بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای بهروز محمدی دلویی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **استفاده از مدولاسیون DPWM در مبدل ژنراتور توربین بادی متصل به شبکه** در تاریخ ۱۳۹۲/۸/۲۸ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد قدرت پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر مصطفی محمدیان	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر علی یزدیان ورجانی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر رضا بیرانوند	استادیار	
استاد ناظر	دکتر داوود عرب خابوری	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمدکاظم شیخ الاسلامی	استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تائید است

امضای استاد راهنما:

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه تربیت مدرس

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

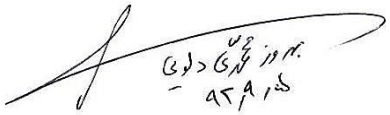
ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء



آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

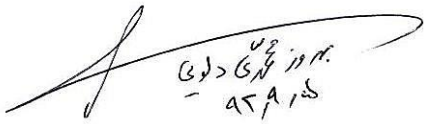
ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب بهروز محمدی دلویی دانشجوی رشته مهندسی برق مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:



دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق–قدرت

استفاده از مدولاسیون DPWM در مبدل ژنراتور توربین بادی متصل به شبکه

بهروز محمدی دلویی

استاد راهنما:

دکتر مصطفی محمدیان

استاد مشاور:

دکتر علی یزدیان ورجانی

پاییز ۱۳۹۲

تقدیم

تقدیم به مهربان فرشتگانی که:

لحظات ناب باورِ بودن

لذت و غرور دانستن

جسارت خواستن

عظمت رسیدن

و تمام تجربه‌های یکتا و زیبای زندگیم،

مدیون حضور سبز آنهاست

تقدیم به خانواده عزیزم.

تقدیم

با سپاس فراوان از استاد راهنمای فرهیخته‌ام جناب آقای دکتر مصطفی محمدیان
که در طول مدت انجام این پایان‌نامه از رهنمودهای علمی واخلاقی ایشان بهره مند شدم
و درگاه خداوند بزرگ را شاکرم که افتخار شاگردی ایشان را نصیبم نمود .

از استاد مشاور گرامی جناب آقای دکتر علی یزدیان به خاطر رهنمودهای
علمی و اخلاقی ارزنده شان بسیار سپاسگزارم.

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

و بعد از مدت‌ها، پس از پیمودن راه‌های فراوان که با حضور شیرین اساتید عزیزم، با راهنمایی‌ها و دغدغه‌های فراوانشان و شیطنت‌های زیبای آن دوران، نگاه‌های پدر و مادرم، که خستگی‌های این راه را به امید و روشنی راه تبدیل کرده و امیدوارم بتوانم در آینده ی نزدیک جوابگوی این همه محبت آنها باشم اکنون، با احترام فراوان برای این همه تلاش این عزیزان برای موفقیت من، این پایان نامه را به پدر و مادرم، اساتید عزیز، خانواده مهربانم تقدیم می‌کنم امیدوارم قادر به درک زیبایی‌های وجودشان باشم.

در اینجا جا دارد مراتب سپاس و قدردانی خود را از جناب آقای محمدیان که زحمت استادی و راهنمایی اینجانب را در این پایان‌نامه بر عهده داشتند، ابراز نمایم. همچنین برخود لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر یزدیان که افتخار شاگردی ایشان را داشتم، کمال تشکر را بنمایم.

از همه اساتید ارجمند در دانشگاه تربیت مدرس که در این دوران دو ساله افتخار شاگردی ایشان را داشتم و مجالی برای نام بردنشان نیست کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم. خوبی‌های این عزیزان هرگز از یاد و خاطره این جانب پاک نخواهد شد.

جا دارد در پایان از دوستان عزیزم جناب آقایان دکتر امیرحسین رجایی، مهندس حسن عامری و مهندس حمیدرضا گوهریان که در تمام مراحل این پایان نامه همواره یار و یاور اینجانب بودند کمال تشکر را داشته باشم. همچنین از دوستان عزیزم در خوابگاه دلجویه دانشگاه تربیت مدرس خصوصا آقای مهندس رضا موحد قدسی نیا و نیز دوستان خوبم در آزمایشگاه الکترونیک قدرت و حفاظت که با ایجاد جوی دوستانه و صمیمی لحظاتی شیرین و پرخاطره برایم رقم زدند، سپاسگزارم.

