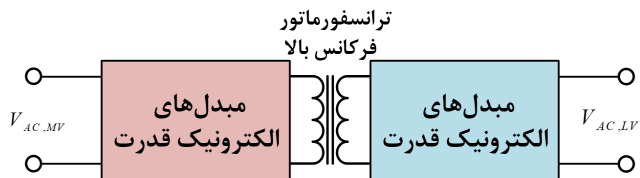
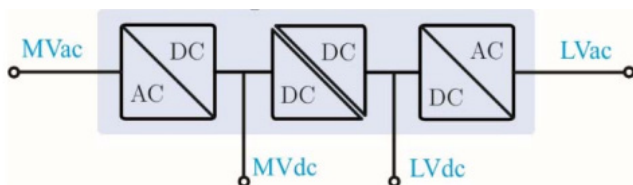


# مدل سازی یک پارچه ترانسفورماتور حالت جامد دوطرفه: طبقه‌های یکسوساز، مبدل DC به DC و اینورتر

حامد ملاحمدیان کاسب، مرتضی شفیعی و جاوید خراسانی



شکل ۱: ساختار کلی ترانسفورماتور حالت جامد [۶].



شکل ۲: ساختار کلی ترانسفورماتور هوشمند [۱۰].

نمونه‌ای از این موارد هستند. از طرف دیگر توسعه شبکه‌های هوشمند و ایجاد انعطاف بیشتر در شبکه با استفاده از ترانسفورماتورهای سنتی دارای محدودیت‌های بسیاری است [۱]. ظهور انواع جدید مبدل‌های توان و نیز شبکه‌های هوشمند، محققان را به سمت نسل جدید ترانسفورماتورها که ترانسفورماتور حالت جامد (SST) نامیده می‌شوند، سوق داده است. این ترانسفورماتورها با تکیه بر مدارهای الکترونیک قدرت، قابلیت مانور و کنترل شبکه را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهند [۲]. علاوه بر موارد قبلی، بهبود راندمان انتقال انرژی و کیفیت توان نیز با استفاده از فناوری جدید ترانسفورماتور حالت جامد مهیا می‌گردد.

SST شامل یک یا چند مبدل الکترونیک قدرت و یک ترانسفورماتور یک‌پارچه فرکانس بالا است. ساختار کلی ترانسفورماتور حالت جامد به صورت شکل ۱ می‌باشد. این تجهیز در مقالات و کارهای تحقیقاتی متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته [۲] تا [۷] و جهت تحقق ساختار شکل ۱ روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است [۲]، [۷] و [۸].

ترانسفورماتور هوشمند، یک ترانسفورماتور حالت جامد است که برای تأمین خدمات جانبی<sup>۲</sup> به شبکه‌های توزیع و انتقال، با هدف بهینه‌سازی عملکرد آنها اضافه می‌شود [۹]. در واقع ترانسفورماتور هوشمند، از نظر ساختاری همان ترانسفورماتور حالت جامد است که در آن، انتخاب ساختار، بلوک‌های ساختمانی و ساینبدی‌ها و نیز عملکردهای کنترلی کل سیستم یا هر یک از طبقات، با توجه به خدمات مورد نیاز شبکه انجام می‌گیرد. در شکل ۲ ساختار کلی ترانسفورماتور هوشمند نشان داده شده است. از جمله خدمات هوشمندی که ترانسفورماتور هوشمند به شبکه ارائه می‌دهد، می‌توان به مواردی چون کنترل پخش توان در شبکه‌های

چکیده: یکی از تجهیزات جدید و در حال رشد و توسعه در شبکه‌های قدرت مدرن، ترانسفورماتور حالت جامد یا ترانسفورماتور الکترونیک قدرت می‌باشد. این نوع از ترانسفورماتورها مبتنی بر کلیدهای نیمه‌هادی قدرت و ترانس فرکانس بالا می‌باشند و نسبت به ترانسفورماتورهای سنتی دارای قابلیت‌های متعددی از قبیل قابلیت کار با دامنه و فرکانس متغیر ولتاژ ورودی، تنظیم اتوماتیک ولتاژ خروجی و اصلاح ضریب توان ورودی هستند. ترانسفورماتور مورد بررسی، قابلیت انتقال توان دوطرفه داشته و دارای سه طبقه یکسوساز، میانی و اینورتر می‌باشد. این ترانسفورماتور دارای تعداد زیادی کلید نیمه‌هادی بوده و مدل‌سازی، تحلیل، طراحی و شبیه‌سازی آن دشوار و پیچیده است. در این گونه موارد، استفاده از تئوری متوسط‌گیری، راه حلی مناسب به نظر می‌رسد. در این مقاله، تئوری متوسط‌گیری بر روی ترانسفورماتور حالت جامد اعمال شده و مدل‌سازی آن با روشی ساده و قدرتمند با قابلیت بررسی حالت‌های گذرا و دائمی، صورت گرفته است. مدل‌سازی پیشنهادی شامل معادلات دیفرانسیل و مدار معادل مداری بوده و مدل یک‌پارچه ترانسفورماتور با قابلیت بررسی برهم‌کنش بین طبقات را به عنوان جزئی از سیستم قدرت ارائه می‌دهد. مدل‌های حاصل در شبیه‌سازی شبکه‌های هوشمند، ریزشبکه‌های DC و اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه و همچنین تحلیل و طراحی رفتار ترانسفورماتور حالت جامد در حوزه‌هایی چون انرژی‌های نو و حمل و نقل برقی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کنار مدل‌سازی ارائه‌شده، ساختار کنترل حلقه بسته برای هر سه طبقه پیاده‌سازی گردیده است. شبیه‌سازی ترانسفورماتور از طریق پیاده‌سازی معادلات دیفرانسیل در محیط SIMULINK نرم‌افزار MATLAB صورت پذیرفته و تأییدکننده مدل پیشنهادی می‌باشد.

کلیدواژه: یکسوساز، مبدل DC به DC، اینورتر، ترانسفورماتور حالت جامد، مدل دینامیکی، مدل متوسط‌گیری شده.

## ۱- مقدمه

شبکه‌های مدرن انرژی الکتریکی مشتمل بر انواع تولیدکننده‌های توان الکتریکی می‌باشند. این انواع جدید دارای خروجی‌های توان به شکل‌های مختلفی هستند و بنابراین برای اتصال به شبکه نیاز به استفاده از مبدل‌های توان دارند. مبدل‌های به کار رفته در مزارع بادی و خورشیدی

این مقاله در تاریخ ۷ آذر ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۲۴ اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ بازنگاری شد.

حامد ملاحمدیان کاسب (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، مؤسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران، (email: ahmadian@khorasan.ac.ir).

مرتضی شفیعی، واحد طراحی سامانه‌های کنترلی، پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران، (email: mortezashafiee@um.ac.ir).

جاوید خراسانی، گروه مهندسی برق، مؤسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران، (email: khorasani@khorasan.ac.ir).

1. Solid State Transformer
2. Ancillary Services

و از دیدگاه متوسط‌گیری در این مقاله استفاده شده است.

در این مقاله، ولتاژ ورودی ترانسفورماتور به وسیله طبقه یکسوساز به DC تبدیل شده است. این طبقه مشتمل بر یک یکسوساز اصلاح‌کننده ضریب توان با قابلیت انتقال توان دوطرفه می‌باشد. مسئله مدل‌سازی یکسوساز ورودی به دلیل ماهیت چندطبقه آن در مقالات مربوط به مدل‌سازی مبدل‌های چندسطحی مورد توجه بوده است. در [۱۱] و [۲۱] تا [۲۳] مدل‌سازی مبدل چندسطحی ارائه شده است. روش مورد استفاده در [۲۲] و [۲۴] مبتنی بر مدل متوسط‌گیری بوده و قابل استفاده برای شبیه‌سازی، کنترل، تحلیل حالت گذرا و تحلیل هارمونیک می‌باشد. در این مقاله با تعمیم مدل‌های قبلی ارائه‌شده، مدل‌سازی یکسوساز در شرایطی که بار آن یک مبدل  $dc/dc$  ایزوله می‌باشد، انجام گرفته است.

ولتاژ DC فراهم‌شده در طبقه یکسوساز در طبقه میانی که یک مبدل DC به DC ایزوله است، تغییر سطح می‌دهد. مدل‌سازی مجزای این طبقه نیز در مراجع مختلفی از جمله [۲۵] ارائه شده است. یکی از نوآوری‌های این مقاله در مدل‌سازی این طبقه صورت گرفته است. خروجی طبقه قبل به عنوان یک منبع جریان وابسته در ورودی این طبقه و همچنین بار این طبقه به صورت یک منبع جریان وابسته به ورودی طبقه بعد یعنی اینورتر مدل‌سازی شده است.

نهایتاً در طبقه اینورتر، خروجی استاندارد مورد نیاز بار فراهم می‌گردد. مدل‌سازی اینورتر با نقطه نول فعال بر مبنای نظریه متوسط‌گیری در [۲۶] صورت گرفته و مدلی دینامیکی جهت این اینورتر ارائه شده است. برای مدل‌سازی این طبقه نیز مدل‌سازی‌های ارائه‌شده در [۶] و [۲۶] تعمیم داده شده و در شرایطی که تغذیه ورودی از یک مبدل  $dc/dc$  فراهم می‌شود، مدل‌سازی گردیده است. مدل نهایی حاصل، علی‌رغم سادگی، ترانس حالت جامد را به صورت یک پارچه مدل می‌کند و برهم‌کنش بین طبقات را به خوبی در نظر می‌گیرد.

در ادامه، مراجعی که مدل‌سازی یک پارچه ترانس حالت جامد را بررسی کرده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در [۲۷] مدل‌سازی ترانس حالت جامد با سه طبقه یکسوساز، میانی و اینورتر با هدف شبیه‌سازی در نرم‌افزار PSCAD ارائه گردیده است. مدل‌های ارائه‌شده برای هر طبقه، رفتار استاتیکی را به خوبی نمایش می‌دهند اما این مدل‌ها جهت بررسی رفتار حالت گذرا قابل استفاده نمی‌باشد. در [۲۸]، طبقه ورودی متفاوت با مقاله حاضر است و طبقه‌های میانی و اینورتر، علی‌رغم مشابهت در نوع توپولوژی، به دلیل تفاوت روش مدولاسیون دارای مدار معادل‌هایی متفاوت با مقاله حاضر می‌باشند. همچنین یک پارچه‌سازی مدل‌های طبقات در این مرجع به روشی متفاوت از مقاله حاضر ارائه شده است. مهم‌ترین دلیل تفاوت بین این دو مقاله، به نوع روش مدولاسیون برمی‌گردد. مقاله حاضر از روش مدولاسیون عرض پالس در طبقه اینورتر استفاده کرده است ولی در [۲۸] در طبقه اینورتر از روش برداری استفاده شده است.

