

«پژوهشگر گرامی»

صفحاتی را که مشاهده می فرمایید، گزیده‌ای محدود از یک سند پژوهشی طولانی است که شامل:

- صفحه روی جلد
- چکیده فارسی و انگلیسی
- صفحه اول مقدمه
- منابع
- فهرست مطالب
- پیشنهادات

جهت مطالعه دقیق جزئیات بیش تر سند به صورت چاپی به بخش پایان نامه‌ها در کتابخانه مرکزی و نیز برای مشاهده شکل دیجیتالی آن وارد پیوند ذیل شوید:

http://172.16.33.12/faces/search/digitalresources/digitalBriefView.jspx?_afPfm=mzlnj3xmi

در صورت به وجود آمدن هر گونه مشکل و پرسش در زمینه دسترسی، تهیه و استفاده از منابع الکترونیکی و دیجیتالی به مرکز اطلاع رسانی و بخش منابع دیجیتال کتابخانه مرکزی و مرکز اسناد دانشگاه مراجعه و یا تماس بگیرید!

شماره تماس: ۰۸۷-۳۳۶۲۴۰۰۶



دانشگاه کردستان
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته برق گرایش قدرت

عنوان:

کنترل اینرسی مجازی برای بهبود پایداری در سیستم‌های
قدرت با حضور انرژی باد

پژوهشگر:

سالار حسنه

استاد راهنما:

دکتر رحمت‌الله میرزایی

استاد مشاور:

دکتر علی حسامی نقشبندی

شهریور ۱۳۹۹





دانشگاه کردستان
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته برق گرایش قدرت

عنوان:

کنترل اینرسی مجازی برای بهبود پایداری در سیستم‌های
قدرت با حضور انرژی باد

پژوهشگر:

سالار حسنه

استاد راهنما:

دکتر رحمت‌الله میرزایی

استاد مشاور:

دکتر علی حسامی نقشبندی

شهریور ۱۳۹۹

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع

این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه کردستان است.



*** تعهد نامه ***

اینجانب سالار حسنه دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی گروه مهندسی برق تعهد می‌نمایم که محتوای این پایان‌نامه نتیجه تلاش و تحقیقات خود بوده و از جایی کپی‌برداری نشده و به پایان رسانیدن آن نتیجه تلاش و مطالعات مستمر اینجانب و راهنمایی و مشاوره اساتید بوده است.

با تقدیم احترام

سالار حسنه

شهریور ۱۳۹۹



باسمه تعالی

تعمهدنامه دانشجویان تحصیلات تکمیلی دانشگاه کردستان در انجام

پایان نامه *

اینجانب سالار حسنه دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت متعهد می شوم:

- ۱- صداقت، امانتداری و بی طرفی را در انجام پژوهش و انتشار نتایج حاصل از آن رعایت نمایم.
- ۲- در نگارش نتیجه پژوهش های حاصل از موضوع پایان نامه، از بازنویسی نوشته های دیگران بدون ذکر منبع، بازی با الفاظ، زیاده نویسی، کلی گویی و جزم اندیشی و تصرف گرایبی پرهیز نمایم و نتایج پژوهشی خود را در موعد مقرر و با اطلاع استاد راهنما منتشر نمایم.
- ۳- تمامی یافته های مستخرج از پایان نامه متعلق به دانشگاه کردستان بوده و لازم است در کلیه مقالات مستخرج از آن ها نام دانشگاه کردستان را تحت عنوان ((دانشجوی دانشگاه کردستان)) یا ((دانش آموخته دانشگاه کردستان)) ذکر نمایم.
- ۴- در انتشار مقالات نام استاد (استادان) راهنما و استاد (استادان) مشاور را در لیست مولفین مقاله ذکر نمایم و از آوردن اسامی افرادی که نقش موثری در انجام پژوهش نداشته اند، جداً خودداری نمایم.
- ۵- در بخش سپاسگزاری مقاله، از تمامی افراد و سازمان هایی که در اجرای پژوهش مساعدتی میدول داشته اند با ذکر نوع مشارکت تشکر و قدر دانی نمایم.
- ۶- از انتشار همیوشان یا ارسال همزمان یک مقاله به چند مجله و یا ارسال مجدد مقاله چاپ شده به مجلات دیگر خودداری نمایم.
- ۷- در صورت عدم رعایت موارد مذکور، دانشگاه کردستان مجاز خواهد بود تا برابر مقررات اقدام نماید.

امضاء دانشجو



دستور العمل نحوه برخورد با موارد تخطی دانشجویان تحصیلات تکمیلی در هنگام انتشار نتایج پژوهش

- ۱- در موارد زیر دانشگاه کردستان با مجله مربوطه مکاتبه و درخواست خارج نمودن مقاله را نموده و موضوع را به محل کار یا تحصیل بعدی دانشجو اطلاع خواهد داد.
الف: چاپ مقاله بدون اطلاع و تأیید استادان راهنما
ب: چاپ نتایج حاصل از پژوهش های انجام شده در دانشگاه کردستان بدون ذکر نام دانشگاه
- ۲- در صورت احراز تخلف از سایر موارد درج شده در تعهد نامه دانشجویی، دانشگاه ضمن مکاتبه با مجله مربوطه، حسب مورد تصمیم گیری خواهد نمود.



دانشگاه کردستان
دانشکده مهندسی
گروه مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت

عنوان:

کنترل اینرسی مجازی برای بهبود پایداری در سیستم‌های
قدرت با حضور انرژی باد

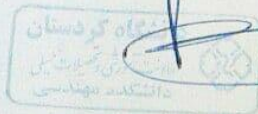
پژوهشگر:

سالار حسنه

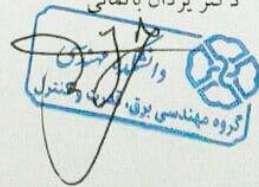
در تاریخ ۱۳۹۹/۶/۲۹ توسط کمیته تخصصی و هیات داوران زیر مورد بررسی قرار گرفت و با
درجه متوسط به تصویب رسید.