بهروز محمدی دلویی

پاییز ۱۳۹۲

چکیده

در این پایان‌نامه روشی جدید جهت اتصال ژنراتور توربین بادی به شبکه ارائه شده است. هدف از این روش، کاهش تلفات سیستم تبدیل انرژی باد می‌باشد. این هدف هم در انتخاب مبدل و هم در روش مدولاسیون پیشنهادی منظور شده است. بدین منظور سیستم واسطی شامل دو مبدل ویینا و اینورتر ۳ سطحی نقطه خنثی اکتیو[1] برای اتصال ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به شبکه پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی در مقایسه با مبدل‌های متعارف پشت به پشت ۶ سوئیچ[2] باعث کاهش تلفات کلیدزنی و افزایش بازدهی کل سیستم می‌شود. از سویی، روش‌های مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته در مقایسه با روش‌های مدولاسیون پهنای پالس پیوسته متعارف، باعث کاهش تلفات کلیدزنی در فرکانس‌های کلیدزنی مشابه می‌گردد. به بیان دیگر می‌توان با ثابت نگاه داشتن تلفات سیستم، فرکانس کلیدزنی را افزایش داد که این امر باعث بهبود کیفیت شکل موج‌های خروجی می‌گردد. در طرح پیشنهادی موجود با انتخاب روش مدولاسیون ناپیوسته متناسب با شرایط کاری سیستم، می‌توان تلفات کلیدزنی را به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشید. جهت تاییداین ادعا، سیستم واسط پیشنهادی برای توان نامی ۱۰ کیلووات و با سرعت باد متغیر در نرم افزار متلب/سیمولینک شبیه سازی شده است و نتایج، ادعای بیان شده را اثبات می‌نماید.

کلید واژه: مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته، انرژی باد، تلفات، مبدل ویینا، مبدل ۳ سطحی نقطه خنثی

[1] ANPC
[2] B6

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- تاریخچه ۱
۱-۳- نقد و بررسی شیوه‌های نوین ۲
۱-۴- ضرورت‌ها و هدف از انجام پژوهش ۲
۱-۵- نوآوری‌های پژوهش ۳
۱-۶- ساختار گزارش ۳

فصل ۲- مدلسازی سیستم تبدیل انرژی باد با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۵
۲-۱- مقدمه ۵
۲-۲- مدل سازی سیستم ۵
۲-۲-۱- مدل روتور توربین بادی ۶
۲-۲-۲- مدل محور انتقال قدرت ۷
۲-۲-۳- مدلسازی PMSG ۷
۲-۲-۳-۱- تلفات ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۹
۲-۳- استراتژی‌های کنترل PMSG ۱۰
۲-۳-۱- روش کنترل برداری FOC ۱۱
۲-۳-۲- روش کنترل مستقیم گشتاور ۱۳
۲-۳-۳- روش‌های تعیین مقدار مرجع جریان ۱۳
۲-۳-۳-۱- کنترل ضریب توان واحد ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۱۴
۲-۳-۳-۲- کنترل $I_d=0$ ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۱۴
۲-۴- نتیجه‌گیری ۱۵

فصل ۳- بررسی سیستم واسط ۱۶
۳-۱- مقدمه ۱۶
۳-۲- مبدل پشت به پشت ۶ سوئیچ ۱۷
۳-۲-۱- ویژگی‌های مبدل ۱۸
۳-۳- یکسوساز سه سطحی ویینا ۱۹
۳-۳-۱- مزایا و معایب یکسوکننده ویینا ۲۰
۳-۳-۲- نحوه عملکرد مبدل ویینا ۲۰

