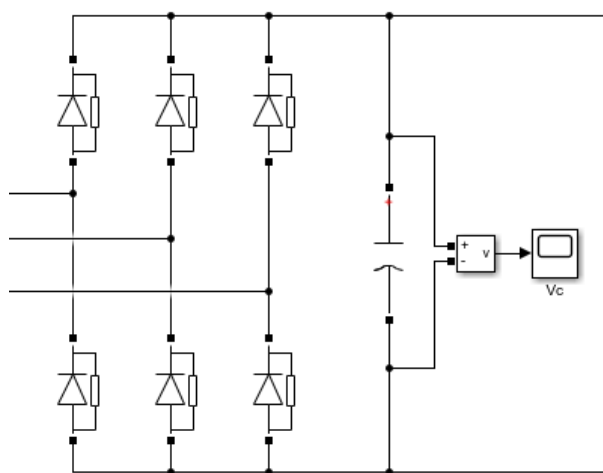
## 2-اهداف تحقیق

باید توجه داشت که تمام فرآیند مدولاسیون برای هدف پیاده سازی میتواند زمان بر باشد که علت آن یافتن موقعیت بردار مرجع به علاوه اجرای محاسبات ضروری برای اجرای مدولاسیون می باشد. علاوه بر آن با افزایش تعداد سطوح در مبدلهای چند سطحی زمان محاسبات مدولاتور برای SPWM متداول افزایش می یابد. به هر حال کاهش در زمان پروسه مدولاتور به بهره برداری بهتر از مزایای مبدل چند سطحی منجر می شود [۴-۱] بنابراین گسترش تحقیقات با در نظر گرفتن جزئیات در قسمت های مختلف مدولاسیون برداری با هدف کاهش زمان اجرای مدولاسیون ضروری به نظر می رسد.

### 3-مدل سازی در متلب

مطابق بلوک های سیمولنک از سه منبع سینوسی برای مدل کردن برق سه فاز ورودی استفاده شده است. مقدار مؤثر ولتاژ هر فاز برابر با ۲۲۰ ولت بوده و فرکانس برق شهر برابر با ۵۰ Hz در نظر گرفته شده است. همچنین، لازم به ذکر است که منابع با یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند. در ادامه

یکسوکننده سه فاز تمام پل به همراه فیلتر خازنی در شکل (2) نشان داده شده است. این یکسوکننده از ۶ عدد دیود تشکیل شده و در خروجی آن از یک خازن ۵ mF به منظور DC کردن ولتاژ خروجی یکسوکننده استفاده شده است. همچنین، از یک سنسور ولتاژ برای اندازه گیری ولتاژ لینک DC و یک اسکوپ برای نمایش شکل موج ولتاژ DC استفاده شده است. ورودی یکسوکننده به منابع سه فاز ورودی وصل می شود.



شکل ۳ شکل موج ولتاژ DC

ساختار اینورتر که متشکل از ۶ کلید IGBT است. ورودی اینورتر به لینک DC وصل شده و خروجی آن برای تغذیه موتور استفاده می گردد. لازم به ذکر است که فرمان کلیدهای IGBT از بخش کنترل حاصل می شود.

بلوک مدل کننده موتور القایی انتخاب شده است. در این شبیه سازی، گشتاور بار برابر با مقدار ثابت ۱۰ m.N انتخاب شده است. با استفاده از پورت اندازه گیری این بلوک، جریان سه فاز استاتور، گشتاور الکترومغناطیسی و سرعت روتور اندازه گیری شده و با استفاده از چند اسکوپ، این کمیت ها نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که از سرعت بر حسب دور بر دقیقه (RPM) برای بخش کنترل فیدبک گرفته شده است. همچنین، برای تبدیل سرعت از رادیان بر ثانیه به دور بر دقیقه از ضریب  $30/\pi$  استفاده شده است.

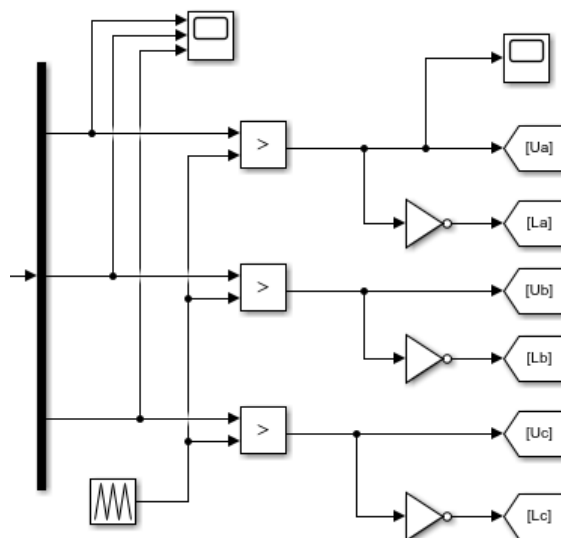
### 2-3 محاسبه ی اختلاف سرعت مرجع با سرعت اندازه گیری شده

در اینجا، سرعت مرجع برابر با ۱۰۰۰ RPM انتخاب شده است. همچنین، از یک بلوک Mux و اسکوپ برای نمایش همزمان این دو سرعت استفاده شده است تا بدین ترتیب، عملکرد سیستم کنترلی به خوبی نمایش داده شود. خروجی این تفریق به کنترل کننده PI اعمال می شود. از بلوک MATLAB Function برای پیاده سازی کنترل کننده PI استفاده شده است. خروجی این کنترل کننده، فرکانس ولتاژ اعمالی به موتور را تعیین می کند.