امضاء	مرتبۀ علمی	نام و نام خانوادگی	هیات داوران
	استادیار	دکتر رحمت الله میرزایی	۱- استاد راهنما
	دانشیار	دکتر علی حسامی نقشبندی	۲- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مهرداد غلامی	۳- استاد داور داخلی
	استادیار	دکتر نوید رضایی	۴- استاد داور داخلی
مهر و امضاء معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده			مهر و امضاء مدیر گروه

دکتر عبدالسلام قادری



دکتر یزدان باتمانی



چکیده

سیستم قدرت الکتریکی در حال حاضر در دوره‌ای از تغییرات بی‌سابقه قرار دارد. نگرانی‌های زیست محیطی منجر به جایگزینی سهم قابل توجهی از نیروگاه‌های برق مبتنی بر سوخت فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر شده‌است. سیستم‌های قدرت جدید به دلیل جداسازی منابع تجدیدپذیر با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت از شبکه AC، ثابت اینرسی کوچکی دارند. بنابراین، افزایش سطح نفوذ توربین‌های بادی در شبکه، پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت را تحت تأثیر قرار داده‌است. لازم است که مزارع بادی متصل به شبکه، خدمات جانبی مانند کنترل توان اکتیو، تنظیم فرکانس و کنترل میرایی را فراهم کنند. در حال حاضر، مقالات زیادی کنترل اینرسی مجازی و تأثیر آن را روی بهبود پایداری فرکانس سیستم بررسی کرده‌اند. این تحقیق به بررسی یک روش جدید در شبکه قدرت به هم پیوسته، برای بهبود پایداری دینامیکی با استفاده از کنترل اینرسی متغیر در مزارع بادی بزرگ می‌پردازد. در این طرح، اینرسی سیستم به عنوان یک پارامتر بهره‌برداری قابل تنظیم در نظر گرفته شده‌است، که می‌تواند برای کنترل نوسان توان بین ناحیه‌ای و پشتیبانی فرکانس تنظیم شود. بر اساس معادلات حالت خطی به دست آمده از یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای به هم متصل شده، تأثیر اینرسی کنترل شده بر میرایی نوسان توان با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف شبکه‌های دریافت و ارسال توان، به لحاظ نظری ارزیابی شده‌است. استراتژی‌های کنترل اینرسی متغیر توربین بادی مربوطه برای شبکه‌های ناحیه‌ای ارسال و دریافت به منظور بهبود میرایی نوسان توان بین ناحیه‌ای و پایداری فرکانس پیشنهاد شده‌است. یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای به هم پیوسته با نفوذ باد بالای ۳۰ درصد، شبیه‌سازی شده‌است که شامل چهار نیروگاه برق مرسوم و دو مزرعه بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از طرح کنترل پیشنهادی، هر دو پایداری فرکانس و میرایی نوسان بین ناحیه‌ای به طور قابل توجهی به دلیل پشتیبانی اینرسی مؤثرتر در سیستم قدرت به هم پیوسته بهبود یافته‌است.

در ادامه هدف دیگر این تحقیق، پیشنهاد یک جبران‌کننده سنکرون استاتیکی و طراحی یک کنترل‌کننده میرایی نوسان توان است، که با استفاده از روش جبران فاز برای میرا کردن نوسانات سیستم قدرت دو ناحیه‌ای مورد مطالعه طراحی شده‌است. از نتایج می‌توان نتیجه گرفت که STATCOM پیشنهادی با کنترل‌کننده میرایی نوسان توان طراحی شده، قادر به بهبود پایداری سیستم مورد مطالعه متصل به مزارع بادی است. از PSAT برای تحلیل سیستم قدرت استفاده، و شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم افزار MATLAB/SIMULINK انجام شده‌است.

کلمات کلیدی: توربین بادی، اینرسی مجازی متغیر، پایداری فرکانس، نوسان توان بین ناحیه‌ای، کنترل کننده میرایی نوسان توان (PODC)، جبران‌کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM)

۱	فصل اول: مقدمه و کلیات
۱	۱-۱- مقدمه
۴	۲-۱- اهمیت موضوع
۵	۳-۱- اهداف تحقیق
۵	۴-۱- ساختار پایان نامه
۷	فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع
۷	۱-۲- مقدمه
۷	۲-۲- پایداری در سیستم های قدرت
۹	۱-۲-۲- پایداری زاویه روتور
۹	۲-۲-۲- پایداری فرکانس
۹	۳-۲-۲- پایداری ولتاژ
۱۰	۳-۲- مبانی و چالش های سیستم های اینرسی پایین
۱۱	۴-۲- مقیاس های زمانی کنترل فرکانس در سیستم های متداول
۱۲	۵-۲- مقیاس زمانی کنترل فرکانس CIG
۱۳	۶-۲- توربین های بادی
۱۶	۷-۲- کنترل اینرسی مجازی
۱۷	۸-۲- برخی از روش های کنترل اینرسی مجازی در توربین های بادی سرعت متغیر
۱۷	۱-۸-۲- شبیه سازی اینرسی (کنترل اینرسی مجازی مرسوم)
۲۰	۲-۸-۲- ذخیره ی توان سریع
۲۳	۳-۸-۲- کنترل اینرسی مجازی مبتنی بر ردیابی توان بهینه