۳-۴- مبدل سه سطحی نقطه خنثی ۲۱
۳-۵- ویژگی‌های مبدل NPC ۲۲
۳-۶- بررسی مشکل توزیع تلفات در مبدل NPC ۲۳
۳-۷- مبدل سه سطحی ANPC ۲۶
۳-۷-۱- حالات کلید زنی مبدل ۲۷
۳-۷-۱-۱- کموتاسیون بین حالات کلیدزنی ۲۸
۳-۸- نتیجه گیری ۳۲
فصل ۴- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته ۳۳
۴-۱- مقدمه ۳۳
۴-۲- تاریخچه روش‌های PWM ۳۳
۴-۳- روش‌های PWM متعارف برای مبدل‌های ۲ سطحی ۳۶
۴-۳-۱- روش‌های مدولاسیون پهنای پالس پیوسته برای مبدل‌های دو سطحی ۳۸
۴-۳-۱-۱- روش PWM سینوسی ۳۸
۴-۳-۱-۲- روش تزریق هارمونیک سوم ۳۹
۴-۳-۱-۳- روش SVPWM ۴۱
۴-۳-۲- روش‌های مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته برای مبدل‌های دو سطحی ۴۳
۴-۳-۲-۱- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته نوع صفر ۴۳
۴-۳-۲-۲- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته نوع یک ۴۵
۴-۳-۲-۳- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته نوع دوم ۴۶
۴-۳-۲-۴- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته نوع سوم ۴۷
۴-۳-۲-۵- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته ماکزیمم ۴۸
۴-۳-۲-۶- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته مینیمم ۴۸
۴-۳-۳- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته بصورت بردار فضایی ۴۹
۴-۴- روش‌های PWM برای مبدل‌های چند سطحی ۵۱
۴-۴-۱- روش مدولاسیون پهنای پالس پیوسته ۵۱
۴-۴-۲- روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته ۵۳
۴-۵- نتیجه‌گیری ۵۷
فصل ۵- بررسی ساختار پیشنهادی ۵۸
۵-۱- مقدمه ۵۸
۵-۲- استراتژی کنترل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به کمک یکسوکننده وینا ۵۸
۵-۳- کنترل توان تزریقی به شبکه ۶۰
۵-۴- متعادل کردن ولتاژ نقطه خنثی ۶۰
۵-۵- تعیین ولتاژ لینک DC ۶۳
۵-۶- طراحی فیلتر طرف ژنراتور و شبکه ۶۴
۵-۶-۱- تابع تبدیل فیلتر ۶۴

۵-۶-۲- طراحی پارامترهای فیلتر LC سمت ژنراتور ۶۵
۵-۷- روش مدولاسیون مورد استفاده ۶۵
۵-۸- مشخصات سیستم تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی ۶۶
۵-۸-۱- ژنراتور ۶۶
۵-۸-۲- شبکه ۶۶
۵-۸-۳- مشخصات بلوک شبیه سازی باد ۶۷
۵-۸-۴- مشخصات مدل توربین ۶۷
۵-۸-۵- سایر مشخصات سیستم ۶۷
۵-۹- شبیه سازی سیستم ۶۸
۵-۹-۱- بخش توربین بادی و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۶۸
۵-۹-۲- سیستم کنترل ژنراتور ۷۱
۵-۹-۳- لینک DC ۷۲
۵-۹-۴- سیستم کنترل اینورتر ۷۴
۵-۱۰- مقایسه روش‌های مدولاسیون پیوسته و گسسته ۷۹
۵-۱۰-۱- بررسی تلفات ۸۱
۵-۱۱- نتیجه‌گیری ۸۴

فصل ۶- تلفات ۸۵

۶-۱- مقدمه ۸۵
۶-۲- تلفات نیمه هادی‌ها ۸۵
۶-۲-۱- تلفات هدایتی ۸۵
۶-۲-۲- تلفات کلیدزنی ۸۶
۶-۲-۳- محاسبه تلفات ۸۶
۶-۲-۳-۱- مشخصات کلیدهای مورد استفاده ۸۷
۶-۳- بررسی تلفات ۸۸
۶-۳-۱- مبدل B6 ۸۹
۶-۳-۲- مبدل ویینا ۸۹
۶-۳-۲-۱- بررسی تلفات دو مبدل Vienna و B6 به عنوان یکسوساز ۸۹
۶-۳-۳- مبدل NPC ۹۰
۶-۳-۳-۱- بررسی تلفات کلیدهای مبدل ۹۰
۶-۳-۳-۲- بررسی تلفات مبدل ۹۳
۶-۳-۴- مبدل ANPC ۹۴
۶-۳-۴-۱- بررسی تلفات کلیدهای مبدل ۹۵
۶-۳-۴-۲- بررسی تلفات مبدل ۹۷
۶-۳-۵- بررسی تلفات ۴ سیستم واسط ۹۸
۶-۴- نتیجه‌گیری ۹۸