### 3-3 پالس های PWM

شکل زیر نحوه تولید پالس های PWM را نشان می دهد. ابتدا با استفاده از یک Demux مؤلفه های بردار ولتاژ مرجع سه فاز جدا می شوند. سپس، هریک از ولتاژهای مرجع با موج حامل مقایسه شده و در صورتی که مقدار آن بزرگ تر باشد، خروجی برابر با یک و در غیر این صورت، برابر با صفر است. خروجی هر کدام از بلوک های مقایسه کننده به عنوان فرمان کلیدهای بالایی هر کدام از ساق-

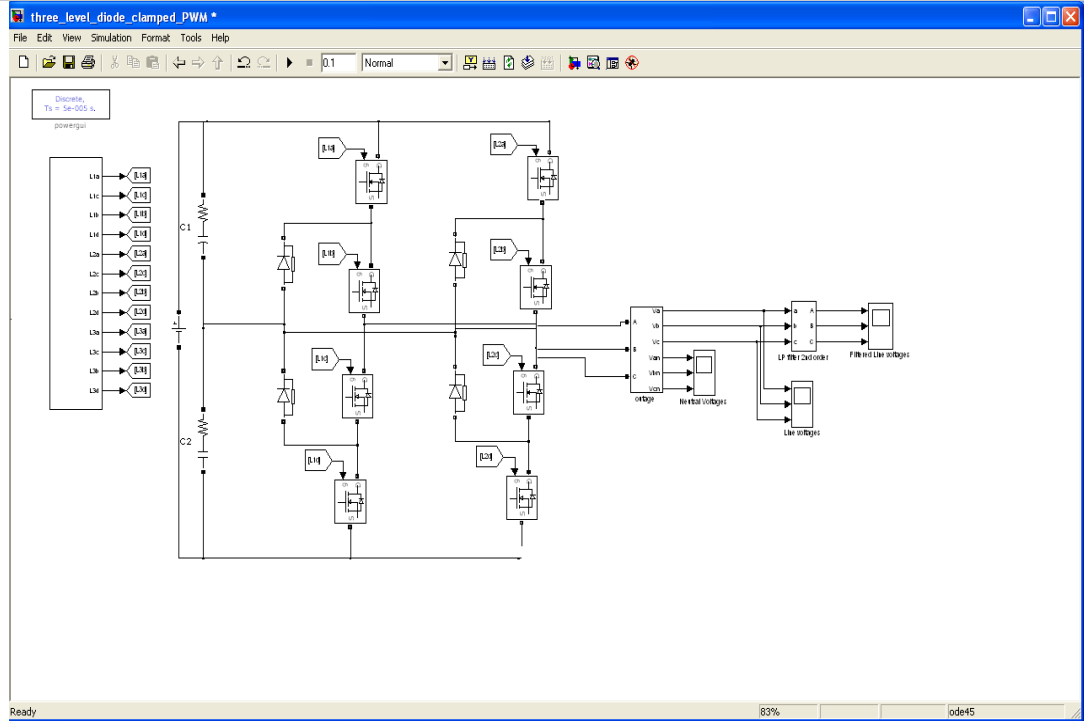
های اینورتر در نظر گرفته می شود. فرمان کلیدهای پایینی هر ساق، از مکمل کردن (Not کردن) کلید بالایی خود به دست می آید. در نهایت، با استفاده از بلوک های goto، این پالس ها به کلیدهای IGBT اینورتر اعمال می شوند. لازم به ذکر است که برای نمایش کمیت های مختلف، از اسکوپ نیز استفاده شده است. (شکل-۴)