۲۴.....	۲-۸-۴- کنترل اینرسی مجازی مبتنی بر الگوریتم کنترل پیشرفته
۲۶.....	۲-۸-۵- ماشین سنکرون مجازی
۲۸.....	۲-۹- نتیجه گیری
۲۹.....	فصل سوم: اثر اینرسی متغیر توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG بر پایداری
۲۹.....	۳-۱- مقدمه
۲۹.....	۳-۲- طرح کنترل اینرسی مجازی ثابت در تحقیقات قبلی
۳۴.....	۳-۳- تحلیل مشخصه‌های نوسان توان با اینرسی‌های متغیر
۳۹.....	۳-۴- کنترل یکپارچه‌ی اینرسی متغیر و میرایی نوسان
۴۳.....	۳-۵- مطالعات شبیه‌سازی و نتایج
۴۳.....	۳-۵-۱- سیستم مورد مطالعه
۴۴.....	۳-۵-۲- پاسخ‌های اینرسی متعاقب خطای اتصال کوتاه
۵۲.....	۳-۶- نتیجه گیری
	فصل چهارم: بهبود پایداری سیستم متصل به توربین‌های بادی با استفاده از
۵۳.....	STATCOM و کنترل‌کننده‌ی میرایی نوسان توان
۵۳.....	۴-۱- مقدمه
۵۵.....	۴-۲- سیستم مورد مطالعه و مدل STATCOM
۵۵.....	۴-۲-۱- مدل STATCOM
۵۷.....	۴-۳- طراحی کنترل‌کننده‌ی میرایی نوسان توان برای STATCOM پیشنهادی
۶۱.....	۴-۴- نتایج شبیه‌سازی
۶۴.....	۴-۵- نتیجه گیری
۶۵.....	فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادها
۶۵.....	۵-۱- جمع‌بندی
۶۶.....	۵-۲- پیشنهادها



فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

جدول ۳-۱: طرح کنترل یکپارچه‌ی اینرسی متغیر.....	۴۲
جدول ۴-۱: مقادیر ویژه سیستم مورد مطالعه بدون PODC.....	۵۹



فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: پیشینه‌ی ROCOF شبکه برای دو نوع از منابع انرژی تجدیدپذیر برای بار ۳/۸ مگاوات
۲.....
- شکل ۲-۱: انحراف فرکانس برای دو ثابت اینرسی مختلف ۳
- شکل ۱-۲: دسته‌بندی انواع پایداری در سیستم قدرت ۸
- شکل ۲-۲: مقیاس‌های زمانی معمول دینامیک مربوط به فرکانس در سیستم‌های قدرت مرسوم و همچنین مقیاس زمانی معمول کنترل فرکانس که می‌تواند از طریق CIG فراهم شود ۱۲
- شکل ۳-۲: ساختمان توربین بادی با ژنراتور القایی قفس سنجابی ۱۴
- شکل ۴-۲: ساختمان توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه ۱۴
- شکل ۵-۲: ساختمان توربین بادی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ۱۵
- شکل ۶-۲: مشخصه‌های سرعت چرخش و توان در زاویه گام $\beta = 0$ ۱۶
- شکل ۷-۲: شبیه‌سازی اینرسی برای توربین‌های بادی سرعت متغیر ۱۸
- شکل ۸-۲: تقاضای گشتاور به دلیل پاسخ اینرسی ۱۹
- شکل ۹-۲: حلقه‌های کنترل تکمیلی برای پاسخ اینرسی ۲۰
- شکل ۱۰-۲: کنترل‌کننده‌ی ذخیره توان سریع برای یک توربین بادی ۲۱
- شکل ۱۱-۲: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده‌ی ذخیره توان سریع ۲۲
- شکل ۱۲-۲: مشخصه‌های توان برای کنترل ذخیره توان سریع ۲۳
- شکل ۱۳-۲: بلوک دیاگرام برای تغییر منحنی‌های ردیابی توان ۲۴
- شکل ۱۴-۲: بلوک دیاگرام برای تنظیم پارامتر کنترل‌کننده مبتنی بر ADP ۲۵
- شکل ۱۵-۲: انتخاب ضریب کنترل ۲۵
- شکل ۱۶-۲: کنترل سنکرون مجازی ۲۷

- شکل ۲-۱۷: کنترل سنکرون سازی توان ۲۸
- شکل ۳-۱: دیاگرام ساختار سیستم کنترل DFIG (الف) ساختار کنترل کلی (ب) منحنی MPPT (ج) ساختار کنترل توان اکتیو ۳۲
- شکل ۳-۲: بلوک دیاگرام سیستم تولید دوناحیه‌ای (الف) پیکربندی عمومی (ب) مدار معادل ۳۴
- شکل ۳-۳: اصل کنترل اینرسی متغیر توربین‌های بادی سرعت متغیر (الف) چهار مرحله نوسان $\Delta\omega_{12}$ بدون میرایی سیستم (ب) نمودار ساختار کنترل کننده‌ی اینرسی متغیر ۴۱
- شکل ۳-۴: سیستم مورد مطالعه ۴۴
- شکل ۳-۵: فرکانس سیستم بعد از خطای اتصال کوتاه تحت کنترل اینرسی مجازی $DFIG_1$ ۴۶
- شکل ۳-۶: (الف) توان اکتیو $DFIG_1$ (ب) توان اکتیو $DFIG_2$ ۴۶
- شکل ۳-۷: (الف) توان اکتیو G_1 (ب) توان اکتیو G_2 (ج) توان اکتیو G_3 ۴۷
- شکل ۳-۸: زاویه توان بین G_1 و G_3 ۴۸
- شکل ۳-۹: توان اکتیو عبوری از ناحیه‌ی یک به ناحیه‌ی دو ۴۸
- شکل ۳-۱۰: ولتاژ باس B_8 ۴۸
- شکل ۳-۱۱: انحراف فرکانس زاویه‌ای بین G_1 و G_3 ۴۹
- شکل ۳-۱۲: اینرسی مجازی $DFIG$ ها ۴۹
- شکل ۳-۱۳: پاسخ‌های دینامیکی سیستم بعد از خطای اتصال کوتاه تحت کنترل اینرسی مجازی $DFIG_2$ (الف) فرکانس سیستم (ب) زاویه توان (ج) توان اکتیو خط (د) ولتاژ باس B_8 (ه) توان اکتیو G_1 (و) توان اکتیو G_3 ۵۱
- شکل ۴-۱: سیستم مورد مطالعه با STATCOM پیشنهادی ۵۵
- شکل ۴-۲: ساختار PODC پیشنهادی ۵۷
- شکل ۴-۳: نمودار نایکوئیست سیستم مورد مطالعه ۶۰
- شکل ۴-۴: مد بحرانی در مکان هندسی ریشه‌ها ۶۱