در [۲۹] مدل سیگنال کوچک ترانس حالت جامد با خطی‌سازی مدل‌های دینامیکی طبقات، به دست آمده است. مبدل‌های مورد استفاده در ۳ طبقه ترانس، متفاوت با مبدل‌های انتخابی مقاله حاضر می‌باشند و در نتیجه امکان مقایسه مستقیم فراهم نیست. اما برای طراحی کنترل‌کننده می‌توان روش پیشنهادی این مرجع را به کار بست. در [۳۰] مدل‌سازی سیگنال کوچک مبدل چندسطحی با ورودی DC و خروجی AC یا DC ارائه شده است. مدار معادل تونن ارائه‌شده در این مرجع با تغییراتی برای مدل‌سازی ترانس حالت جامد قابل استفاده می‌باشد. همچنین بحث طراحی حلقه‌های کنترلی در این مرجع ارائه شده است.

فشارضعیف، فشارمتوسط با ولتاژهای AC و DC و ...، اصلاح فعال کیفیت توان<sup>۱</sup>، کنترل فرکانس در شرایط بهره‌برداری جزیره‌ای و کمک به عملیات بازیابی در شبکه‌های فعال توزیع انرژی الکتریکی اشاره نمود [۱۰]. از آنجایی که مقاله حاضر به مدل‌سازی هر یک از طبقات ترانسفورماتور حالت جامد به صورت مستقل و نیز یک پارچه می‌پردازد، نتایج این مقاله می‌تواند در طراحی و کنترل ترانسفورماتورهای هوشمند نیز مورد استفاده قرار گیرد.

در کاربردهایی که سطح ولتاژ ورودی یا خروجی ترانسفورماتور حالت جامد تفاوت زیادی با ولتاژ قابل تحمل کلید دارد، از تکنیک سری کردن طبقات استفاده می‌گردد. به دلیل محدودیت ولتاژ نامی کلیدهای نیمه‌هادی قدرت، تعداد طبقات سری در این مبدل‌ها بالا است. گروه تحقیقاتی آزمایشگاه سیستم‌های الکترونیک قدرت دانشگاه ETH با کار بر روی یک ترانسفورماتور حالت جامد با ظرفیت ۱ MVA، اقدام به طراحی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی کرده است [۴]. از طرف دیگر با معرفی فناوری سیلیکون-کاربید<sup>۲</sup> (SiC) برای کلیدهای نیمه‌هادی قدرت و ارائه کلیدهای تا ۱۰ کیلوولت، نمونه‌ای با تعداد طبقات کمتر و پیچیدگی پایین‌تر نیز طراحی و ساخته شده است [۵]، [۱۱] و [۱۲]. اما در حال حاضر هنوز نمونه‌های تجاری این کلیدها با ولتاژ کاری بالا ارائه نشده است. جهت شارژ خودروهای برقی نیز در [۱۳] یک توپولوژی ترانس حالت جامد پیشنهاد شده است. در [۱۴] بر اساس مبدل تمام‌پل، یک توپولوژی جدید برای ترانس حالت جامد با ورودی و خروجی DC پیشنهاد شده است.

ساختار پیشنهادی این مقاله، قابلیت انتقال توان در دو جهت را دارا بوده و اصلاح ضریب توان، رگولاسیون ولتاژ و ... را به خوبی به کمک حلقه‌های کنترل پسخور انجام می‌دهد. جهت فراهم‌آمدن دانش مورد نیاز برای شبیه‌سازی، تحلیل و طراحی کنترل‌کننده، در این مقاله مسئله مدل‌سازی یک پارچه مورد توجه قرار گرفته است. مدل حاصل، به منظور شبیه‌سازی سریع و با پیچیدگی پایین شبکه‌های هوشمند، ریزشبکه‌های DC و اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه و همچنین تحلیل و طراحی رفتار ترانس در حوزه‌هایی چون انرژی‌های نو و حمل و نقل برقی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدل‌سازی ترانسفورماتور حالت جامد به طور یک پارچه با قابلیت بررسی رفتار حالت دائمی و گذرا در مقاله‌ای ارائه نگردیده است. مدل‌سازی مبدل‌های توان در حالت‌های پایه و بدون بررسی قابلیت اتصال مدل‌های مختلف به یکدیگر در [۱۵] ارائه شده است. همچنین [۱۶] به مدل‌سازی استاتیکی ماژول‌های مبدل‌های الکترونیک قدرت به صورت مجزا پرداخته و راه حلی برای مدل‌سازی استاتیکی و برهم‌کنش بین ماژول‌ها پیشنهاد داده است. در [۱۷] مدل‌سازی مبدل‌های توان با دیدگاهی جدید و در [۱۸] با نگاه بهینه‌سازی قابلیت‌های کنترلی مبدل‌ها ارائه شده است. مراجع ذکرشده اخیر بر مدل‌های استاتیکی متمرکز شده‌اند؛ حال آن که مدل متوسط‌گیری شده مقاله حاضر، مدل‌های استاتیکی و دینامیکی را به طور توأم فراهم می‌نماید.

علاوه بر دیدگاه متوسط‌گیری برای مبدل‌های الکترونیک قدرت، مدل‌سازی هابیرید برای این مبدل‌ها پیشنهاد شده و بر مبنای آنها کنترل حلقه بسته پیشنهاد شده است [۱۹] و [۲۰]. به دلیل تعداد بالای طبقات ترانس حالت جامد، این روش‌های مدل‌سازی قدرتمند قابل استفاده نیستند

1. Power Quality Improvement and Active Damping
2. Silicon-Carbide

پراکنده و شبکه‌های هوشمند [۸]، [۳۳] و [۳۶] تا [۳۹].

## ۲-۲ آرایش مورد بررسی

ساختار در نظر گرفته شده در این مقاله برای ترانسفورماتور حالت جامد مشابه شکل ۴ می‌باشد. این ساختار که دارای دو لینک DC است، به دلیل قابلیت انعطاف و عملکرد کنترلی بالا، امکان کنترل مستقل توان راکتیو و رفع مشکل افت ولتاژ ورودی، از برتری ویژه‌ای نسبت به سایر ساختارها برخوردار است. این ساختار همچنین برای کنترل بهتر ولتاژ و جریان در هر دو سمت اولیه و ثانویه مناسب است [۳۱].

مبدل پل H در این مقاله به عنوان طبقه یکسوساز در نظر گرفته شده است. روش مدولاسیون PWM با جابه‌جایی فاز (PS-PWM) برای این طبقه به کار رفته است.

طبقه میانی ترانسفورماتور حالت جامد، طبق آنچه در شکل ۴ آمده است، یک مبدل DC به DC است. این طبقه می‌تواند به ۳ قسمت تقسیم شود: یک مبدل DC به AC در ورودی، یک ترانسفورماتور فرکانس بالا (HF) در قسمت میانی و یک مبدل AC به DC در خروجی. آرایش مبدل پل فعال دوگانه تک‌فاز (DAB) برای این طبقه به کار رفته است. طبقه DAB تک‌فاز راندمان بالایی دارد، در حالی که تعداد عناصر پسیو کمی نیز دارد و بنابراین می‌تواند به عنوان مبدل DC-DC ترانسفورماتور حالت جامد قرار گیرد [۶] و [۲۳]. روش مدولاسیون جابه‌جایی فاز برای این طبقه در نظر گرفته شده است. مدولاسیون جابه‌جایی فاز به سادگی قابل پیاده‌سازی است و به دلیل جریان مؤثر پایین آن، به تجهیزات با توان نامی پایین‌تر منجر می‌شود. با وجود بالابودن تلفات خاموش شدن، مزایای مذکور، انگیزه کافی برای استفاده از این روش مدولاسیون را فراهم کرده است [۸] و [۲۳].

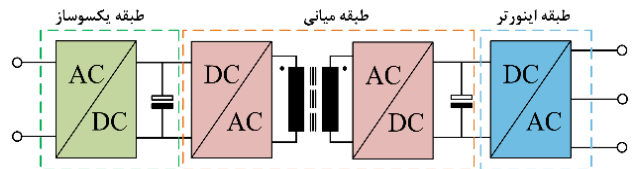
طبقه اینورتر SST از مبدل منبع ولتاژ دوسطحی (VSC-2L) استفاده می‌نماید. دلایل این مسئله، قیمت پایین‌تر، مدار ساده‌تر و استفاده از فناوری پذیرفته‌شده‌تر است. برای ساختار این طبقه، مبدل سه‌فاز چهارساق (3P4L) و روش مدولاسیون پهنای پالس پیوسته (CPWM) مورد استفاده قرار گرفته است [۸].

## ۳- مدل‌سازی پایه

استفاده از مدل متوسط‌گیری شده برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و کنترل مبدل‌های چندسطحی که مشابه مبدل‌های مورد بررسی در این تحقیق می‌باشند، امری متداول است [۲۳] و [۲۴]. تابع متوسط‌گیری با تعریف ریاضی (۱) در ادامه مورد استفاده قرار گرفته است

$$\langle x(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} x(t) dt \quad (1)$$

که در این رابطه  $T_s$  دوره تناوب سیگنال  $x(t)$  می‌باشد. با در نظر گرفتن عملگر متوسط‌گیری  $\langle \cdot \rangle_{T_s}$ ، امکان تبدیل معادلات حالت سوئیچ‌شونده به معادلات حالت معمولی (غیر سوئیچ‌شونده) در مبدل‌های الکترونیک قدرت فراهم می‌شود. در ادامه متن مقاله همه جا از متغیرهای متوسط‌گیری شده



شکل ۳: ساختار کلی ترانسفورماتور حالت جامد مورد بررسی.