فصل ۷- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۰
۷-۱- مقدمه ۱۰۰
۷-۲- نتیجه‌گیری ۱۰۰
۷-۳- پیشنهادات ۱۰۱
فهرست مراجع ۱۰۳
واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی ۱۰۷
واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی ۱۰۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱: استراتژی کلیدزنی مبدل ۳ سطحی NPC ۲۶
جدول ۳-۲: حالات کلیدزنی مبدل ANPC ۲۸
جدول ۳-۳: تلفات کلیدزنی نیمه هادی‌ها در مبدل ولتاژی ۳ فاز ANPC ۳۱
جدول ۵-۱: حالت کلیدزنی مبدل ویینا و جریان مسیر خنثی ۶۱
جدول ۵-۲: مشخصات ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۶۶
جدول ۵-۳: مشخصات شبکه ۶۷
جدول ۵-۴: مشخصات بلوک شبیه ساز باد ۶۷
۵-۵: مشخصات مدل توربین باد ۶۷
جدول ۵-۶: مشخصات مهم سیستم ۶۸
جدول ۵-۷: مقایسه اغتشاشات هارمونیکی جریان تزریقی به شبکه برای دو روش پیوسته و ناپیوسته... ۸۱
۶-۱: مشخصات کلیدهای مورد استفاده در شبیه سازی ۸۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: بلوک دیاگرام سیستم تبدیل انرژی بادی با ژنراتور PMSG ۶
شکل ۲-۲: مدار معادل تکفاز ژنراتور مغناطیس دائم ۷
شکل ۲-۳: مدار معادل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۹
شکل ۲-۴: دیاگرام فازوری ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۹
شکل ۲-۵: دسته بندی روش‌های فرکانس متغیر ۱۰
شکل ۲-۶: بلوک دیاگرام روش FOC ۱۱
شکل ۲-۷: بلوک دیاگرام روش کنترل ۱۲
شکل ۲-۸: بلوک دیاگرام روش DTC-SVM با ساختار موازی ۱۳
شکل ۳-۱: مبدل ولتاژ ۲ سطحی پشت به پشت برای سیستم‌های تبدیل انرژی بادی ۱۷
شکل ۳-۲: مبدل پشت به پشت ۶ سوئیچ در کاربرد باد ۱۸
شکل ۳-۳: مسیر عبور جریان در مبدل B6 ۱۸
شکل ۳-۴: یکسوساز PWM سه سطحی سه کلید سه فاز نوع دو ۱۹
شکل ۳-۵: انواع ساختارهای یکسوکننده ویینا ۱۹
شکل ۳-۶: مسیر عبور جریان در حالات مختلف کلیدزنی مبدل ویینا ۲۱
شکل ۳-۷: ساختار مبدل ۳ سطحی NPC ۲۲
شکل ۳-۸: دیاگرام بردارهای فضایی مبدل NPC ۲۳
شکل ۳-۹: مسیر هدایت جریان فاز در حالت الف ۲۴
شکل ۳-۱۰: مسیر هدایت جریان فاز در حالت ب ۲۵
شکل ۳-۱۱: مسیر هدایت جریان فاز در حالت ج ۲۵
شکل ۳-۱۲: مسیر هدایت جریان فاز در حالت د ۲۶
شکل ۳-۱۳: ساختار مبدل ANPC ۲۷
شکل ۳-۱۴: کموتاسیون در مبدل ANPC: نوع ۱(+ به 0U2، + به 0U1 و برعکس) ۲۹
شکل ۳-۱۵: کموتاسیون در مبدل ANPC: نوع ۲(+ به 0L2 و برعکس) ۲۹
شکل ۳-۱۶: کموتاسیون در مبدل ANPC: نوع ۳(+ به 0L1 و برعکس) ۳۰
شکل ۴-۱: شکل موج‌های مرجع مدولاسیون ناپیوسته برای کلیدهای ۱ و ۲ مبدل NPC مقاله ۳۵
شکل ۴-۲: روش‌های متداول PWM با موج حامل برای مبدل‌های دو سطحی ۳۸
شکل ۴-۳: روش PWM سینوسی ۳۹
شکل ۴-۴: روش تزریق هارمونیک سوم ۴۰
شکل ۴-۵:شکل موج مرجع روش SVPWM ۴۱
شکل ۴-۶: دیاگرام بردارهای فضایی یک مبدل ۲ سطحی ۴۲