شکل ۴-۵: پاسخ‌های دینامیکی سیستم تحت یک خطای اتصال کوتاه (الف) توان اکتیو G_1 (ب) توان اکتیو G_2 (ج) توان اکتیو G_3 (د) انحراف فرکانس زاویه‌ای بین G_1 و G_3 (ه) زاویه توان (و) توان اکتیو خط (ز) ولتاژ باس B_8 ۶۴



فصل اول

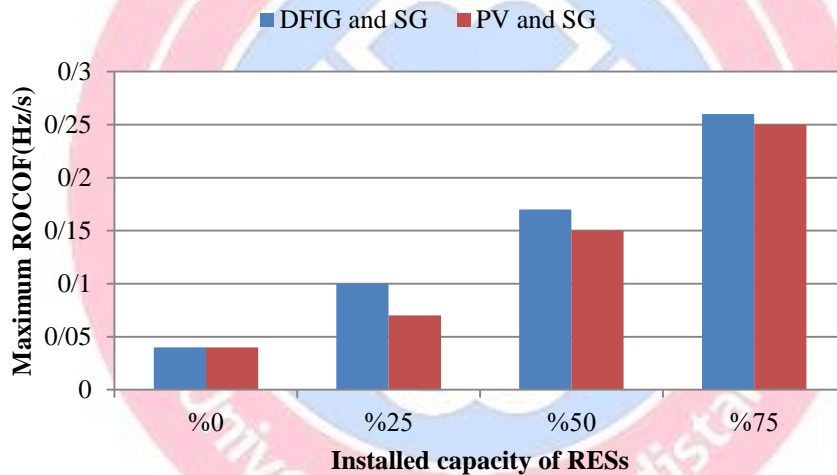
مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تولید آلاینده‌ها نظیر کربن دی‌اکسید، اکسیدنیترژن و گوگرد دی‌اکسید توسط نیروگاه‌های سوخت فسیلی باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی جدی شده‌اند. باران اسیدی و گرم شدن کره‌ی زمین به عنوان عامل اصلی آلودگی محیط زیست شناخته می‌شود. در ایالات متحده، نیروگاه‌های سوخت فسیلی حدود ۲/۲ میلیارد تن دی‌اکسیدکربن سالانه منتشر می‌کنند. این مشکلات دولت‌ها و سایر نهادها را در سراسر جهان مجبور کرده‌است تا اهداف خود را در افزایش کاربرد منابع انرژی تجدیدپذیر در تولید توان الکتریکی تعیین کنند. به عنوان مثال، چین هدفی را برای تولید بیش از ۱۵ درصد کل توان خود از انرژی تجدیدپذیر تا سه سال آینده با ۴۲۰ گیگاوات انرژی آبی، ۵۰ گیگاوات انرژی بادی و ۳۰ گیگاوات از زیست توده تعیین کرده است. این طرح‌ها برای پرداختن به افزایش عظیم تقاضای انرژی جهانی و در عین حال کاهش همزمان میزان آلاینده‌ها حیاتی هستند [۱].

به‌طورکلی، منابع انرژی تجدیدپذیر تلفیق شده در یک سیستم قدرت، وابستگی به سوخت فسیلی را کاهش داده، پروفیل ولتاژ را بهبود بخشیده و قابلیت اطمینان سیستم قدرت را افزایش می‌دهد [۲-۵]. با این حال، نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند منجر به چالش‌های پایداری فرکانس بحرانی شود [۶]. اولاً، این منابع معمولاً پاسخ‌های اینرسی کمی دارند و یا اینرسی ندارند [۷]. به عنوان مثال، توربین‌های بادی سرعت متغیر معمولاً توسط مبدل الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند، که اینرسی توربین بادی را برای کاهش حالت‌های گذرای سیستم جدا می‌کند.

علاوه بر این، نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی هیچ پاسخ اینرسی را برای سیستم قدرت فراهم نمی‌کنند. بنابراین جایگزینی منابع مرسوم با منابع انرژی تجدیدپذیر باعث کاهش اینرسی کل سیستم قدرت خواهد شد. مراجع [۸] و [۹] هر دو پیش‌بینی می‌کنند که افزایش تعداد این منابع در بریتانیا می‌تواند ثابت اینرسی را تا ۷۰ درصد بین سال‌های ۲۰۱۳/۱۴ و ۲۰۳۳/۳۴ کاهش دهد. به دلیل این کاهش اینرسی، نرخ تغییر فرکانس^۱ (ROCOF) سیستم قدرت به اندازه کافی بالا خواهد بود تا کنترل‌کننده‌ی حذف بار، حتی در مقادیر کوچکی از عدم تعادل، فعال شود. در مرجع [۱۰]، سطوح مختلف نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر با یک ژنراتور سنکرون (SG) برای پوشش دادن تقاضای بار ۳/۸ مگاوات مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که در مرجع [۱۰] گزارش شده و در شکل ۱-۱ نشان داده شده‌است، با افزایش درصد ظرفیت نصب شده این منابع، ROCOF سیستم قدرت افزایش می‌یابد.