شکل ۴ تولید پالس های PWM

### 3-4 شکل موج خروجی :

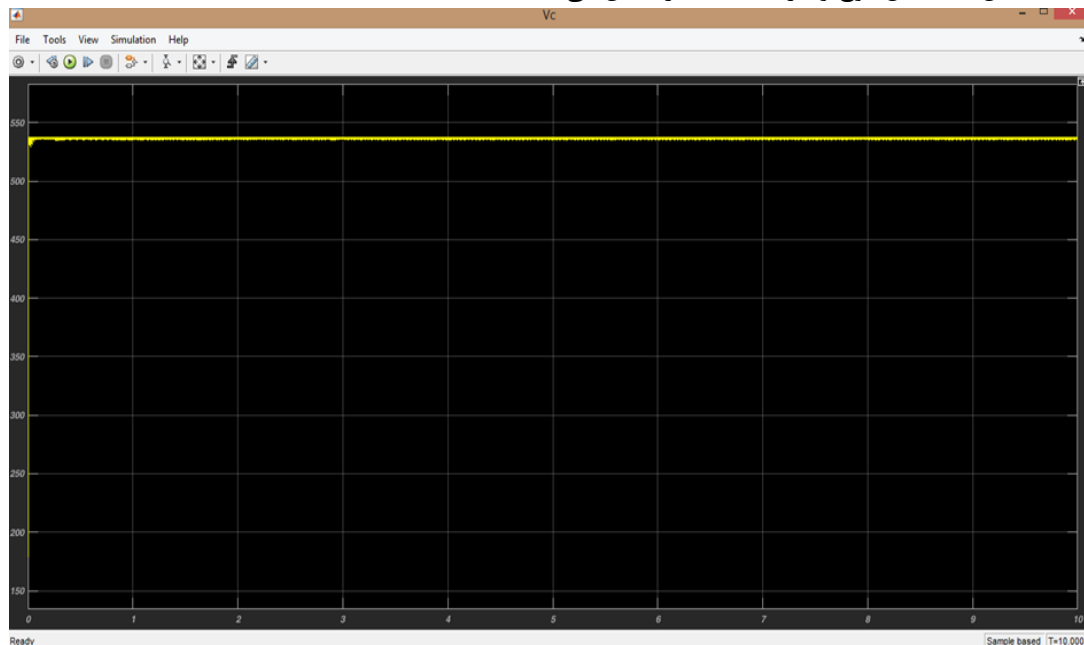
کلید در اینورتر ساده توضیح داده شده در بالا یک شکل موج ولتاژ مربعی تولید می کند. در عوض موج سینوسی که شکل موج متداول منبع تغذیه AC است. با استفاده از تحلیل فوریه، شکل موج متناوب متشکل از مجموعی از بی نهایت سری از موج های سینوسی است. موج سینوسی که همان فرکانس را دارد به عنوان شکل موج اصلی، مولفه اصلی نامیده می شود. شکل موج های سینوسی دیگر، هارمونیک نامیده می شوند، که شامل یک سری با مضارب صحیح فرکانس اصلی هستند. کیفیت شکل موج خروجی اینورتر می تواند برای محاسبه اعوجاج هارمونیک کل (THD) با استفاده از اطلاعات آن الیز فوریه بیان شود. اعوجاج هارمونیک کل جذر مجموع مربعات ولتاژ هارمونیک ها تقسیم بر ولتاژ اصلی است. شکل 5 مدار سیمولینک طراحی شده برای اینورتر 3 سطحی در محیط متلب نشان میدهد



شکل ۵. شکل مدار سیمولینک طراحی شده برای اینورتر ۳ سطحی :

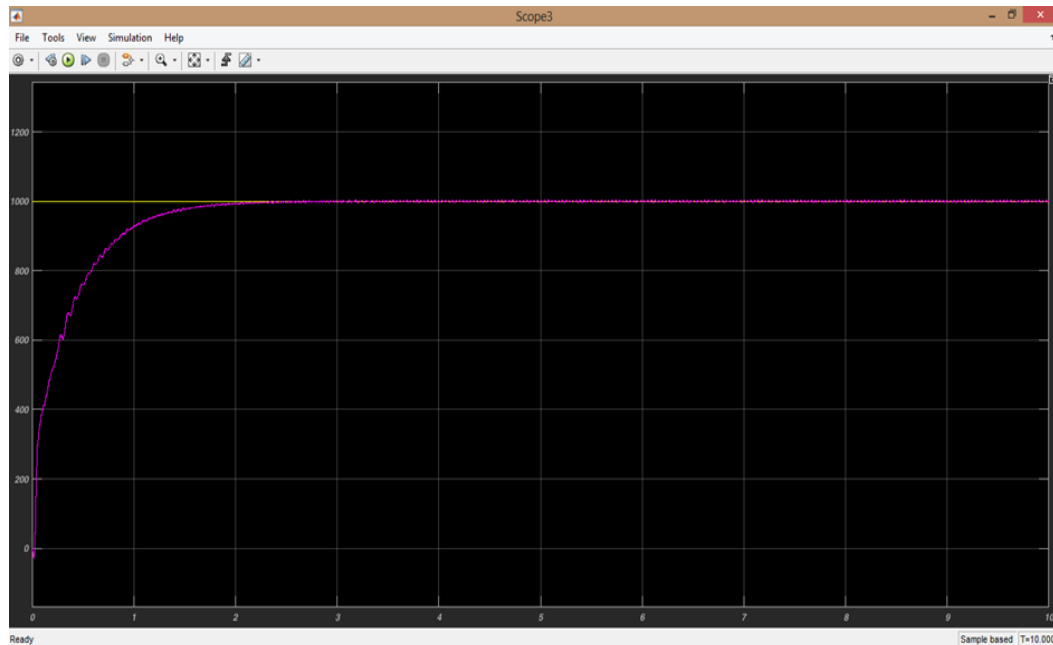
#### 4-نتایج شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی سیستم شبیه سازی شده در نرم افزار MATLAB/Simulink ارائه می گردد. نتایج مربوط موج ولتاژ؛ لینک DC یک ولتاژ DC با مقدار متوسط حدودی ۵۳۷ ولت در خروجی یکسوکننده تمام موج با فیلتر خازنی حاصل می شود. لازم به ذکر است که مقدار ظرفیت خازن ۵ میلی فاراد انتخاب شده است. شکل (۶) شکل موج ولتاژ لینک DC را نشان می دهد.