در بخش دوم این مقاله، مفاهیم اساسی ترانسفورماتور حالت جامد، مقایسه آن با ترانسفورماتور سنتی و کاربردهای آن ارائه گردیده است. همچنین در این بخش، آرایش مورد استفاده جهت مدل‌سازی ارائه شده است. در بخش سوم به مدل‌سازی پایه برای سه طبقه یکسوساز، میانی و اینورتر در ترانسفورماتور حالت جامد پرداخته شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌های مربوط و در بخش پنجم، نتیجه‌گیری بیان گردیده است.

## ۲- مفاهیم اساسی در ترانسفورماتور حالت جامد

مرجع‌های [۲۳]، [۳۱] و [۳۲] ساختارهای گوناگونی را برای SST معرفی نموده‌اند. از میان این ساختارها، ساختار معرفی شده در شکل ۳ به دلیل برخورداری از ویژگی‌های بیشتر نسبت به ساختارهای دیگر مناسب‌تر به نظر می‌رسد [۲۳] و [۲۴]. این ساختار دارای یک مبدل AC-DC در طبقه یکسوساز، یک مبدل DC-DC همراه با یک ترانسفورماتور فرکانس بالا برای ایزولاسیون و کاهش سطح ولتاژ در طبقه میانی و یک مبدل DC-AC در طبقه اینورتر است.

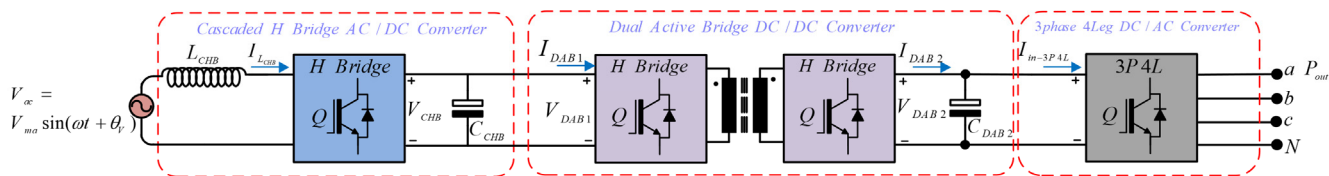
از طرفی وجود باس DC و خازن‌های ذخیره‌ساز انرژی در این تجهیز، سبب می‌شود که خروجی آن تا حد زیادی از افت ولتاژ و اضافه ولتاژها تأثیر نپذیرد و امکان اتصال منابع تولید پراکنده به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم توزیع فراهم شود [۲۴] و [۳۳].

## ۲-۱ مقایسه با ترانسفورماتور سنتی و کاربردها

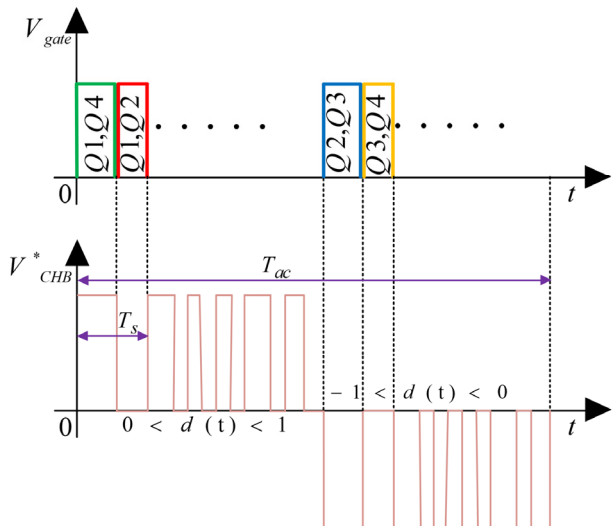
ترانسفورماتور فرکانس پایین به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی همچون قابلیت اطمینان بالا و هزینه پایین به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. نکته حائز اهمیت این است که ترانسفورماتور حالت جامد دقیقاً جایگزین ترانسفورماتور فرکانس پایین نیست، بلکه یک تجهیز چندکاره است که تنها یکی از قابلیت‌های آن تبدیل یک سطح ولتاژ AC به سطح ولتاژی دیگر است. سایر کارکردها و مزایای SST عبارت هستند از: کنترل پذیری بالا با توجه به استفاده از ادوات الکترونیک قدرت و حجم و وزن کمتر به دلیل استفاده از ترانسفورماتور فرکانس بالا [۲] و [۳۳] تا [۳۵]. تلفات SST حدود ۳ برابر ترانسفورماتور معمولی است. این محاسبه بدون در نظر گرفتن کاهش تلفات شبکه ناشی از عملکرد SST در حذف هارمونیک‌ها و عدم تعادل محاسبه شده است. به این ترتیب در یک دید کلی و با در نظر گرفتن تلفات کل شبکه، ممکن است وجود SST به کاهش تلفات منجر شود. از طرف دیگر، حجم یک SST نسبت به ترانسفورماتور معمولی مشابه، حدود ۲۰٪ کمتر است؛ اما از لحاظ وزن، هر دو تجهیز تقریباً یکسان می‌باشند [۴].

کاربرد SST در برخی زمینه‌ها بسیار جذاب‌تر از ترانسفورماتور سنتی است. برخی از مهم‌ترین کاربردهای ترانسفورماتور حالت جامد در صنعت و شبکه قدرت عبارت هستند از: استفاده در سیستم‌های کششی، کاربرد در سیستم‌های تولید انرژی در دریا، اتصال SST بین منبع و بار یا شبکه توزیع، اتصال بین دو شبکه توزیع، اتصال بین شبکه‌های فشارمتوسط و فشارضعیف، اتصال بین شبکه فشارمتوسط و بارها و اتصال بین تولید

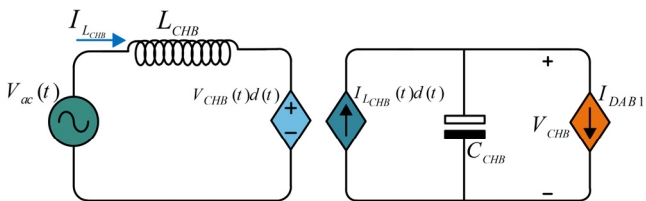
1. Phase Shift PWM
2. High Frequency
3. Dual Active Bridge
4. 2-Level Voltage Source Inverter
5. 3-Phase 4-Leg
6. Continuous PWM



شکل ۴: ترانسفورماتور حالت جامد به ازای یک مبدل در هر طبقه و نام گذاری متغیرهای ورودی و خروجی.



شکل ۶: تغییرات خروجی پل ترانزیستوری فاقد خازن به ازای تغییرات  $d(t)$  در یک دوره تناوب ولتاژ ورودی.



شکل ۷: مدل متوسط ارائه شده برای طبقه ورودی.

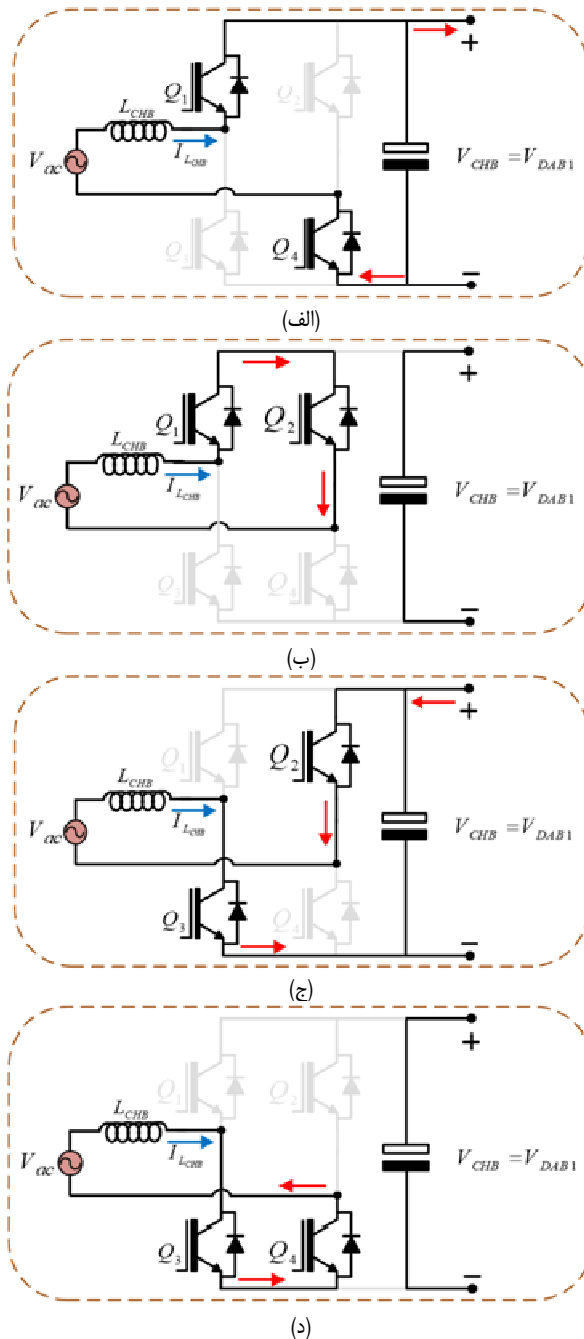
- ادوات الکترونیک قدرت بدون تلفات می باشند.
- روشن و خاموش شدن سوئیچ ها، لحظه ای انجام می شود.
- ادوات پسیو در ناحیه خطی خود عمل می کنند و از پدیده اشباع صرف نظر می شود.

لازم به ذکر است که فرض های ساده سازی در نظر گرفته شده در مدل سازی روی دقت پاسخ تأثیر دارند ولی صحت آنها را از بین نمی برند.