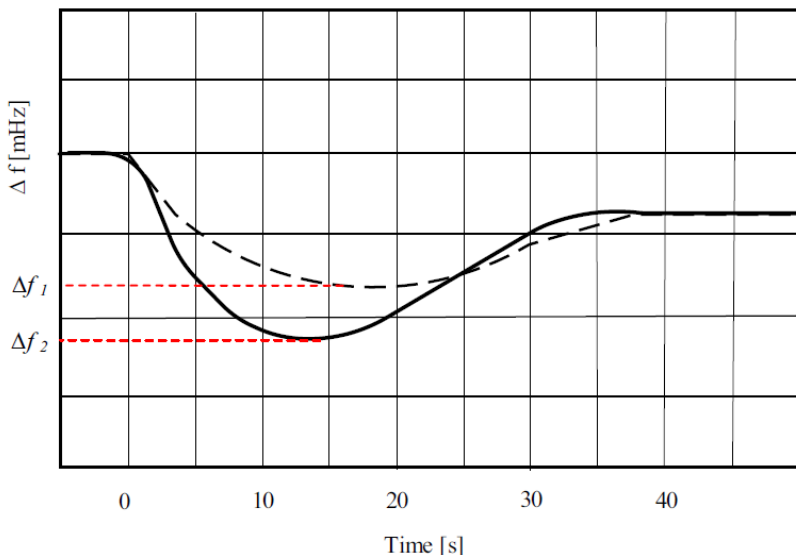


شکل ۱-۱: بیشینه‌ی ROCOF شبکه برای دو نوع از منابع انرژی تجدیدپذیر برای بار ۳/۸ مگاوات [۱۰]

ثانیاً، افزایش سطح نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر تعداد واحدهای تولید را که توان ذخیره برای کنترل اولیه و ثانویه را تأمین می‌کنند، کاهش می‌دهد. به همین دلیل، انحراف فرکانس افزایش خواهد یافت، همان‌طور که در مرجع [۱۱] گزارش شده و در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌است.

^۱ Rate of change of frequency

--- $H=6s$, — $H=3s$



شکل ۱-۲: انحراف فرکانس برای دو ثابت اینرسی مختلف [۱۱]

برای غلبه بر چالش‌های پایداری فرکانس نشان داده شده توسط توان ذخیره و پاسخ اینرسی کوچک، منابع انرژی تجدیدپذیر باید تکنیک‌های کنترل فرکانس جدیدی ایجاد کنند تا به آنها اجازه دهد در عملیات‌های تنظیم فرکانس شرکت کنند.

عموماً اینرسی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند زیرا حساسیت تغییرات فرکانس سیستم را برای عدم تعادل عرضه - تقاضا تعیین می‌کند [۱۲]. همان‌طور که در مرجع [۱۳] توضیح داده شده است، سیستم با اینرسی بیشتر می‌تواند پشتیبانی بیشتری را برای کاهش انحراف فرکانس فراهم کند. با این حال شایان ذکر است که اینرسی همچنین تأثیر قابل توجهی در مشخصه‌های نوسان توان بین ناحیه ای دارد [۱۴]. همان‌طور که میرایی نوسانات توان با اینرسی سیستم ارتباط نزدیکی دارد، تأثیر پشتیبانی اینرسی از مزارع بادی متصل، روی میرایی نوسان در شبکه‌ی قدرت باید مورد بررسی قرار گیرد.

بنابراین با افزایش نفوذ توان نیروگاه‌های بادی، اینرسی سیستم قدرت کاهش یافته و این موضوع تأثیر مستقیمی بر جنبه‌های مختلف عملکرد دینامیک سیستم به خصوص پاسخ فرکانسی و نوسان توان بین ناحیه‌ای دارد. برای پرداختن به این مسئله، انواع زیادی از طرح‌های کنترل اینرسی مجازی برای پیاده‌سازی در توربین‌های بادی سرعت متغیر پیشنهاد شده است و تأثیر آنها در بهبود پایداری فرکانس سیستم و پایداری سیگنال کوچک مورد بررسی قرار گرفته است.

شبکه ارسال، افزایش اینرسی به وسیله‌ی کنترل‌کننده‌های اینرسی ثابت ممکن است
میرایی منفی برای شبکه تولید کند.

✓ در شبکه ناحیه‌ای ارسال، یک طرح کنترل اینرسی متغیر در این پایان‌نامه پیشنهاد شده
است که اینرسی مجازی را براساس چهار مرحله نوسان انحراف فرکانس زاویه‌ای بین دو
ناحیه تنظیم می‌کند. اینرسی متغیر می‌تواند انرژی نوسان سیستم E_t را در طول نوسان
توان کاهش دهد، که یک میرایی مثبت برای شبکه را تضمین می‌کند. بنابراین، دو شبکه
ناحیه‌ای با طرح کنترل اینرسی مربوطه می‌تواند پاسخ اینرسی و میرایی نوسان را برای
بهبود پایداری شبکه قدرت به هم پیوسته هماهنگ کند.

✓ یک کنترل‌کننده میرایی نوسان توان پیش فاز - پس فاز با استفاده از روش جبران فاز
طراحی شده است. از نتایج مشاهده شده است که STATCOM با PODC به میرایی بهتر
و کاهش دامنه نوسانات کمک می‌کند.

۵-۲- پیشنهادها

تحقیقات در زمینه کنترل اینرسی مجازی توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است چرا که
مزارع بادی بیشتری در سیستم‌های قدرت عمده ادغام می‌شوند. با این حال، هنوز جنبه‌های
تحقیقاتی قابل توجهی برای کامل کردن کنترل اینرسی مجازی مزارع بادی متصل به شبکه وجود
دارد. برخی از موضوعات مهم برای کارهای آینده در نظر گرفته شده است.

(۱) هماهنگی با واحدهای دیگر و حلقه‌های کنترلی

پایداری فرکانسی سیستم قدرت می‌تواند به طور مؤثری با هماهنگی تبادل انرژی بین مزارع
بادی با کنترل اینرسی مجازی و سایر واحدها، مانند ادوات ذخیره‌سازی انرژی، سیستم انتقال ac
انعطاف پذیر (FACTS)، و سیستم‌های انتقال توان جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC) بهبود یابد.
علاوه بر این، روش کنترل اینرسی مجازی نیز می‌تواند به سیستم کنترل مبدل این واحدها برای
مشارکت در تنظیم فرکانس متصل شود. علاوه بر این، پاسخ اینرسی مزارع بادی به طور ذاتی
متفاوت از ویژگی‌های ماشین‌های سنکرون متداول است. از این رو، مطالعات بیشتری برای تعیین
زمان‌بندی بهینه تخلیه انرژی جنبشی ذخیره‌شده و پروفیل بهینه تبادل توان در هماهنگی با
ژنراتورهای معمولی مورد نیاز است.