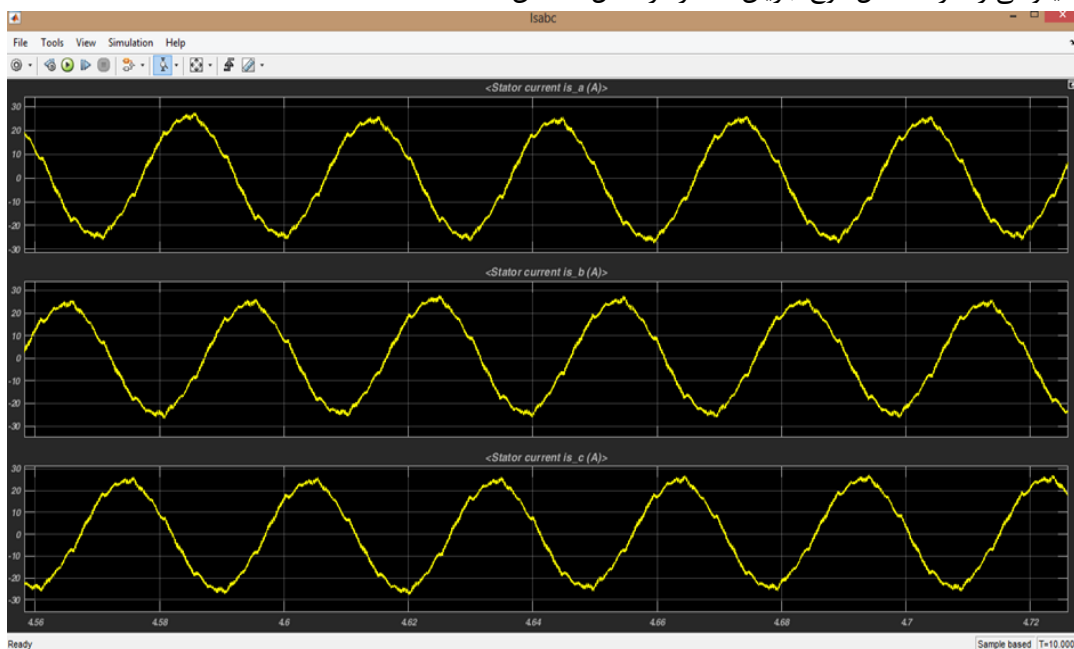
شکل ۶ ولتاژ لینک DC

موج سرعت موتور در این شبیه‌سازی، سرعت مرجع برابر با  $1000 \text{ rpm}$  انتخاب شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، خطای خروجی برابر با صفر بوده و خروجی در زمان کوتاه و بدون بالازدگی در مقدار مرجع تثبیت می‌شود. شکل ۷، سرعت موتور (رنگ صورتی) را به همراه سرعت مرجع (رنگ زرد) برحسب  $\text{rpm}$  نشان می‌دهد.



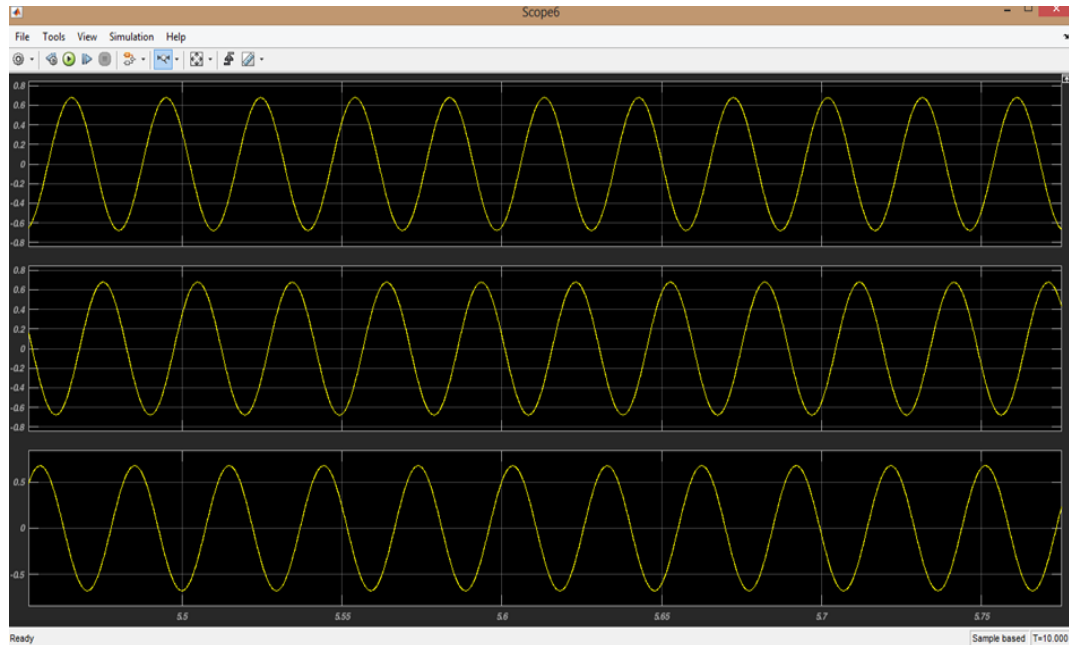
شکل ۷ موج سرعت موتور

نتایج مربوطه موج جریان سه‌فاز به این صورت است که استاتور جریان‌های موتور متعادل بوده و شکل تقریباً سینوسی را دارند. شکل موج جریان سه‌فاز در شکل ۸ نشان داده شده است.