### ۳-۱ طبقه یکسوساز

تصویری از طبقه ورودی همراه با نام گذاری متغیرها و حالات مدار در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۶ تغییرات خروجی پل ترانزیستوری فاقد خازن را به ازای تغییرات  $d(t)$  (دوره کاری) در یک دوره تناوب ولتاژ ورودی نشان می دهد. در این شکل  $d(t)$  مثبت و منفی متناظر با مثبت و منفی شدن ولتاژ تعریف شده است.  $V_{CHB}^*$  نیز مشخص کننده ولتاژ خروجی پل H قبل از اعمال به خازن می باشد. با توجه به چهار حالت کاری مدار و متوسط گیری روابط، معادلات دیفرانسیل این طبقه در فرم فضای حالت به صورت (۲) و (۳) به دست می آید. سلف و بار، هر یک با یک منبع جریان مدل سازی شده اند. مدار معادل این طبقه به صورت شکل ۷ به دست می آید

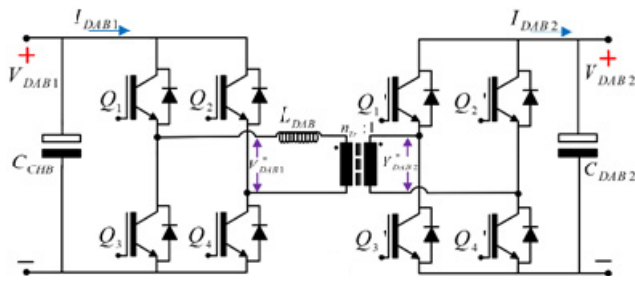
$$L_{CHB} \frac{di_{L_{CHB}}}{dt} = v_{ac}(t) - v_{CHB}(t)d(t) \quad (2)$$



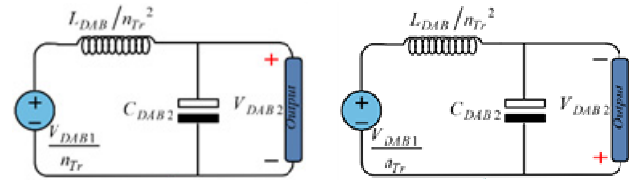
شکل ۵: طبقه یکسوساز ورودی و چهار حالت کاری مختلف مدار.

استفاده گردیده و به جهت اختصار، نماد عملگر متوسط گیری نوشته نشده است.

در این بخش مدل سازی مبدل بر مبنای مدل متوسط گیری صورت گرفته است. ترانسفورماتور حالت جامد دارای ۳ طبقه ورودی، میانی و خروجی می باشد. متغیرهای معرفی شده در این شکل در ادامه جهت مدل سازی مورد استفاده قرار می گیرند. فرضیات زیر جهت مدل سازی در نظر گرفته شده است:



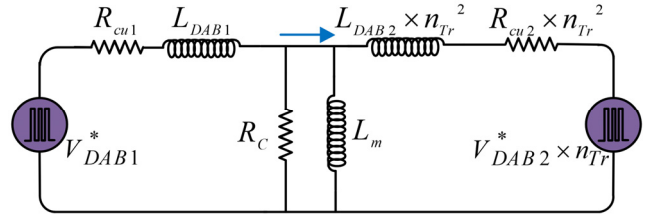
(الف)



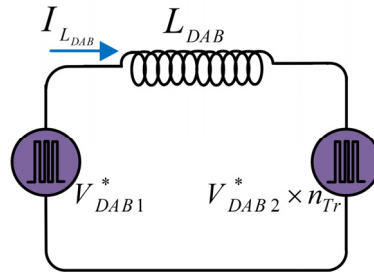
(ب)

(ج)

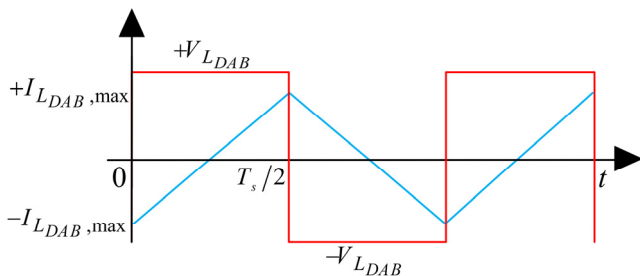
شکل ۸: مدل دقیق طبقه میانی، (ب) مدل طبقه میانی در سمت ثانویه ترانسفورماتور در بازه زمانی  $[0, (T_s/2)d]$  و (ج) مدل طبقه میانی در بازه زمانی  $[(T_s/2)d, T_s/2]$ .



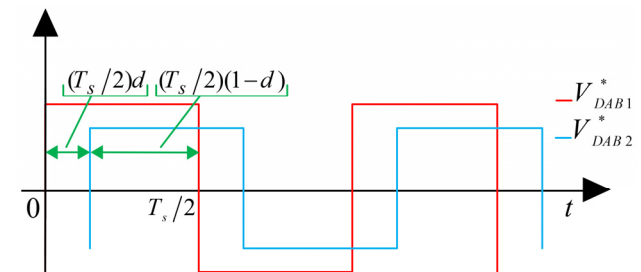
شکل ۸: مدل دقیق طبقه میانی [۶].



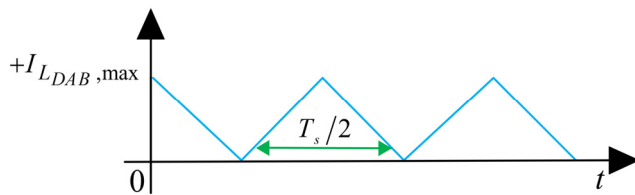
شکل ۹: مدل ساده‌شده طبقه میانی [۶].



شکل ۱۰: ولتاژ ورودی و خروجی ترانسفورماتور و سلف DAB.



شکل ۱۱: تغییرات ولتاژ و جریان سلف در سمت ثانویه ترانسفورماتور.



شکل ۱۲: تغییرات ولتاژ و جریان سلف در سمت ثانویه ترانسفورماتور.

بنابراین با استفاده از (۵) و (۶) داریم

$$\frac{V_{DAB\gamma}}{n_{Tr}} + V_{DAB\gamma}(\gamma d - 1) = \frac{\gamma L_{DAB}}{n_{Tr}^2 T_s} I_{L,max} \quad (7)$$

جریان سلف بعد از عبور از پل H سمت ثانویه ترانسفورماتور به صورت شکل ۱۳ است. مقدار متوسط جریان سلف در نیم‌سیکل کلیدزنی برابر  $0.5 I_{L,max}$  خواهد بود. پس با توجه به مطالب گفته‌شده، جریان بعد از عبور از پل H سمت ثانویه ترانسفورماتور از (۸) به دست می‌آید

$$I_{DAB\gamma} = \frac{1}{2} \frac{\frac{V_{DAB\gamma} + V_{DAB\gamma}(\gamma d - 1)}{\frac{\gamma L_{DAB}}{n_{Tr}^2 T_s}}}{\quad} \quad (8)$$

مقدار متوسط جریان ورودی پل DAB با توجه به مقدار متوسط جریان  $I_{DAB\gamma}$  مطابق (۹) قابل محاسبه است

$$I_{DAB\gamma} = \frac{I_{DAB\gamma}}{n_{Tr}} = \frac{V_{DAB\gamma} + V_{DAB\gamma}(\gamma d - 1)}{\frac{\gamma L_{DAB}}{n_{Tr}^2 T_s}} \quad (9)$$

$$C_{CHB} \frac{dv_{CHB}}{dt} = i_{L_{CHB}}(t)d(t) - I_{DAB\gamma} \quad (3)$$

### ۳-۲ طبقه میانی

مدل دقیق طبقه میانی و ساده‌شده آن مطابق [۳۱]، در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است و ولتاژ ورودی و خروجی ترانسفورماتور به صورت شکل ۱۰ می‌باشد. در رسم این شکل، زمان روشن‌بودن کلید نیمه‌هادی، طبقه میانی که در شکل ۱۱-الف آمده است، بر این اساس و با توجه به مدار  $[0, (T_s/2)d]$  در بازه زمانی  $[(T_s/2)d, T_s/2]$  به صورت شکل ۱۱-ب و در بازه زمانی  $[(T_s/2)d, T_s/2]$  مطابق شکل ۱۱-ج است. با محاسبه مقدار متوسط ولتاژ سلف در نیم‌سیکل اول داریم

$$\frac{L_{DAB}}{n_{Tr}^2} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{DAB\gamma}}{n_{Tr}} d + \frac{V_{DAB\gamma}}{n_{Tr}} (1-d) + V_{DAB\gamma} d - V_{DAB\gamma} (1-d) \quad (4)$$

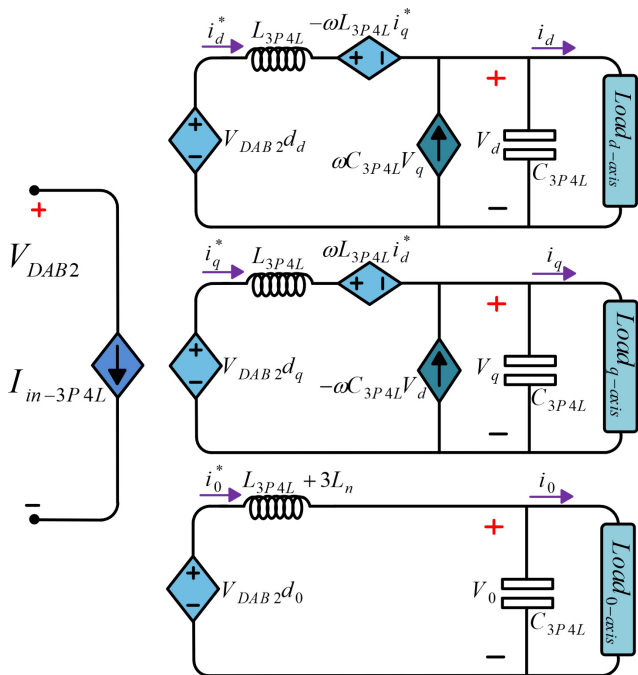
که با ساده‌سازی رابطه زیر حاصل می‌شود

$$\frac{L_{DAB}}{n_{Tr}^2} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{DAB\gamma}}{n_{Tr}} + V_{DAB\gamma}(\gamma d - 1) \quad (5)$$

شکل موج ولتاژ  $L_{DAB}$  منتقل‌شده به سمت ثانویه ترانسفورماتور، همانند شکل ۱۲ است. با توجه به این شکل، مقدار متوسط  $V_L$  در نیم‌سیکل مثبت برابر است با

$$V_L = \frac{L_{DAB}}{n_{Tr}^2} \frac{di_L}{dt} \cong \frac{L_{DAB}}{n_{Tr}^2} \frac{\gamma I_{L,max}}{T_s} = \frac{\gamma L_{DAB}}{n_{Tr}^2 T_s} I_{L,max} \quad (6)$$





شکل ۱۵: مدل متوسط طبقه اینورتر خروجی.