شکل ۴-۷: نحوه بدست آوردن سیگنال توالی صفر ۴۴
شکل ۴-۸: روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته نوع صفر ۴۴
شکل ۴-۹: کاربرد روش DPWM0 برای ضریب توان ۳۰ درجه پیشفاز ۴۵
شکل ۴-۱۰: روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته نوع یک ۴۵
شکل ۴-۱۱: کاربرد روش DPWM1 برای ضریب توان واحد ۴۶
شکل ۴-۱۲: روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته نوع دو ۴۶
شکل ۴-۱۳: کاربرد روش DPWM2 برای ضریب توان ۳۰ درجه پیشفاز ۴۷
شکل ۴-۱۴: روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته نوع سوم ۴۷
شکل ۴-۱۵: روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته ۴۹
شکل ۴-۱۶: روش‌های مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته بصورت بردارهای فضایی ۵۰
شکل ۴-۱۷: دیگرام بردارهای فضایی مبدل‌های ۳ سطحی ۵۲
شکل ۴-۱۸: شکل موج مرجع مدولاسیون پهنای پالس برای مبدل‌های ۳ سطحی ۵۳
شکل ۴-۱۹: نحوه محاسبه پارامترهای ماکزیمم و مینیمم سیگنال نامی مدولاسیون ۵۴
شکل ۴-۲۰: سیگنال مرجع مدولاسیون برای روش DPWM1 ۵۵
شکل ۴-۲۱: آفست دوم و سیگنال اصل از آن ۵۶
شکل ۴-۲۲: سیگنال مرجع مدولاسیون روش DPWM2 ۵۶
شکل ۵-۱: نمای کلی سیستم پیشنهادی و کنترل آن ۵۹
شکل ۵-۲: روش متعادل کردن ولتاژ نقطه خنثی ۶۲
شکل ۵-۳: جریان آفست تولیدی جهت بالانس ولتاژ خازنهای لینک DC ۶۲
شکل ۵-۴: شمای کلی سیستم کنترل ۶۳
شکل ۵-۵: بلوک دیاگرام سیستم تک خطی اینورتر متصل به شبکه ۶۴
شکل ۵-۶: استفاده از یک سلف به عنوان فیلتر خروجی ۶۵
شکل ۵-۷: سیگنال مرجع مدولاسیون ناپیوسته نوع اول برای کلیدزنی اینورتر ۶۶
شکل ۵-۸: تغییرات سرعت باد در حین شبیه سازی ۶۸
شکل ۵-۹: سرعت مرجع محاسبه شده توسط الگوریتم استخراج توان ماکزیمم ۶۹
شکل ۵-۱۰: سرعت مرجع و سرعت ژنراتور ۶۹
شکل ۵-۱۱: ماکزیمم توان قابل تولید و توان تولیدی توربین باد ۷۰
شکل ۵-۱۲: توان تولیدی توربین بادی ۷۰
شکل ۵-۱۳: گشتاور تولیدی توسط توربین بادی ۷۰
.شکل ۵-۱۴: گشتاور مرجع تولیدی توسط سیستم کنترل ژنراتور ۷۱
شکل ۵-۱۵: جریان و جریان مرجع فاز A ژنراتور ۷۱
شکل ۵-۱۶: توان اکتیو تولیدی ژنراتور ۷۲
شکل ۵-۱۷: ولتاژ خازن C1 ۷۲
شکل ۵-۱۸: ولتاژ خازن C2 ۷۳