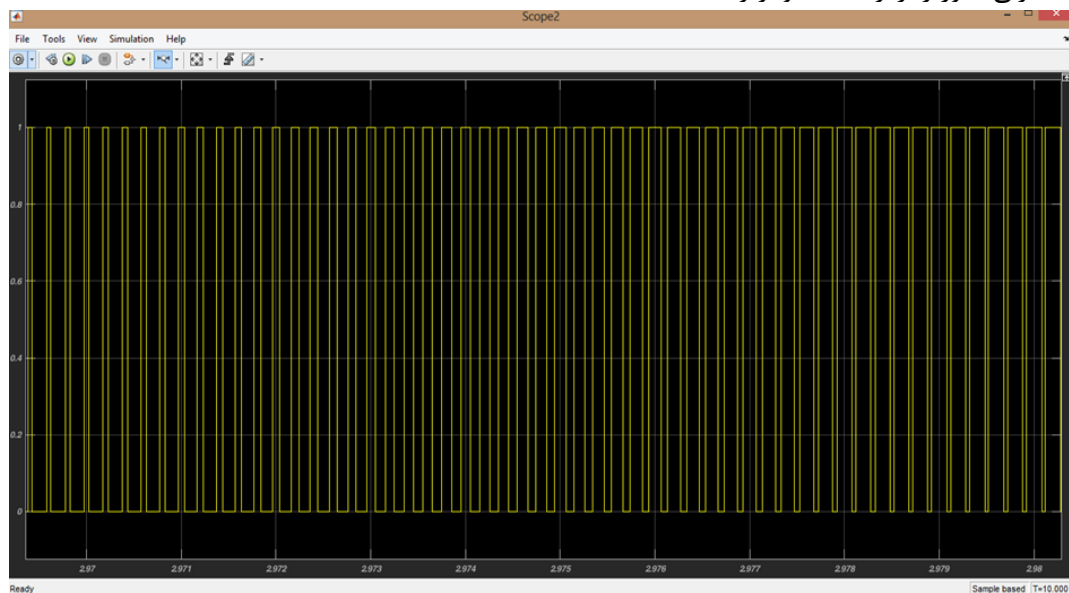
شکل ۸ موج جریان‌های استاتور

طبق انتظار، ولتاژهای مرجع متعادل بوده و شکل کاملاً سینوسی دارند. همچنین، چنانچه در بخش‌های قبل بیان شد، این ولتاژها به صورت پریونیت هستند. شکل ۹، ولتاژهای مرجع سه فاز که برای تولید پالس‌های کلیدزنی اینورتر استفاده می‌شوند، را نشان می‌دهد.



شکل ۹ موج ولتاژهای مرجع

شکل ۱۰ یک نمونه فرمان کلیدزنی را نشان می‌دهد. این فرمان مربوط به کلید بالایی فاز a می‌باشد، چنانچه مشاهده می‌شود، پهنای پالس متناسب با مقدار سیگنال مرجع متغیر بوده و بدین ترتیب یک مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) برای کنترل اینورتر حاصل شده است. همچنین لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، فرکانس موج حامل و در نتیجه فرکانس کلیدزنی اینورتر برابر با ۵ کیلوهرتز انتخاب شده است.