$$x = [i_{L_{CHB}} \ v_{CHB} \ V_{DAB\gamma} \ V_d \ V_q \ V_0 \ i_d^* \ i_q^* \ i_0^*]^T \quad (15)$$

ورودی های کنترل شونده و کنترل نشونده (اغتشاش) به ترتیب برابرند با

$$u_c = [d_{CHB} \ d_{DAB} \ d_d \ d_q \ d_0]^T \quad (16)$$

$$u_{uc} = [v_{ac} \ i_d \ i_q \ i_0]^T$$

نهایتاً توصیف معادلات حالت غیر خطی ترانس به فرم یک پارچه به صورت زیر قابل نمایش است

$$L_{CHB} \frac{di_{L_{CHB}}}{dt} = v_{ac}(t) - v_{CHB}(t) d_{CHB}(t)$$

$$C_{CHB} \frac{dv_{CHB}}{dt} = i_{L_{CHB}}(t) d_{CHB}(t) - \frac{T_S V_{CHB}}{\lambda L_{DAB}} - \frac{V_{DAB\gamma} n_{Tr} T_S (\gamma d_{CHB} - \nu)}{\lambda L_{DAB}}$$

$$C_{DAB\gamma} \frac{d}{dt} V_{DAB\gamma} = \frac{T_S V_{CHB}}{\lambda L_{DAB} n_{Tr}} + \frac{n_{Tr}^2 T_S V_{DAB\gamma} (\gamma d - \nu)}{\lambda L_{DAB}} - \frac{\gamma V_d i_d + \gamma V_q i_q + \epsilon V_0 i_0}{\gamma V_{DAB\gamma}}$$

$$C_{\gamma P\gamma L} \frac{d}{dt} V_d = i_d^* - i_d + \omega C_{\gamma P\gamma L} V_q$$

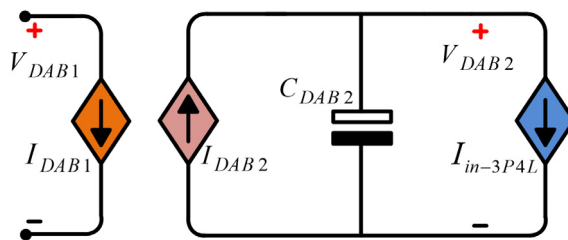
$$C_{\gamma P\gamma L} \frac{d}{dt} V_q = i_q^* - i_q - \omega C_{\gamma P\gamma L} V_d$$

$$C_{\gamma P\gamma L} \frac{d}{dt} V_0 = i_0^* - i_0$$

$$L_{\gamma P\gamma L} \frac{d}{dt} i_d^* = V_{DAB\gamma} d_d - V_d + \omega L_{\gamma P\gamma L} i_q^*$$

$$L_{\gamma P\gamma L} \frac{d}{dt} i_q^* = V_{DAB\gamma} d_q - V_q - \omega L_{\gamma P\gamma L} i_d^*$$

$$(L_{\gamma P\gamma L} + \gamma L_n) \frac{d}{dt} i_0^* = V_{DAB\gamma} d_0 - V_0 \quad (17)$$



شکل ۱۴: مدل متوسط طبقه میانی.

مقدار متوسط جریان خازن در نیم سیکل اول به طور مشابه به دست می آید

$$C_{DAB\gamma} \frac{dV_{DAB\gamma}}{dt} = (-I_{L_{DAB}} - \frac{V_{DAB\gamma}}{R}) d + (I_{L_{DAB}} - \frac{V_{DAB\gamma}}{R})(1-d) \quad (10)$$

$$C_{DAB\gamma} \frac{dV_{DAB\gamma}}{dt} = I_{L_{DAB}} (\gamma d - \nu) - \frac{V_{DAB\gamma}}{R} \quad (11)$$

با توجه به (۱۱) و مدل متوسط ارائه شده، شکل ۱۴ برای مدل متوسط پیشنهاد می گردد. بر این اساس، جریان خازن مطابق (۱۲) محاسبه می شود

$$C_{DAB\gamma} \frac{d}{dt} V_{DAB\gamma} = \frac{\frac{V_{DAB\gamma}}{R} + V_{DAB\gamma} (\gamma d - \nu)}{n_{Tr}^2 T_S} - I_{in-\gamma P\gamma L} \quad (12)$$

### ۳-۳ طبقه اینورتر

ولتاژ خروجی این طبقه، سینوسی و متغیر با زمان می باشد. طراحی سیستم کنترلی برای چنین سیستم هایی که مقدار مرجع متغیر با زمان دارند، مشکل است؛ لذا مدل این طبقه در فضای  $dq_0$  بیان می شود تا مقدار مرجع سیستم به مقادیر نامتغیر با زمان تبدیل شود. توضیحات و جزئیات مربوط به استخراج مدل در [۶] آمده و در این بخش، تنها نتایج ارائه می گردند. در شکل ۱۵ مدل متوسط اینورتر خروجی بر اساس روابط بیان شده در [۶] رسم گردیده و نام گذاری متغیرهای مدار نشان داده شده است. در این شکل، پارامترهای دارای "\*"، مربوط به فیلتر خروجی می باشند و پارامترهایی که "\*" را ندارند، مربوط به بار هستند. همچنین بنا بر بدون تلفات بودن مدل، جریان ورودی به این طبقه برابر است با

$$I_{in-\gamma P\gamma L} = \frac{\frac{\gamma}{2} V_d i_d + \frac{\gamma}{2} V_q i_q + \gamma V_0 i_0}{V_{DAB\gamma}} \quad (13)$$

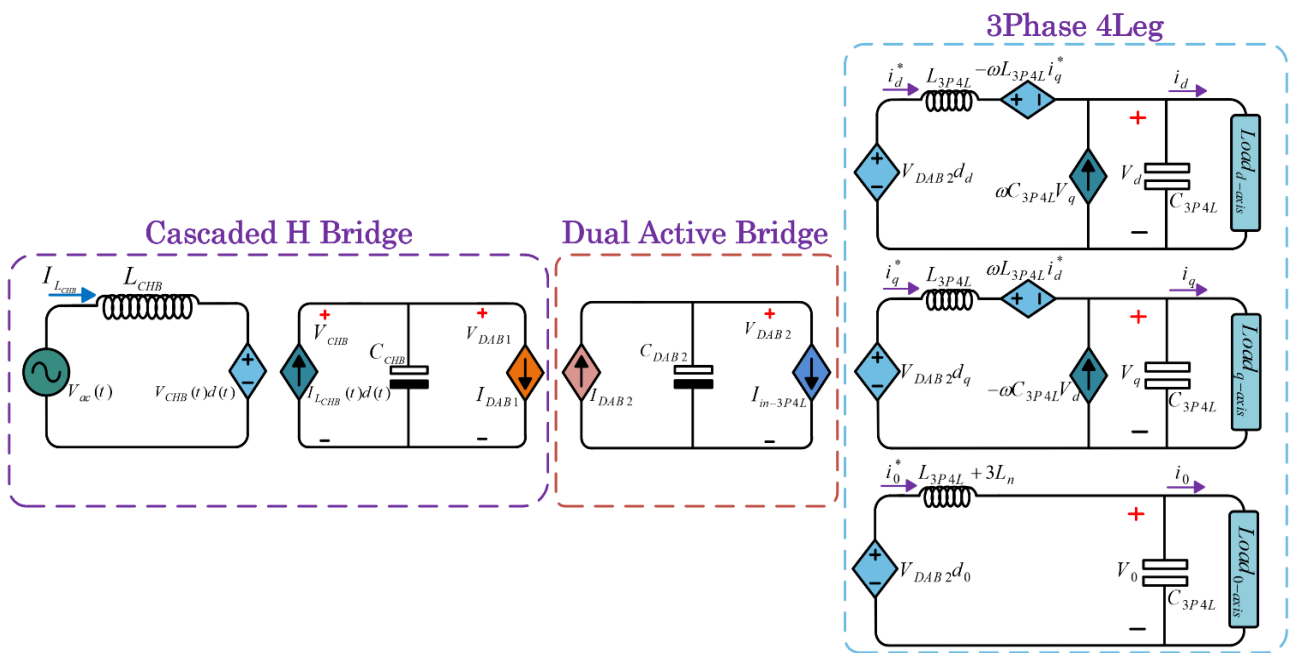
یک مسأله مهم در این طبقه، محاسبه فرکانس سنکرون برای محاسبه متغیرها در فضای  $qd_0$  می باشد. در این مدل سازی، فرض شده که مقدار دقیق فرکانس شبکه در اختیار است، اما در حالت کلی با استفاده از PLL می توان مقدار دقیق این فرکانس را جهت مدل سازی به دست آورد.

### ۳-۴ یک پارچه سازی طبقه ها و کنترل حلقه بسته آنها

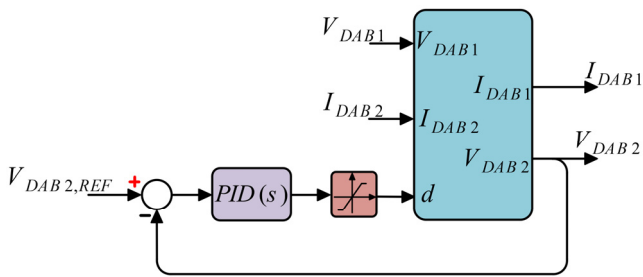
توصیف کلی روابط مبدل به صورت یک پارچه در قالب معادلات دیفرانسیل غیر خطی به فرم

$$\dot{x} = f(x, u_c, u_{uc}) \quad (14)$$

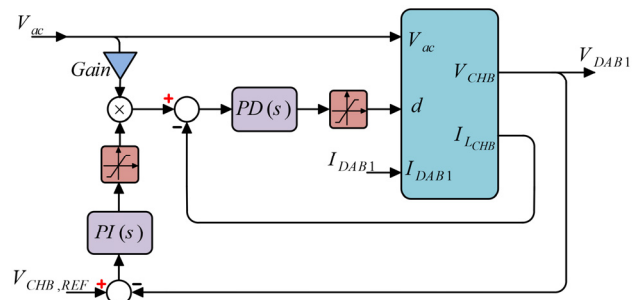
قابل بیان است. این معادلات شامل ۹ متغیر و معادله حالت هستند و برای استخراج آنها روابط ارائه شده برای هر طبقه با هم ترکیب شده اند. در (۱۴) متغیر حالت برابر است با



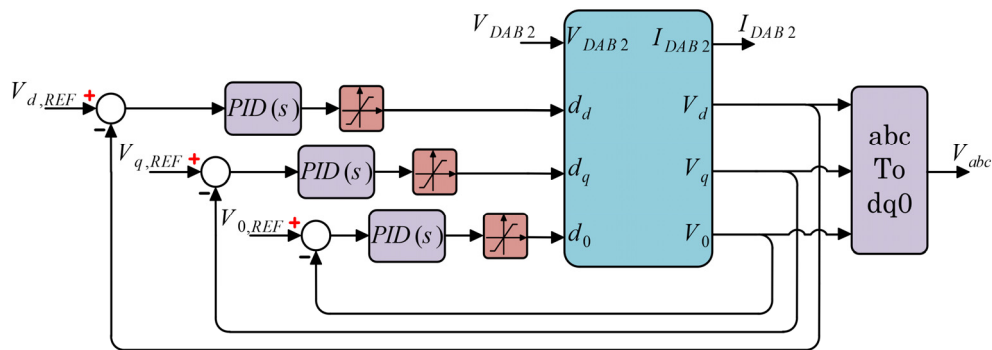
شکل ۱۶: مدل مداری یک پارچه ترانس.