به دلیل خود سیستم کنترل توربین‌های بادی، در شرایط بهره‌برداری مختلف، هم کنترل سرعت و هم کنترل گام، از نظر کاربرد واقعی، محدودیت‌هایی دارند. به منظور استفاده بالقوه از قابلیت تنظیم فرکانس توربین‌های بادی، یک استراتژی هماهنگی را باید برای هماهنگ کردن کنترل اینرسی مجازی، کنترل سرعت بیش از حد و گام^۱، پیشنهاد کرد.

(۲) تاثیر شرایط بهره‌برداری بر کنترل اینرسی مجازی

هنگامی که مزارع بادی با استفاده از کنترل اینرسی مجازی در تنظیم فرکانس شرکت می‌کنند، عملکرد کنترل تحت‌تأثیر شرایط بهره‌برداری مختلف، مانند بارگذاری اولیه، رتبه‌بندی مبدل‌های توربین^۲، سطح نفوذ توان باد، تغییرپذیری باد و خطاهای پیش‌بینی و غیره قرار می‌گیرد. بنابراین برای به دست آوردن درک جامع‌تری از تأثیر کنترل اینرسی مجازی، کارهای آینده باید این شرایط بهره‌برداری مختلف را در هنگام ارزیابی پتانسیل و عملکرد مزارع بادی به منظور بررسی بهتر محدودیت پاسخ اینرسی در نظر بگیرند.

(۳) هماهنگی کنترل اینرسی مجازی و پایدارساز سیستم قدرت

ادغام کنترل اینرسی مجازی در سیستم کنترلی مزرعه بادی متصل به شبکه مدهای نوسانی جدید را برانگیخته خواهد کرد. بنابراین برای بهبود عملکرد دینامیکی سیستم قدرت، مهم و ضروری است که یک مکانیسم هماهنگی کنترل اینرسی مجازی و پایدارساز سیستم قدرت ایجاد شود.

(۴) تأثیر توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG با کنترل اینرسی مجازی (ثابت یا متغیر) بر پایداری، با در نظر گرفتن اثرات PLL بررسی و ارتباط بین PLL و اینرسی مجازی در طراحی پارامترهای PLL (پارامترهای PI) در نظر گرفته شود.

¹ over speed and pitch controls

² ratings of the converters of the turbine

- [1] M. Dreidy, H. Mokhlis, and S. Mekhilef, "Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 69, pp. 144-155, 2017.
- [2] M. Mahzarnia, A. Sheikholeslami, and J. Adabi, "A voltage stabilizer for a microgrid system with two types of distributed generation resources," *IJUM Engineering Journal*, vol. 14, no. 2, 2013.
- [3] C.-L. Su, "Effects of distribution system operations on voltage profiles in distribution grids connected wind power generation," in *2006 International Conference on Power System Technology*, 2006: IEEE, pp. 1-7.
- [4] O. Ausavanop and S. Chaitusaney, "Coordination of dispatchable distributed generation and voltage control devices for improving voltage profile by Tabu Search," in *The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011*, 2011: IEEE, pp. 869-872.
- [5] A. Sekhar and K. V. Krishna, "Improvement of voltage profile of the hybrid power system connected to the grid," *Int J Eng Res Appl*, vol. 2, pp. 87-93, 2012.
- [6] H. Bevrani, A. Ghosh, and G. Ledwich, "Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 5, pp. 438-457, 2010.
- [7] K. Dehghanpour and S. Afsharnia, "Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: a review on technical aspects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1267-1276, 2015.
- [8] *Electricity Ten Year Statement (ETYS)*. Available online at <http://www2.nationalgrid.com/UK/Industry-information/Future-of-Energy/Electricity-ten-year-statement/>; 2014 [accessed 11.05.15].
- [9] *UK Future Energy Scenarios*. Available online at <http://www2.nationalgrid.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?Id=10451>; 2013 [accessed 11.05.15].
- [10] A. Jayawardena, L. Meegahapola, S. Perera, and D. Robinson, "Dynamic characteristics of a hybrid microgrid with inverter and non-inverter interfaced renewable energy sources: A case study," in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2012: IEEE, pp. 1-6.
- [11] A. Ulbig, T. S. Borsche, and G. Andersson, "Impact of low rotational inertia on power system stability and operation," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, no. 3, pp. 7290-7297, 2014.
- [12] M. Kayikçi and J. V. Milanovic, "Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 859-867, 2009.