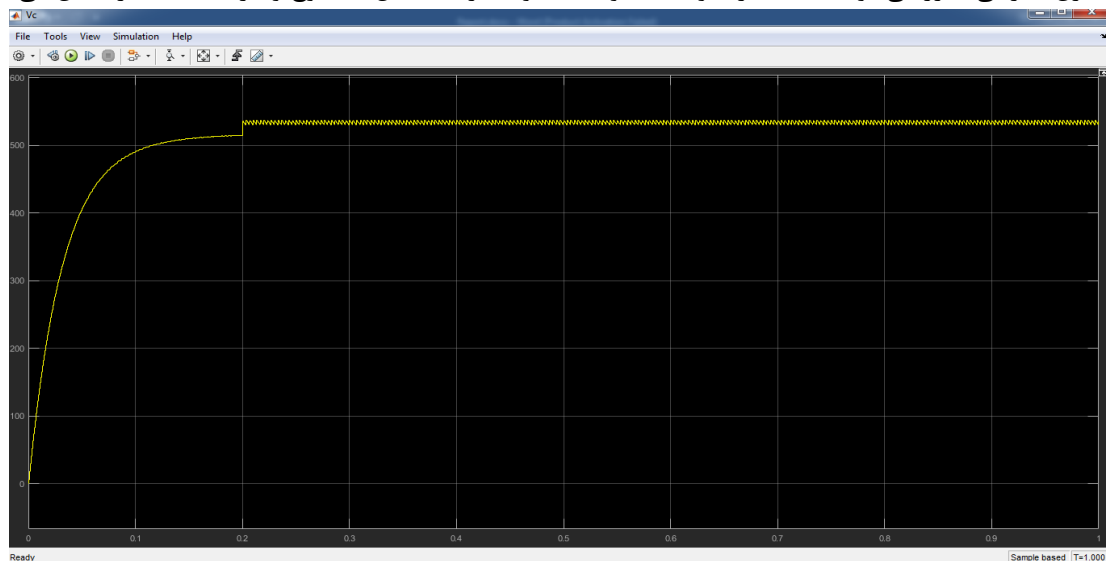


<sup>1</sup> Sinusoidal Pulse Width Modulation



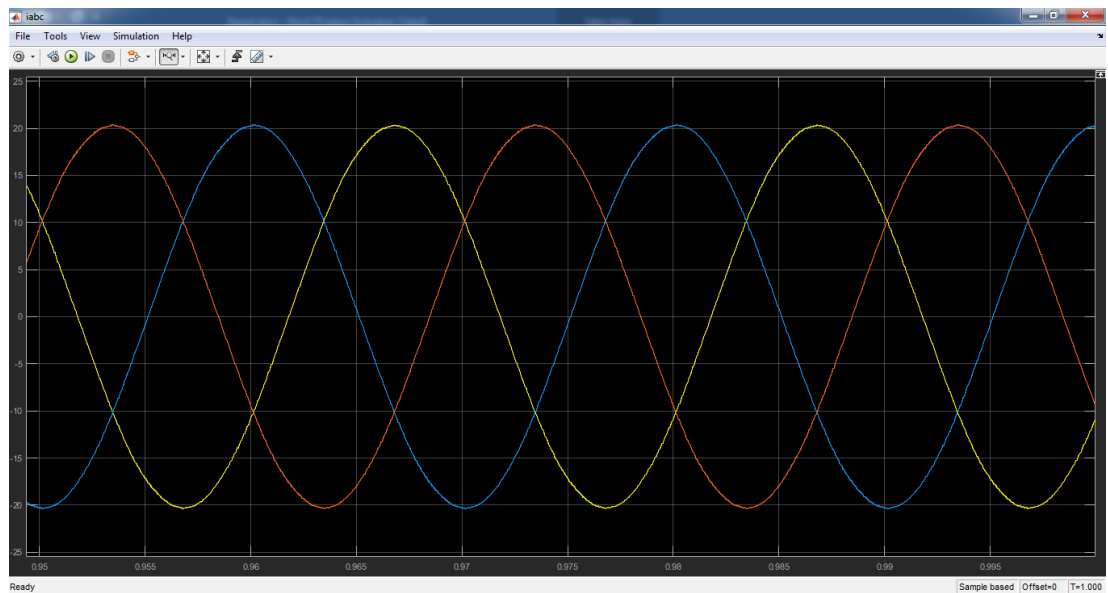
### شکل ۱۰ موج پالس کلیدزنی کلید بالایی فاز a

خازن به آرامی شارژ می شود تا به مقدار متوسط حدوداً ۵۳۴ ولت برسد. شکل ۱۱ موج ولتاژ لینک DC را نشان می دهد.



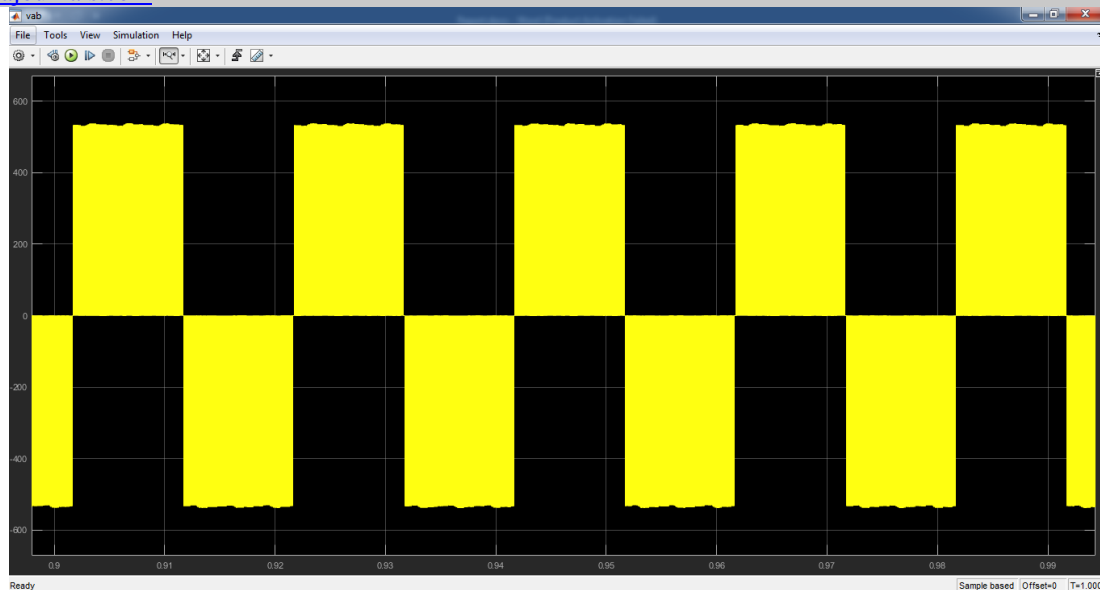
### شکل ۱۱ ولتاژ لینک DC

جریان های خروجی متعادل است و شکل سینوسی دارند. موج جریان سه فاز در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