شکل ۱۸: پیاده‌سازی کنترل کننده طبقه میانی.



شکل ۱۷: پیاده‌سازی کنترل کننده طبقه یکسوساز ورودی.



شکل ۱۹: کنترل کننده طبقه اینورتر خروجی.

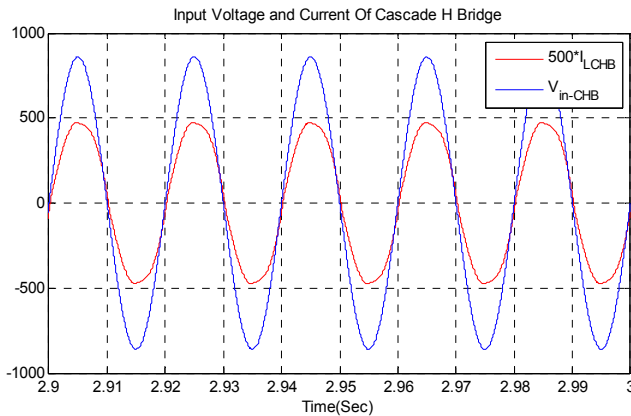
PD، دوره کاری عملکرد پل ترانزیستوری را کنترل می‌کند تا ولتاژ لینک DC در مقدار مورد نظر ثابت بماند.

چنان که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، کنترل کننده طبقه میانی، سیگنال خطای حاصل از مقایسه مقدار واقعی ولتاژ خروجی با مقدار مرجع را با اعمال به کنترل کننده PI اصلاح و به عنوان سیگنال کنترلی وارد مدل می‌نماید. در شکل ۱۹ کنترل کننده طبقه اینورتر خروجی قابل مشاهده است. از آنجایی که مقدار مرجع ولتاژ خروجی، سینوسی و متغیر با زمان است و پیاده‌سازی سیستم کنترلی با مقدار مرجعی متغیر با زمان بسیار مشکل می‌باشد؛ با تغییر مینا از فضای  $abc$  به فضای  $dq_0$ ، مقدار مرجع متغیر با زمان به یک مقدار ثابت تبدیل و پیاده‌سازی سیستم کنترلی در فضای  $dq_0$  بسیار ساده می‌شود.

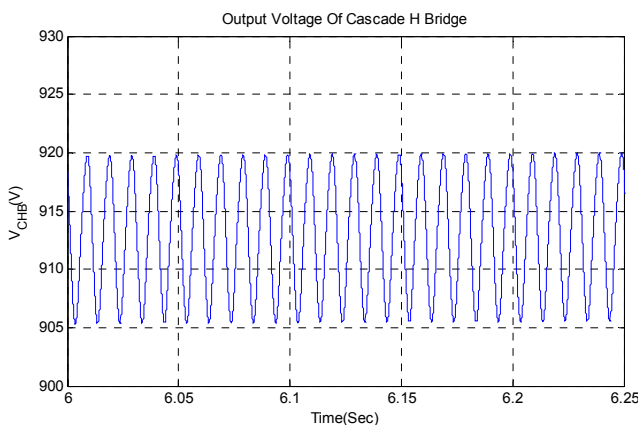
جهت وضوح بیشتر، مدل مداری یک پارچه ترانس در شکل ۱۶ ارائه شده است.

در کنار مدل‌سازی ارائه شده، ساختار کنترل حلقه بسته برای هر سه طبقه، پیاده‌سازی گردیده است. مقدار تقریبی اولیه ضرایب کنترل کننده‌ها به روش زیگلر نیکولز حوزه زمان محاسبه شده و تنظیم دقیق تر با سعی و خطا و بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی صورت گرفته است.

سیستم کنترلی طبقه یکسوساز ورودی مطابق شکل ۱۷ در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK پیاده‌سازی گردیده است. در این ساختار، ولتاژ خروجی با مقدار مرجع مقایسه و سیگنال خطا ایجاد می‌شود. این سیگنال با اعمال به کنترل کننده PI، دامنه مطلوب سیگنال سینوسی جریان ورودی را تولید می‌کند. این سیگنال خطا با اعمال به کنترل کننده



شکل ۲۰: شکل موج ولتاژ و جریان ورودی طبقه یکسوساز در حالت دائمی.



شکل ۲۱: شکل موج ولتاژ خروجی طبقه یکسوساز.

استفاده از ۲۰۰ نقطه در یک دوره تناوب ولتاژ ورودی برای بررسی رفتار حالت گذرا و دائمی کافی است. این نتایج نشان دهنده قابلیت کاربرد مدل حاصل در شبیه سازی های زمان واقعی هستند. ذکر این نکته نیز ضروری به نظر می رسد که رایانه مورد استفاده، یک رایانه همراه شخصی است و قطعاً در صورت استفاده از رایانه های صنعتی و پردازش های موازی، می توان زمان شبیه سازی را به میزان بسیار قابل توجهی کاهش داد.

### ۳-۴ رفتار حالت گذرا و حالت دائمی

در شبیه سازی های این بخش، گام شبیه سازی برابر با  $10^{-6}$  ثانیه و حل کننده<sup>۱</sup> مورد استفاده ode۲۳tb بوده است. همه معادلات دیفرانسیل نیز در فرم فضای حالت و به کمک بلوک های انتگرال گیر و fcn پیاده سازی شده اند.

مطابق شکل ۲۰، ولتاژ و جریان ورودی طبقه AC-DC هم فاز هستند ( $\cos \phi = 1$ ) و توان راکتیو از شبکه ولتاژ متوسط گرفته نمی شود. توضیح این است که در این شکل (جهت سهولت مقایسه)، جریان ورودی ۵۰۰ برابر بزرگ تر نشان داده شده است.

شکل ۲۱ حالت دائمی ولتاژ خروجی طبقه AC-DC را نمایش می دهد که مقدار دائمی آن به مقدار محاسبه شده برای ولتاژ ورودی طبقه میانی (یعنی ۹۱۴ V) بسیار نزدیک است. شکل ۲۲، ولتاژ خروجی طبقه DC-DC را نمایش می دهد که مقدار دائمی آن در حدود ۴۰۴ V است. شکل ۲۳ ولتاژ سه فاز خروجی ترانسفورماتور حالت جامد را نشان می دهد که مشخصات آن مشابه برق شهر می باشد. با توجه به اصلاح ضریب توان صورت گرفته در طبقه ورودی، توان راکتیو در ورودی صفر می باشد ولی در

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی.

پارامتر	مقدار	یکا
$V_{ac}(t)$	ورودی سینوسی تک فاز با مقدار مؤثر ۶۰۵ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز	-
$V_{DABr}(t)$	۴۰۴	V
$L_{CHB}$	۴۴	mH
$C_{CHB}$	۱۱۸	$\mu F$
$n_{Tr}$	۲,۲۴	-
$L_{DAB}$	۸,۲۶	mH
$C_{DABr}$	۶,۷۲	$\mu F$
$L_{rP+L}$	۱	mH
$L_n$	۰,۱	mH
$C_{rP+L}$	۱,۸	$\mu F$

جدول ۲: مشخصات شبیه سازی مدل متوسط گیری شده جهت مقایسه زمان شبیه سازی.

مشخصات سیستم کامپیوتری	مشخصات سیستم
Intel(R) Core (TM) i۷ - ۶۷۰۰ HQ	
CPU @ ۲,۶۰ GHz ۲,۵۹ GHz	
Installed RAM ۸,۰۰ GB	
Ode۲۳tb	نوع حل کننده عددی
۸۳,۲۴۵ ثانیه	زمان اجرا با گام زمانی حداکثر ۱ میکروثانیه
۲۷,۲۲۴ ثانیه	زمان اجرا با گام زمانی حداکثر ۱۰ میکروثانیه
۴,۶۴۲ ثانیه	زمان اجرا با گام زمانی حداکثر ۱۰۰ میکروثانیه
۲,۲۲۵ ثانیه	زمان اجرا با گام زمانی حداکثر ۱۰۰۰ میکروثانیه

## ۴- شبیه سازی یک پارچه طبقات و تحلیل نتایج

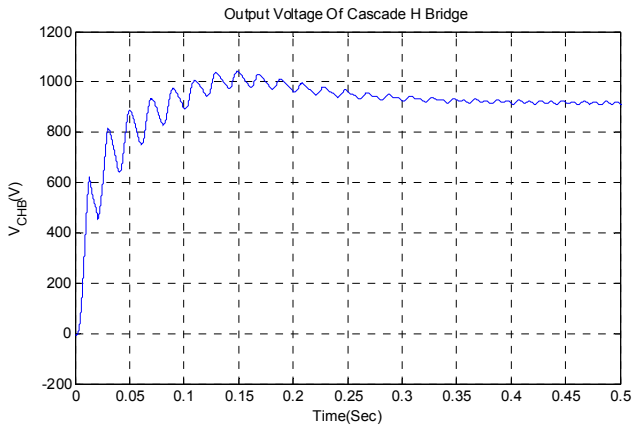
### ۱-۴ فرضیات شبیه سازی

همه شبیه سازی ها در محیط نرم افزار MATLAB/SIMULINK صورت گرفته است. در سیستم مورد بررسی، ولتاژ ورودی از نوع تک فاز ۶۰۵ ولت و ۵۰ هرتز و خروجی مطلوب، ۳۸۰ ولت و ۵۰ هرتز و از نوع سه فاز است. همچنین توان آن ۳۹۰ وات می باشد. در جدول ۱ مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای مختلف قابل مشاهده هستند. این مقادیر بر مبنای محاسبات انجام شده در طرح پژوهشی [۳۳] ارائه شده اند.