شکل ۵-۱۹: ولتاژ خازن‌های C1 و C2 ..... ۷۳
شکل ۵-۲۰: ولتاژ لینک DC ۷۴
شکل ۵-۲۱: جریان و جریان مرجع محور q برای کلیدزنی اینورتر ۷۴
شکل ۵-۲۲: جریان و جریان مرجع محور d برای کلیدزنی اینورتر ۷۵
شکل ۵-۲۳: مقادیر مرجع محور d و q ولتاژ مرجع کلیدزنی اینورتر ۷۵
شکل ۵-۲۴: سیگنال‌های مرجع بدست آمده برای تولید سیگنال‌های ناپیوسته ۷۶
شکل ۵-۲۵: سیگنال‌های ۳ فاز مرجع ناپیوسته برای کلیدزنی اینورتر ۷۶
شکل ۵-۲۶: سیگنال مرجع کلیدزنی ناپیوسته حاصل از ۳ سیگنال سینوسی خالص ۷۷
شکل ۵-۲۷: ولتاژ و جریان فاز A اینورتر ۷۷
شکل ۵-۲۸: اغتشاشات هارمونیکی جریان خروجی فاز A اینورتر ۷۸
شکل ۵-۲۹: توان اکتیو تزریقی سیستم به شبکه ۷۸
شکل ۵-۳۰: توان راکتیوتزریقی سیستم به شبکه ۷۸
شکل ۵-۳۱: دامنه ولتاژ ۳ فاز شبکه ۷۹
شکل ۵-۳۲: جریان ۳ فاز تزریقی به شبکه ۷۹
شکل ۵-۳۳: سیگنال مرجع روش مدولاسیون پیوسته برای مبدل‌های ۳ سطحی ۸۰
شکل ۵-۳۴: اغتشاشات هارمونیکی جریان تزریقی فاز A به شبکه برای روش مدولاسیون پیوسته ۸۰
شکل ۵-۳۵: جریان و سیگنال‌های کلیدزنی کلید Ta2 ..... ۸۲
شکل ۵-۳۶: تلفات اینورتر برای دو روش مدولاسیون پیوسته و ناپیوسته ۸۲
شکل ۵-۳۷: تلفات کل سیستم برای دو حالت مدولاسیون پیوسته و ناپیوسته ۸۳
شکل ۵-۳۸: مقایسه تلفات ساختار پیشنهادی برای دو روش پیوسته و ناپیوسته ناپیوسته ۸۴
شکل ۶-۱: تلفات مبدل Vienna و B6 برای شرایط کاری مختلف ۸۹
شکل ۶-۲: مشخصات تلفات کلید T_1 ..... ۹۱
شکل ۶-۳: مشخصات تلفات کلید T_2 ..... ۹۱
شکل ۶-۴: مقایسه جریان کلکتور کلید T_1 و T_2 سیگنال کلیدزنی گیت آن‌ها ۹۲
شکل ۶-۵: شکل۶- مقایسه تلفات کلیدهای ۱ و ۲ مبدل NPC ۹۳
شکل ۶-۶: مشخصات تلفات دیود D_1 ..... ۹۳
شکل ۶-۷: تلفات مبدل NPC برای شرایط کاری مختلف ۹۴
شکل ۶-۸: مشخصات تلفات T1 ..... ۹۵
شکل ۶-۹: مشخصات تلفات کلید T_2 ..... ۹۶
شکل ۶-۱۰: مشخصات تلفات کلید T_5 ..... ۹۶
شکل ۶-۱۱: تلفات مبدل ANPC برای شرایط کاری مختلف ۹۷
شکل ۶-۱۲: مقایسه تلفات بین ۴ سیستم واسط مورد مطالعه ۹۸

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

در سال‌های اخیر مواردی چون کاهش منابع فسیلی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن کره زمین اهمیت استفاده از منابع تجدیدپذیر نظیر انرژی‌های بادی، خورشیدی و زمین گرمایی را بیش از پیش آشکار کرده است. تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر روز به روز در حال افزایش است و این انرژی‌ها گام‌های مهمی را برای تجاری شدن بر می‌دارند. فناوری هر کدام از این انرژی‌ها، در مراحل مختلف مطالعه، توسعه و بهره برداری قرار دارد و تفاوت‌هایی در هزینه‌ی مورد انتظار برای حال و آینده، میزان دسترسی به منابع آنها و غیره دارند. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری انرژی باد پیشرفت‌های زیادی در سال‌های اخیر داشته و به سریع ترین فناوری در حال توسعه در میان انرژی‌های تجدیدپذیر تبدیل شده‌است [۱].