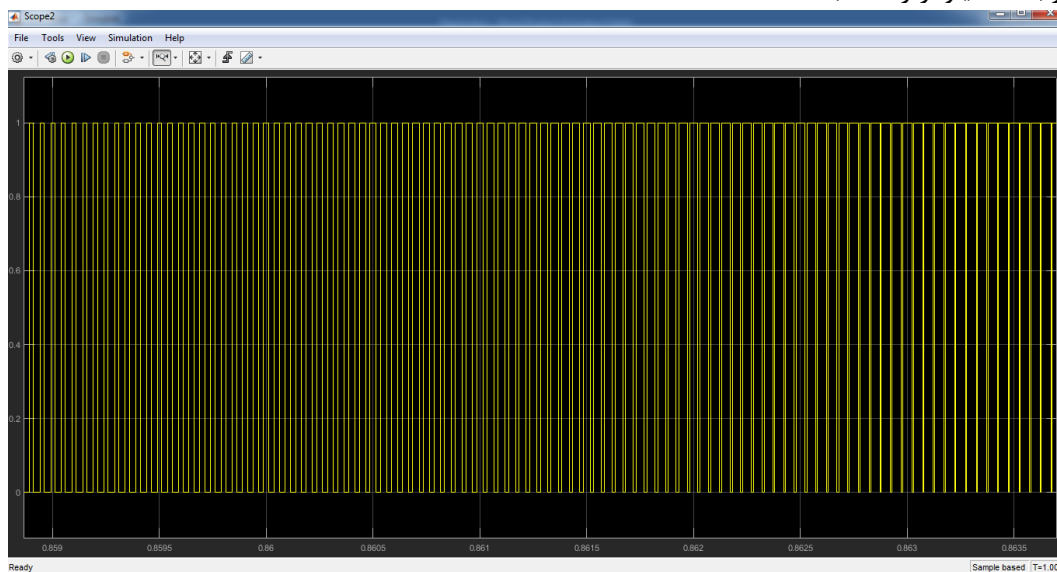
### شکل ۱۲ شکل موج جریان های بار

شکل ۱۳، ولتاژ خط را نشان می دهد. چنانچه انتظار می رفت یک ولتاژ سه سطحی در خط خروجی ظاهر شده است.



شکل ۱۳ موج ولتاژ خط

شکل ۱۴ یک نمونه فرمان کلیدزنی را نشان می دهد. این فرمان مربوط به کلید بالایی فاز a می باشد. چنانچه مشاهده می شود، پهنای پالس متناسب با مقدار سیگنال مرجع متغیر است و بدین ترتیب یک مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) برای کنترل اینورتر حاصل شده است. همچنین لازم به ذکر است که در این شبیه سازی، فرکانس موج حامل و لذا فرکانس کلیدزنی اینورتر برابر با ۲۰ کیلوهرتز انتخاب شده است.



شکل ۱۴ موج پالس کلیدزنی کلید بالایی فاز a

### 5- نتیجه گیری

در این پژوهش، ولتاژ DC برابر با ۵۳۷ ولت در خروجی یکسوکننده ی تمام موج با فیلتر خازنی است. سرعت مرجع برابر با rpm در ۱۰۰۰ انتخاب شده است. خطای خروجی برابر با صفر بوده و خروجی در زمان کوتاه و بدون بالازدگی در مقدار مرجع تثبیت می شود. جریان های موتور متعادل بوده و شکل تقریباً سینوسی را دارند. طبق انتظار، ولتاژهای مرجع متعادل بوده و شکل کاملاً سینوسی دارند. در موج پالس کلیدزنی، پهنای پالس متناسب با مقدار سیگنال مرجع متغیر بوده و بدین ترتیب یک مدولاسیون

پهنای پالس سینوسی (SPWM) برای کنترل اینورتر حاصل شده است. همچنین لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، فرکانس موج حامل و در نتیجه فرکانس کلیدزنی اینورتر برابر با ۵ کیلوهرتز انتخاب شده است. سپس خازن به آرامی شارژ می‌شود تا به مقدار متوسط حدوداً ۵۳۴ ولت برسد. جریان‌های خروجی متعادل است و شکل سینوسی دارند یک ولتاژ سه سطحی در خط خروجی ظاهر شده است. یک مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) برای کنترل اینورتر حاصل شده است. مبدل منبع ولتاژ سرعت VSI، عموماً برای تغذیه یک موتور القایی سه فاز با فرکانس و ولتاژ متغیر برای کاربردهای سرعت متغیر استفاده می‌شود. یک تکنیک مدولاسیون پهنای پالس مناسب برای به دست آوردن ولتاژ خروجی مورد نیاز در طرف خط اینورتر بکار گرفته می‌شود. روشهای مختلفی برای تولید شکل موج ولتاژ خروجی مبنی بر SPWM وجود دارد که پرکاربردترین آنها SPWM مبتنی بر حامل مثلثی و مبتنی بر بردار فضایی می‌باشد. در روشهای SPWM مانند PWM سینوسی - مثلثی جهت تولید سگنالهای SPWM سیگنالهای مدوله کننده مرجع سه فاز با حامل مثلثی مقایسه می‌شوند. ...