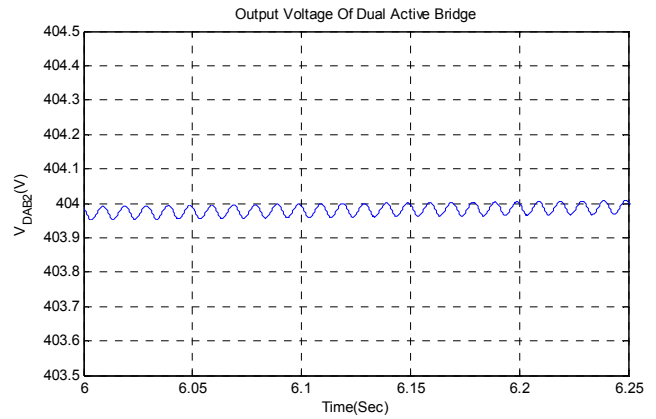
### ۲-۴ شبیه سازی زمان واقعی

استفاده از مدل های ریاضی در شبیه سازی زمان واقعی، میثی مفصل بوده و در این بخش مختصراً این مهم بررسی شده است. برای بررسی امکان به کارگیری مدل حاصل در شبیه سازی زمان واقعی ترانس حالت جامد، شبیه سازی این مدل در بازه زمانی ۵ ثانیه، با چند گام مختلف اجرا و نتایج جدول ۲ حاصل شده است. در این جدول، مشخصات رایانه مورد استفاده، مدت زمان اجرای شبیه سازی برای گام های زمانی مختلف و نوع حل کننده عددی مورد استفاده بیان شده است. به ازای گام شبیه سازی حداکثر ۱۰۰ میکروثانیه، زمان اجرا کمتر از زمان واقعی ۵ ثانیه شده و در این شرایط، مدل متوسط گیری شده برای شبیه سازی زمان واقعی قابل بهره برداری خواهد بود. از طرف دیگر این زمان به اندازه کافی کوچک است که جواب های مدل برای حالت های گذرا نیز قابل استفاده باشد.

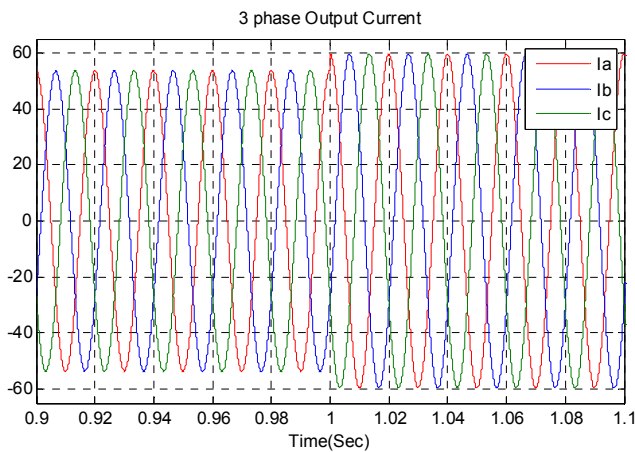




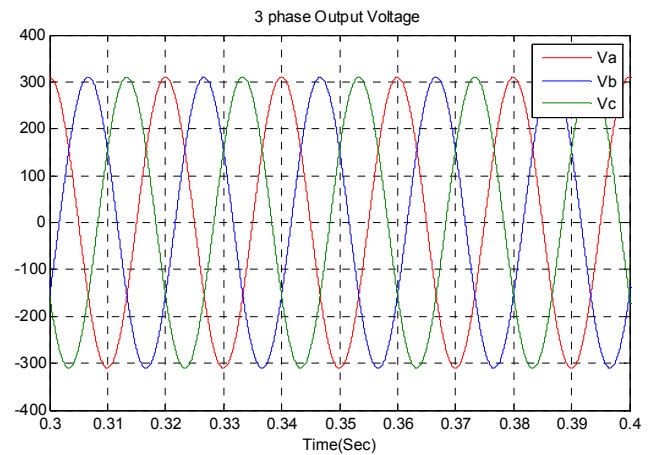
شکل ۲۵: شکل موج ولتاژ خروجی طبقه ورودی در حالت راهاندازی.



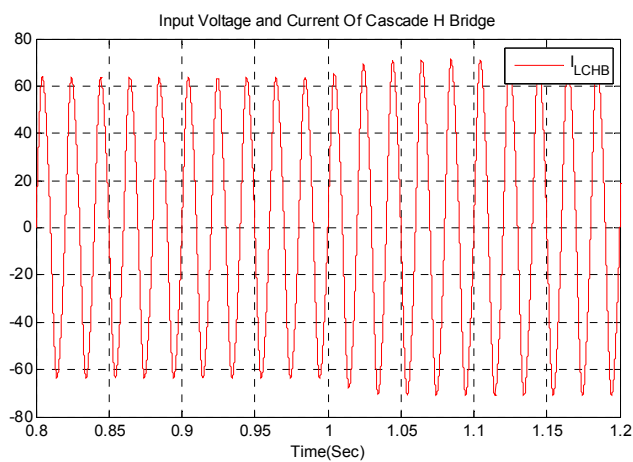
شکل ۲۶: ولتاژ خروجی طبقه میانی.



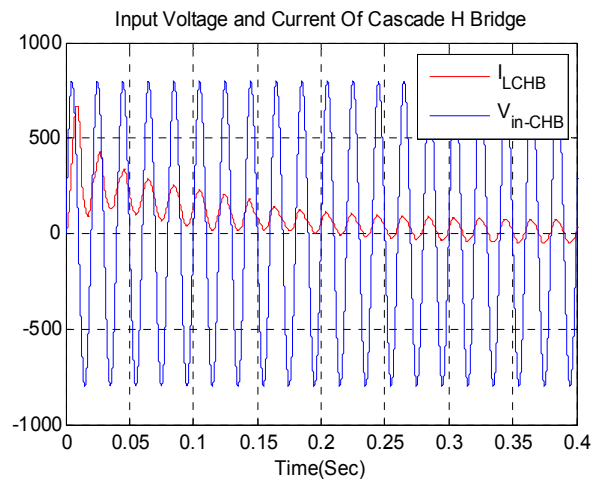
شکل ۲۷: شکل موج ولتاژ و جریان طبقه خروجی در حالت کاهش مقاومت بار این طبقه به میزان ۱۰ درصد (تغییر در ثانیه ۱ به صورت آبی رخ داده است).



شکل ۲۸: ولتاژ سه فاز خروجی ترانسفورماتور حالت جامد.



شکل ۲۹: شکل موج جریان طبقه ورودی در حالت کاهش مقاومت بار طبقه خروجی به میزان ۱۰ درصد (تغییر در ثانیه ۱ به صورت آبی رخ داده است).



شکل ۳۰: شکل موج ولتاژ و جریان طبقه ورودی در حالت راهاندازی.

### ۵- نتیجه گیری

مدل سازی یک پارچه ترانسفورماتور حالت جامد دوطرفه با استفاده از تئوری متوسط گیری برای ۳ طبقه یکسوساز، مدل dc/dc میانی و اینورتر خروجی در این مقاله ارائه شد. این مدل سازی در قالب معادلات ریاضی و مدار معادل ارائه گردیده است. مدل های به دست آمده در ۳ طبقه با هم برهم کنش داشته و مدل دینامیکی کاملی برای توصیف رفتار ترانس فراهم می سازند. با توجه به دقت بالا و سادگی مدل های استخراج شده، می توان از آنها در شبیه سازی های سیستم قدرت و شبکه های توزیع

خروجی این مسأله وابسته به بار است. در مورد توان اکتیو نیز با توجه به بدون تلفات بودن مدل ها، توان های اکتیو در دو طرف مساوی هستند. شبیه سازی های بررسی رفتار دینامیکی، شامل تغییر راه اندازی و تغییر بار در شکل های ۲۴ تا ۲۷ ارائه شده اند. بر اساس شکل های ۲۴ و ۲۵ مشخص می گردد که ترانس در زمان کمتر از ۰/۴ ثانیه راه اندازی گردیده و ضریب توان ورودی و باس DC طبقه اول پایدار شده است. در شرایط تغذیه ترانس از سمت MV و تغییر ۱۰ درصدی مقاومت بار، شکل های ۲۶ و ۲۷ نشان دهنده رفتار مناسب کنترل کننده ها در شرایط گذرا و پایداری ولتاژ و جریان خروجی و جریان ورودی در مدت زمان کمتر از ۰/۲ ثانیه هستند.

- [15] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 3th Ed., Springer Int. Publishing, Switzerland AG, 2020.
- [16] R. Subroto, Y. Chen, K. Lian, J. Tsai, and C. Chu, "An accurate accelerated steady-state model for high-level modular multilevel converters," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 57, no. 4, pp. 4278-4293, Jul. 2021.
- [17] M. Daryaei, S. Khajehoddin, J. Mashreghi, and K. Afridi, "A new approach to steady-state modeling, analysis and design of power converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 36, no. 11, pp. 12746-12768, Nov. 2021.
- [18] Z. Liu, K. Li, J. Wang, W. Liu, Z. Javid, and Z. Wang, "General model of modular multilevel converter for analyzing the steady-state performance optimization," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 2, pp. 925-937, Feb. 2021.

[۱۹] م. هجرى، "مدل سازی و کنترل هیبرید سرتاسرى مبدل DC-DC باک-بوست به وسیله سیستم های دینامیکی-منطقى مخلوط"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف-مهندسی برق، سال ۱۷، شماره ۱، صص. ۱۲-۱۰، بهار ۱۳۹۸.