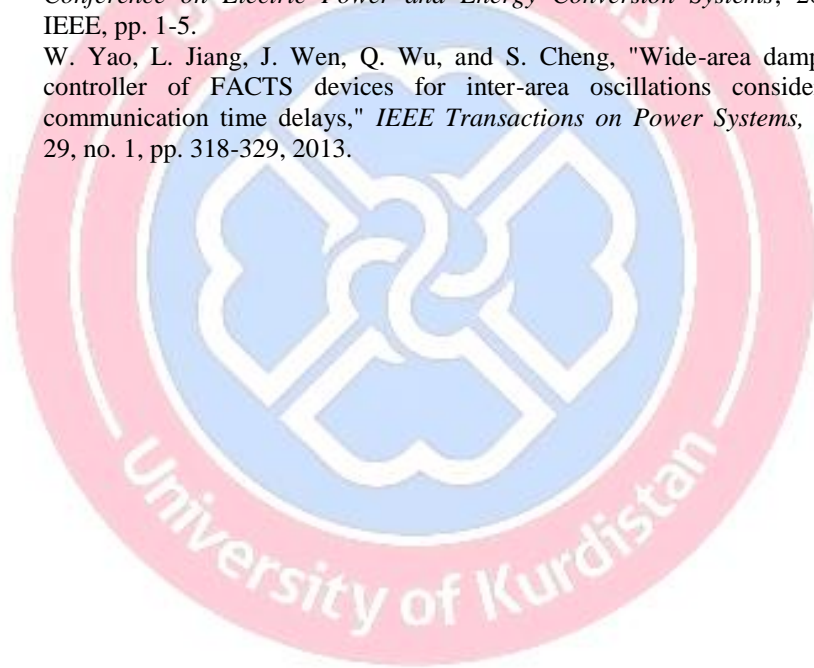
- [13] D. Gautam, L. Goel, R. Ayyanar, V. Vittal, and T. Harbour, "Control strategy to mitigate the impact of reduced inertia due to doubly fed induction generators on large power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 214-224, 2010.
- [14] X. Xi, H. Geng, and G. Yang, "Small signal stability of weak power system integrated with inertia tuned large scale wind farm," in *2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*, 2014: IEEE, pp. 514-518.
- [15] J. Morren, S. W. De Haan, W. L. Kling, and J. Ferreira, "Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 1, pp. 433-434, 2006.
- [16] L. Holdsworth, J. B. Ekanayake, and N. Jenkins, "Power system frequency response from fixed speed and doubly fed induction generator-based wind turbines," *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 21-35, 2004.
- [17] Z.-S. Zhang, Y.-Z. Sun, J. Lin, and G.-J. Li, "Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants," *IET Renewable Power Generation*, vol. 6, no. 1, pp. 38-47, 2012.
- [18] X. Yingcheng and T. Nengling, "System frequency regulation in doubly fed induction generators," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 977-983, 2012.
- [19] C. Xiangyi, L. Chunyan, and W. Yunli, "Analysis of the inter-area low frequency oscillations in large scale power systems," in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011: IEEE, pp. 1627-1631.
- [20] Z. Miao, L. Fan, D. Osborn, and S. Yuvarajan, "Wind farms with HVdc delivery in inertial response and primary frequency control," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 4, pp. 1171-1178, 2010.
- [21] S. Lamichhane and N. Mithulananthan, "Influence of wind energy integration on low frequency oscillatory instability of power system," in *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2014: IEEE, pp. 1-5.
- [22] G. Tsourakis, B. M. Nomikos, and C. D. Vournas, "Contribution of doubly fed wind generators to oscillation damping," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 783-791, 2009.
- [23] J. M. Mauricio, A. Marano, A. Gómez-Expósito, and J. L. M. Ramos, "Frequency regulation contribution through variable-speed wind energy conversion systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 173-180, 2009.
- [24] D. F. Gayme and A. Chakraborty, "Impact of wind farm placement on inter-area oscillations in large power systems," in *2012 American Control Conference (ACC)*, 2012: IEEE, pp. 3038-3043.
- [25] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-hill New York, 1994.
- [26] P. Kundur *et al.*, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *IEEE transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, 2004.

- [27] F. Milano, F. Dörfler, G. Hug, D. J. Hill, and G. Verbič, "Foundations and challenges of low-inertia systems," in *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2018: IEEE, pp. 1-25.
- [28] M. R. Patel, "Wind and solar power systems," ed, 2009.
- [29] M. T. Lamchich and N. Lachguer, "Matlab Simulink as simulation tool for wind generation systems based on doubly fed induction machines," *Edited by Vasilios N. Katsikis*, p. 139, 2012.
- [30] H. Knudsen, J. N. Nielsen, and T. Ackermann, "Introduction to the modeling of wind turbines," in *Wind power in power systems*: Wiley Online Library, 2005, pp. 525-585.
- [31] F. M. Gonzalez-Longatt, "Effects of the synthetic inertia from wind power on the total system inertia: simulation study," in *2012 2nd International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications*, 2012: IEEE, pp. 389-395.
- [32] Y.-z. Sun, Z.-s. Zhang, G.-j. Li, and J. Lin, "Review on frequency control of power systems with wind power penetration," in *2010 international conference on power system technology*, 2010: IEEE, pp. 1-8.
- [33] J. Ekanayake and N. Jenkins, "Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency," *IEEE Transactions on Energy conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 800-802, 2004.
- [34] F. Gonzalez-Longatt, E. Chikuni, and E. Rashayi, "Effects of the synthetic inertia from wind power on the total system inertia after a frequency disturbance," in *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2013: IEEE, pp. 826-832.
- [35] J. Morren, J. Pierik, and S. W. De Haan, "Inertial response of variable speed wind turbines," *Electric power systems research*, vol. 76, no. 11, pp. 980-987, 2006.
- [36] L. Wu and D. G. Infield, "Towards an assessment of power system frequency support from wind plant—Modeling aggregate inertial response," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2283-2291, 2013.
- [37] F. Díaz-González, M. Hau, A. Sumper, and O. Gomis-Bellmunt, "Participation of wind power plants in system frequency control: Review of grid code requirements and control methods," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 551-564, 2014.
- [38] Z. Zhang, Y. Wang, H. Li, and X. Su, "Comparison of inertia control methods for DFIG-based wind turbines," in *2013 IEEE ECCE Asia Downunder*, 2013: IEEE, pp. 960-964.
- [39] S. Wachtel and A. Beekmann, "Contribution of wind energy converters with inertia emulation to frequency control and frequency stability in power systems," in *8th international workshop on large-scale integration of wind power into power systems as well as on transmission networks for offshore wind farms, Bremen, Germany*, 2009, vol. 113.
- [40] N. R. Ullah, T. Thiringer, and D. Karlsson, "Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines—Potential and applications," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 601-612, 2008.