در این فصل با هدف ایجاد یک دیدکلی در خوانندگان، به بررسی مسائل کلی این پایان نامه از قبیل هدف و ضرورت‌های انجام تحقیق و سایر مسائل مرتبط با آن پرداخته می‌شود.

۱–۲– تاریخچه

اگرچه وسایل بادی ساده از هزاران سال قبل وجود داشته است، اما اولین پیشرفت‌های جدی در این سیستم‌ها در طی قرن نوزدهم میلادی در آمریکا رخ داد. اولین ماشین بادی بزرگ برای تولید الکتریسیته، یک توربین ۱۲ کیلو وات و سرعت پایین بود که در کلیولند ایالت اوهایو آمریکا در سال ۱۸۸۸ نصب شد. در سال‌های پایانی جنگ جهانی اول استفاده از سیستم‌های ۲۵ کیلو وات در کشور دانمارک گسترش یافت. در طی سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۷۰ مطالعاتی در کشورهای دانمارک، فرانسه، آلمان و بریتانیا نشان داد که سیستم‌های بادی با توان بالا هم می‌تواند به کار گرفته شوند [۱].

اولین سیستم‌های انرژی بادی در مقیاس بزرگ در ایالت کالیفرنیا آمریکا ظهور پیدا کرد، جایی که بیشتر از ۱۶ هزار ماشین در رنج‌های ۲۰ تا ۳۵۰ کیلو وات و بطور کلی با ظرفیت ۱/۷ گیگاوات، در سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۰ نصب شد. از طرف دیگر در شمال اروپا نصب مزارع بادی در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ میلادی گسترش یافت و انرژی الکتریکی تولیدی با هزینه بالاتر البته با منابع مناسب باد، بازار کوچک اما پایداری را بوجود آورد [۲].

امروزه با پیشرفت دانش الکترونیک قدرت و کاهش هزینه‌های مرتبط با آن، در مزارع بادی ژنراتورهایی با ظرفیت فراتر از ۵ مگاوات نصب شده اند. در حال حاضر مباحث مطرح در زمینه سیستم‌های انرژی بادی، در نحوه بکارگیری این سیستم‌ها با حداکثر بازدهی و قابلیت اطمینان ممکن می‌باشد.

۱-۳- نقد و بررسی شیوه‌های نوین

در سال‌های اخیر در میان توربین‌های بادی با سرعت متغیر، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به عنوان یکی از مناسب ترین گزینه‌ها مطرح می‌باشد. این ژنراتورها سیم پیچ تحریک نداشته و قابلیت طراحی بصورت چند قطب[1] و در نتیجه قابلیت کارکرد در سرعت‌های بسیار پایین را داراست. برای اتصال این ژنراتورها به شبکه یک سیستم واسط[2] با قابلیت عبور تمام توان[3] تولیدی نیاز است. سیستم‌های واسط متداول شامل دو مبدل سمت ژنراتور و سمت شبکه می‌باشند. وظیفه مبدل سمت ژنراتور کنترل سرعت ژنراتور و همچنین اجرای الگوریتم دریافت توان ماکزیمم در صورت نیاز است. از سوی دیگر وظیفه مبدل سمت شبکه، کنترل ولتاژ باس DC و نیز توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه می‌باشد [۳].

در میان سیستم‌های واسط، مبدل دو سطحی پشت به پشت ۶ سوئیچ، متداول ترین ساختار می‌باشد. از مزایای این سسیتم واسط می‌توان به ساختار و روش کنترل ساده و نیز تلفات هدایتی پایین در مقایسه با ساختارهای چند سطحی اشاره کرد. یکی از مهمترین ایرادات این ساختار تلفات کلیدزنی بالای آن می‌باشد که خصوصا در توان‌های بالا، کارایی این سیستم را محدود می‌کند. لذا در سال‌های اخیر سیستم‌های واسط با مبدل‌های چند سطحی مورد توجه محققان قرار گرفته است [۴].