- [20] H. Molla-Ahmadian, F. Tahami, A. Karimpour, and N. Pariz, "Hybrid control of DC-DC series resonant converters: the direct piecewise affine approach," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 3, pp. 1714-1723, Mar. 2015.
- [21] H. Abu Rub, J. Holtz, and J. Rodriguez, "Medium-voltage multilevel converters state of the art, challenges, and requirements in industrial applications," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2581-2596, Aug. 2010.
- [22] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, and M. A. Perez, "A survey on cascaded multilevel inverters," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2197-2206, Jul. 2010.
- [23] A. Milczarek and M. Michna, "The enhanced average model of the smart transformer with the wye-delta connection of dual active bridges," *Energies*, vol. 13, no. 18, Article ID: 4613, 2020.
- [24] M. E. Adabi, *Advanced Modeling of Solid State Transformer*, Ph.D. Thesis, CATALUNYA Polytechnic University, Barcelona, 2018.
- [25] B. Khare and V. Thapar, "MATLAB simulink model of dual active bridge converter for solid state transformer," *J. of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 8, no. 7, pp. 887-890, Jul. 2021.
- [26] J. V. Missula, R. Adda, and P. Tripathy, "Averaged modeling and SRF-based closed-loop control of single-phase ANPC inverter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 36, no. 12, pp. 13839-13854, Dec. 2021.
- [27] D. Shah, B. Baddipadiga, M. Crow, and M. Ferdowsi, "A solid-state transformer model for proper integration to distribution networks," in *Proc. North American Power Symp., NAPS19*, 6 pp., Wichita, KS, USA, 13-15 Oct. 2019.
- [28] J. Martinez-Velasco, S. Alepuz, F. Gonzalez-Molina, and J. Martin-Arnedo, "Dynamic average modeling of a bidirectional solid state transformer for feasibility studies and real-time implementation," *Electric Power Systems Research*, vol. 117, pp. 143-153, Dec. 2014.
- [29] R. B. Jeyapradha and V. Rajini, "Small signal averaged transfer function model and controller design of modular solid-state transformers," *ISA Trans.*, vol. 84, pp. 271-282, Jan. 2019.
- [30] C. M. Freitas, E. H. Watanabe, and L. F. C. Monteiro, "A linearized small-signal Thévenin-equivalent model of a voltage-controlled modular multilevel converter," *Electric Power Systems Research*, vol. 182, Article ID: 106231, May 2020.
- [31] A. Shri, *A Solid-State Transformer for Interconnection Between the Medium and the Low Voltage Grid*, MSc. Thesis, Delft University of Technology, Holand, Oct. 2013.
- [32] S. Falcones and R. Ayyanar, "Topology comparison for solid state transformer implementation," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, 8 pp., Minneapolis, MN, USA, 25-29 Jul. 2010.

[۳۳] ج. خراسانی، م. شفیعی، ح. ملاحمدیان، م. حسینی ابرده و م. علومى، "ترانسفورماتور حالت جامد"، فصلنامه علمى آموزشى پژوهشى عصر برق (انجمن مهندسين برق و الكترونيك ايران شاخه خراسان)، سال ۳، شماره ۴، صص. ۱۳-۷، بهار ۱۳۹۵.

- [34] E. Salary and M. R. Banaei, "Power quality improvement based on novel power electronic transformer," in *Proc. 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conf.*, pp. 286-291, Tehran, Iran, 16-17 Feb. 2011.
- [35] W. van der Merwe and T. Mouton, "Solid-state transformer topology selection," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology*, 6 pp., Churchill, VIC, Australia, 10-13 Feb. 2009.
- [36] S. Bhattacharya, et al., "Design and development of generation-I silicon based solid state transformer," in *Proc. 25th Annual IEEE*

مشتمل بر ترانس حالت جامد و همچنین تحلیل و طراحی رفتار ترانس در کاربردهای حوزه انرژی های نو و حمل و نقل برقی بهره برد. در کنار مدل سازی ارائه شده، ساختار کنترل حلقه بسته برای هر ۳ طبقه پیاده سازی گردیده است. نتایج شبیه سازی نشان دهنده قابلیت اصلاح ضریب توان ورودی ترانس و رگولاسیون مناسب ولتاژ خروجی آن می باشد. در مقاله های آینده، شبیه سازی دینامیکی ترانسفورماتور حالت جامد در سیستم قدرت، توسعه مدل سازی با در نظر گرفتن عناصر تلفات و افزودن تعداد مبدل ها در طبقات مد نظر است.

## ۶- سپاسگزاری

از شرکت برق منطقه ای خراسان رضوی به عنوان حامی پروژه تحقیقاتی «امکان سنجی طراحی و ساخت ترانسفورماتور حالت جامد با توان ۲۵ کیلووات و ولتاژ ۴۰۰ به ۲۰ کیلوولت» سپاسگزاریم. همچنین از ناظر پروژه تحقیقاتی، دکتر مهدی علومى بایگی، به خاطر راهنمایی های ارزنده ایشان کمال تشکر را داریم.

## مراجع

- [1] B. Umar, Y. Jibril, B. Jimoh, A. B. Kunya, Y. A. Maiwada, S. Aliyu, and M. Mohammed, "Glance into solid-state transformer technology: a mirror for possible research areas," *J. of Applied Materials and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 1-13, Oct. 2020.
- [2] F. Ferdowsi, H. Vahedi, A. Jafarian Abianeh, C. S. Edrington, and T. Elmezyani, "A data-driven real-time stability metric for SST-based microgrids," *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, Article ID: 107397, Jan. 2022.
- [3] L. Heinemann and G. Mauthe, "The universal power electronics-based distribution transformer, an unified approach," in *Proc. 32nd IEEE Annual Power Electronics Specialists Conf.*, vol. 2, pp. 504-509, Vancouver, BC, Canada, 17-21 Jun. 2001.
- [4] J. E. Huber and J. W. Kolar, "Volume/weight/cost comparison of a 1 MVA 10 kV/400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer," in *Proc. of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 4545-4552, Pittsburgh, PA, USA, 14-18 Sept. 2014.
- [5] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, G. I. D. Carne, L. Ferreira Costa, and Z. X. Zou, "The smart transformer impact on the electric grid and technology challenges," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 10, no. 2, pp. 46-58, Jun. 2016.
- [6] V. Najmi, *Modeling, Control and Design Considerations for Modular Multilevel Converters*, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute, USA, May 2015.
- [7] M. Shamshuddin, et al., "Solid state transformers: concepts, classification, and control," *J. of Energies*, vol. 13, no. 19, Article ID: 2319, 35pp., May 2020.
- [8] M. E. Adabi and J. A. Martinez-Velasco, "Solid state transformer technologies and applications: a bibliographical survey," *AIMS Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 291-338, 2018.
- [9] L. F. Costa, G. De Carne, G. Buticchi, and M. Liserre, "The smart transformer: a solid-state transformer tailored to provide ancillary services to the distribution grid," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 56-67, Jun. 2017.
- [10] R. Zhu, et al., "Smart transformer/large flexible transformer," *CES Trans. on Electrical Machines and Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 264-274, Dec. 2020.
- [11] B. D. Reddy and S. K. Sahoo, "Design of solid-state transformer," *Int. J. of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 357-364, Jan. 2015.
- [12] L. Zheng, et al., "SiC-based 5-kV universal modular soft-switching solid-state transformer (M-S4T) for medium-voltage DC microgrids and distribution grids," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 11326-11343, Oct. 2021.
- [13] E. Pool-Mazun, J. Sandoval, P. Enjeti, and I. Pitel, "An integrated solid-state transformer with high-frequency isolation for EV fast-charging applications," *IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 46-56, Jul. 2020.
- [14] J. Zhang, et al., "A modified DC power electronic transformer based on series connection of full-bridge converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 34, no. 3, pp. 2119-2133, Mar. 2019.

**مرتضی شفیع** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۶ از موسسه آموزش عالی خراسان به پایان رسانده است و هم‌اکنون در زمینه طراحی سامانه‌های کنترلی برای سیستم‌های اتوماسیون پیشرفته در پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشغول به فعالیت می‌باشد. نام‌برده قبل از پیوستن به پژوهشکده هواخورشید در سال‌های ۱۳۹۳ الی ۱۳۹۷ در زمینه طراحی و ساخت مدارات الکترونیک قدرت پیشرفته مشغول به فعالیت بوده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه او متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند، کنترل سیستم‌های اتوماسیون، هوش مصنوعی و طراحی رباتیک می‌باشد.

**جاوید خراسانی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی الکترونیک، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۴ و ۱۳۹۰ از دانشگاه‌های فردوسی مشهد، صنعتی شاهرود و علوم و تحقیقات تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و مهندسی پزشکی موسسه آموزش عالی خراسان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت، اقتصاد سیستم قدرت، انرژی‌های تجدیدپذیر و الکترونیک قدرت.

*Applied Power Electronics Conf. and Exposition, APEC'10*, pp. 1666-1673, Palm Springs, CA, USA, 21-25 Feb. 2010.

- [37] G. I. Ortiz and J. W. Kolar, *Solid State Transformer Concepts in Traction and Smart Grid Applications*, Power Electronic Systems Laboratory ETH, Swiss, 2011.
- [38] T. Ponraj and A. George, "A solid state transformer integrating distributed generation and storage," *Int. J. of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 4029-4035, 2014.
- [39] S. Bhuskute and V. S. Pawar, "Solid state transformer for smart grid system application," *Int. J. of Research in Electronics and Computer Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 90-93, Jun. 2015.

**حامد ملا احمدیان کاسب** متولد ۱۳۶۱ مشهد بوده و مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ از دانشگاه‌های فردوسی مشهد، صنعتی شریف و فردوسی مشهد اخذ نموده است. نام‌برده در سال ۱۳۸۶ به موسسه آموزش عالی خراسان پیوست و در حال حاضر عضو هیأت علمی گروه مهندسی برق می‌باشد. زمینه تحقیقاتی مورد علاقه ایشان کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت، طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های کنترل و اندازه‌گیری پیشرفته و کارآفرینی می‌باشد. از سال ۱۳۸۷ شرکت دانش‌بنیان تجهیزات ابزارآزما توسط ایشان بنیان‌گذاری شده و این شرکت در زمینه طراحی و ساخت تجهیزات آزمایشگاهی، تست، کنترل کیفیت و اندازه‌گیری فعالیت می‌نماید.