#### منابع

1. Ezhilvannan, P., Krishnan, S., Hemanth Kumar, B., Janardhan, K., & Ramachandran, S. (2023). Analysis of the Effectiveness of a Two-Stage Three-Phase Grid-Connected Inverter for Photovoltaic Applications. *Journal of Solar Energy Research*, 8(2), 1471-1483.
2. Abramovitz, A.; Shmilovitz, D. Short Survey of Architectures of Photovoltaic Arrays for Solar Power Generation Systems. *Energies* 2021, 14, 4917
3. Bughneda, A.; Salem, M.; Richelli, A.; Ishak, D.; Alatai, S. Review of Multilevel Inverters for PV Energy System Applications. *Energies* 2021, 14, 1585.
4. Subramaniam, U.; Bhaskar, S.M.; Almakhlles, D.J.; Padmanaban, S.; Leonowicz, Z. Investigations on EMI Mitigation Techniques: Intent to Reduce Grid-Tied PV Inverter Common Mode Current and Voltage. *Energies* 2019, 12, 3395.
5. Nguyen, M.K.; Duong, T.D.; Lim, Y.C.; Kim, Y.J. Isolated boost DC-DC converter with three switches. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 33, 1389-1398.
6. Duong, T.D.; Nguyen, M.K.; Tran, T.T.; Lim, Y.C.; Choi, J.H. Transformerless High Step-Up DC-DC Converters with Switched-Capacitor Network. *Electronics* 2019, 8, 1420.
7. Mohamed Hariri, M.H.; Mat Desa, M.K.; Masri, S.; Mohd Zainuri, M.A.A. Grid-Connected PV Generation System-Components and Challenges: A Review. *Energies* 2020, 13, 4279.
8. Ali Khan, M.Y.; Liu, H.; Yang, Z.; Yuan, X. A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters, Their Modulation Techniques, and Control Strategies. *Energies* 2020, 13, 4185
9. Jo, K.Y.; Duong, T.D.; Nguyen, Y.C.; Choi, J.H. Emerging Technologies in Power Systems. *Electronics* 2022, 11, 71.
10. Zhai, L.; Lin, L.; Zhang, X.; Song, C. The Effect of Distributed Parameters on Conducted EMI from DC-Fed Motor Drive Systems in Electric Vehicles. *Energies* 2017, 10, 1.
11. Monjo, L.; Sainz, L.; Mesas, J.J.; Pedra, J. Quasi-Z-Source Inverter-Based Photovoltaic Power System Modeling for Grid Stability Studies. *Energies* 2021, 14, 508.
12. Duong, T.D.; Nguyen, M.K.; Lim, Y.C.; Choi, J.H.; Wang, C.; Vilathgamuwa, M. Modeling and Control of a Discontinuous Quasi-Switched Boost Cascaded Multilevel Inverter for Grid-Tied Applications. In Proceedings of the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 11-15 October 2020; pp. 3261-3265.
13. Ponraj, R. P., & Sigamani, T. (2021). A novel design and performance improvement of symmetric multilevel inverter with reduced switches using genetic algorithm. *Soft Computing*, 25(6), 4597-4607. doi:10. 007/s00500-020-05466-7.

14. Balal, A., Dinkhah, S., Shahabi, F., Herrera, M., & Chuang, Y. L. (2022). A review on multilevel inverter topologies. *Emerging Science Journal*, 6(1), 185-200.

15. <https://web.archive.org/web/20121030072941/http://hsc.csu.edu.au/physics/core/motors/2694/Phy934net.htm>

16. *NEMA MG-1 2007 Condensed (2008). Information Guide for General Purpose Industrial AC Small and Medium Squirrel-Cage Induction Motor Standards. Rosslyn, Virginia US: NEMA. p. 29 (Table 11).*

17. Babbage, C. & Herschel, J. F. W. (January 1825). "Account of the Repetition of M. Arago's Experiments on the Magnetism Manifested by Various Substances during the Act of Rotation". *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 115: 467-496

18. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/fuzzy-pi-controllers.html>

19. <https://www.monolithicpower.com/en/power-electronics/dc-ac-converters/three-phase-inverters>

۲۰. صلح روشن، آرمین، علیزاده پهلوانی، محمدرضا، دهستانی کلاگر، آرش (۱۳۹۸)، کنترل پیش‌بینی بهینه اینورتر شبه منبع امپدانس سه‌فاز چهار ساق دوسطحی

۲۱. صادقی لاریجانی، علی، شاه‌پرستی، مهدی، محمدیان، مصطفی، و یزدیان ورجانی، علی، (۱۳۹۰)، الگوریتم جدید کلیدزنی جهت جبران‌سازی انحراف ولتاژ خازن‌های لینک DC اینورتر NPC در روش کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی سه‌فاز، مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، ۱۹(۱)، ۴۵-۵۱. <https://sid.ir/paper/fa/53772>

۲۲. براتی، حسن، کریمی، حمید، سیفی، علیرضا (۱۳۸۹) شبیه‌سازی و مقایسه عملکرد اینورتر سه‌فاز دوسطحی با مدولاسیون- (SVPWM) و بردار فضایی ((SPWM) های پهنای پالس سینوس

۲۳. بخشایی، علیرضا، سلیقه زاد، حمیدرضا، سعیدی‌فر، مریم، و رحیمی، علی، (۱۳۸۳)، کنترل اینورترهای منبع ولتاژ چندسطحی سه‌فاز با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی و به کمک روش کلاسه بندی بردارها ، استقلال <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=411-31-10>

24. O. B. Shonin, N. G. Novozhilov and S. B. Kryltsov, "Sensorless estimation of the rotor speed for the use in V/f control systems of IM drives," 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911525.

25. Hunasikatti, Kavita B., Raghuram L. Naik, and Basayya V. Hiremath. "Implementation of FPGA Based Closed Loop V/f Speed Control of Induction Motor Employed for Industrial Applications." 2018 Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC). IEEE, 2018.