جهت کلیدزنی مبدل‌های سیستم واسط، الگوریتم‌ها و روش‌های مختلفی بیان شده اند که شاید بتوان گفت روش‌های PWM، متداول ترین روش می‌باشد. در میان روش‌های مختلف PWM، روش مدولاسیون پهنای پالس پیوسته کاربرد بیشتری دارد. از مهمترین مزایای این روش می‌توان به پایین بودن اغتشاشات هارمونیکی در جریان خروجی و کارایی مناسب برای کاربردهای دیجیتال اشاره کرد. اما این روش در اندیس‌های بالای مدولاسیون کارایی خوبی همانند اندیس‌های پایین مدولاسیون ندارد و از طرف دیگر در مقایسه با روش‌های ناپیوسته تلفات کلیدزنی بالایی دارد، که این مورد در توان‌های بالا کاملا مشهود است [۵].

۱-۴- ضرورت‌ها و هدف از انجام پژوهش

با توجه به مطالب اشاره شده و نیز با افزایش پیوسته در سطح توان و ولتاژ سیستم‌های تبدیل انرژی باد، به نظر می‌رسد ارائه ساختار و روش مدولاسیونی که تلفات سیستم را کاهش دهد، ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این پایان نامه با هدف کاهش تلفات سیستم تبدیل انرژی بادی، سیستم واسطی شامل مبدل‌های چند سطحی بکار گرفته شده است. همچنین برای بهبود هرچه بهتر بازدهی سیستم، روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته پیشنهاد شده است.

---

[1] Multi Pole
[2] System Interface
[3] Full Scale

۱-۵- نوآوری‌های پژوهش

نوآوری‌هایی که در این پایان نامه وجود دارد عبارتند از:

۱- استفاده از روش مدولاسیون پهنای پالس ناپیوسته با موج حامل[1] برای مبدل ANPC

۲- سیستم واسط پیشنهادی شامل یکسوساز ویینا به عنوان مبدل سمت ژنراتور و مبدل ANPC به عنوان مبدل سمت شبکه برای کاربرد در سیستم‌های انرژی باد.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

در فصل دو این پایان نامه به بررسی سیستم تبدیل انرژی باد با استفاده از ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم پرداخته شده است. بخش‌های مختلف سیستم شامل باد، روتور، محور انتقال قدرت[2]، ژنراتور و غیره بصورت ریاضی، مدلسازی شده اند. روابط حاکم بر ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم بیان و تلفات آن بررسی و همچنین استراتژی‌های کنترل ژنراتور بیان و با هم مقایسه شده اند.

در فصل سوم به بررسی سیستم‌های واسط جهت اتصال ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم به شبکه پرداخته شده است. سیستم‌های واسط به سه دسته کلی تقسیم بندی و برای هر دسته مزایا و معایب آن بیان شده است. در ادامه این فصل چند ساختار سه سطحی شامل مبدل ویینا، مبدل NPC و مبدل ANPC مورد بررسی قرار گرفته اند. روش‌های کلیدزنی، مسیرهای عبور جریان در مبدل و تلفات هریک به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

در فصل چهارم به بررسی روش‌های PWM پیوسته و ناپیوسته برای مبدل‌های دو و سه سطحی پرداخته شده است. حدود ۱۰ روش متداول PWM پیوسته و ناپیوسته برای مبدل‌های دو سطحی و سه روش متداول PWM برای مبدل‌های سه سطحی بیان شده است. برای هریک از این روش‌ها مزایا و معایب آن بررسی شده است.

در فصل پنجم با هدف کاهش تلفات سیستم تبدیل انرژی باد، سیستم واسطی شامل دو مبدل ویینا و ANPC با روش کلیدزنی PWM ناپیوسته پیشنهاد شده است. به کمک نرم افزار MATLAB/Simulink با توجه به نیازمندی‌های شبکه و با درنظر گرفتن الگوریتم دریافت توان ماکزیمم به روش تغییر و مشاهده، سیستم تبدیل انرژی باد برای توان نامی ۱۰ کیلو وات و سرعت باد متغیر شبیه سازی شده است. همچنین تلفات سیستم واسط پیشنهادی به دو روش PWM پیوسته و ناپیوسته محاسبه و با هم مقایسه شده است.

در فصل ششم به بررسی تلفات و مقایسه آن برای ۴ سیستم واسط B2BB6، Vienna-NPC، Vienna-B6 و Vienna-ANPC پرداخته شده است. ابتدا روش محاسبه تلفات هدایتی و کلیدزنی مبدل

[1] Carrier Based Discontinous PWM
[2] Drive Train