- [41] A. D. Hansen, M. Altin, I. D. Margaritis, F. Iov, and G. C. Tarnowski, "Analysis of the short-term overproduction capability of variable speed wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 326-336, 2014.
- [42] S. El Itani, U. D. Annakkage, and G. Joos, "Short-term frequency support utilizing inertial response of DFIG wind turbines," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011: IEEE, pp. 1-8.
- [43] P.-K. Keung, P. Li, H. Banakar, and B. T. Ooi, "Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency support," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 279-287, 2008.
- [44] X. Zhu, Y. Wang, L. Xu, X. Zhang, and H. Li, "Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines for dynamic grid frequency support," 2011.
- [45] Y. Wang, J. Meng, X. Zhang, and L. Xu, "Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 565-574, 2015.
- [46] W. Guo, F. Liu, J. Si, and S. Mei, "Incorporating approximate dynamic programming-based parameter tuning into PD-type virtual inertia control of DFIGs," in *The 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2013: IEEE, pp. 1-8.
- [47] W. Guo, F. Liu, J. Si, and S. Mei, "Online adaptation of controller parameters based on approximate dynamic programming," in *2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2014: IEEE, pp. 256-262.
- [48] Q. Shi, G. Wang, Y. Chen, L. Fu, W. Jiang, and H. Huang, "Frequency response control of D-PMSG based on the active disturbance rejection controller," in *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014: IEEE, pp. 1379-1384.
- [49] S. Wang, J. Hu, and X. Yuan, "Virtual synchronous control for grid-connected DFIG-based wind turbines," *IEEE Journal of Emerging and selected topics in power electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 932-944, 2015.
- [50] L. Zhang, L. Harnefors, and H.-P. Nee, "Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters," *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 25, no. 2, pp. 809-820, 2009.
- [51] X. Zhang, Y. Fu, S. Wang, and Y. Wang, "Effects of two-area variable inertia on transient stabilisation in interconnected power system with DFIG-based wind turbines," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 5, pp. 696-706, 2017.
- [52] P. W. Sauer, S. Ahmed-Zaid, and P. Kokotovic, "An integral manifold approach to reduced order dynamic modeling of synchronous machines," *IEEE transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 17-23, 1988.
- [53] P. V. Kokotovic and P. W. Sauer, "Integral manifold as a tool for reduced-order modeling of nonlinear systems: A synchronous machine case study," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 403-410, 1989.
- [54] H. Li *et al.*, "Damping control strategies of inter-area low-frequency oscillation for DFIG-based wind farms integrated into a power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 61, pp. 279-287, 2014.
- [55] A. Rajeev and M. Nandakumar, "Mitigation of Low Frequency Oscillations in Two Area System Using STATCOM with PODC," in *2018*

International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4), 2018: IEEE, pp. 1-5.

- [56] L. Wang, C. H. Chang, B. L. Kuan, and A. V. Prokhorov, "Stability Improvement of a Two-Area Power System Connected with an Integrated Onshore and Offshore Wind Farm Using a STATCOM," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 867-877, 2017.
- [57] H. Ayres, I. Kopcak, M. Castro, F. Milano, and V. Da Costa, "A didactic procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, no. 6, pp. 896-909, 2010.
- [58] B. Pokharel and W. Gao, "Mitigation of disturbances in DFIG-based wind farm connected to weak distribution system using STATCOM," in *North American Power Symposium 2010*, 2010: IEEE, pp. 1-7.
- [59] G. Cakir and G. Radman, "Placement and performance analysis of STATCOM and SVC for damping oscillation," in *2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, 2013: IEEE, pp. 1-5.
- [60] W. Yao, L. Jiang, J. Wen, Q. Wu, and S. Cheng, "Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 318-329, 2013.



Abstract

The electric power system is currently undergoing a period of unprecedented changes. Environmental concerns lead to replacement of a significant share of conventional fossil fuel-based power plants with renewable energy resources. New power systems have small inertia constant due to the decoupling of the renewable source from the AC grid using power electronics converters. Therefore, increasing the penetration level of wind turbines in the network, has affected the dynamic stability of power systems. It is necessary for grid-connected wind farms to provide ancillary services, such as active power control, frequency regulation and damping control. Currently, many papers have studied the virtual inertia control and its effects on improving the stability of system frequency. This research investigates a novel method of the interconnected power grid to improve dynamic stability using variable inertia control of large wind farms. In this scheme, the system inertia is considered as an adjustable operating parameters which can be regulated for inter-area power oscillation control and frequency support. Based on the linear state equations derived from a two-area interconnected power system, the effect of the controlled inertia on power oscillation damping is evaluated theoretically considering the different cases of power feeding and receiving networks. The respective wind turbine variable inertia control strategies for the feeding and receiving regional networks are proposed to enhance both inter-area power oscillation damping and frequency stability. A typical two-area interconnected power system with a high 30% wind penetration is simulated, which consist of four conventional power plants and two doubly fed induction generator (DFIG)-based wind farms. The results demonstrate that by using the proposed control scheme, the frequency stability and the inter-area oscillation damping are both significantly improved for the more effective inertia support in the interconnected power system.

The other purpose of this research is to propose a static synchronous compensator and design a power-oscillation damping controller, which is designed by using phase-compensation method to damp out oscillations of the studied two-area power system. It can be concluded from the results that proposed STATCOM with the designed PODC is capable of improving stability of the studied two-area power system connected with wind farms. PSAT is used for power system analysis and simulations are performed in MATLAB/SIMULINK software environment.

Keywords: Wind turbine, variable virtual inertia, frequency stability, inter-area power oscillation, power-oscillation damping controller (PODC), static synchronous compensator (STATCOM)



University of Kurdistan
Faculty of Engineering
Department of Electrical Engineering

A Thesis
Submitted to the Postgraduate Studies Office in Partial Fulfillment of
the Requirements for the Degree of M.Sc. in Electrical Engineering

Title:
**Virtual inertia control for improving of power systems
stability in the presence of wind energy**

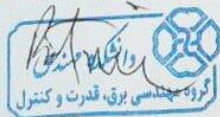
By:
Salar Hasaneh

The above thesis was evaluated and approved by the following members of
the thesis committee with quality on September 19, 2020.
average

<u>Position</u>	<u>Title and Name</u>	<u>Signature</u>
1. Supervisor:	Assist. Prof. Dr. Rahmatollah Mirzaei	<i>R. Mirzaei</i>
2. Advisor:	Assoc. Prof. Dr. Ali Hesami Naghshbandy	<i>ahs</i>
3. Internal Examiner:	Assist. Prof. Dr. Mehrdad Gholami	<i>Mehrdad</i>
4. Internal Examiner:	Assist. Prof. Dr. Navid Rezaei	<i>N. Rezaei</i>

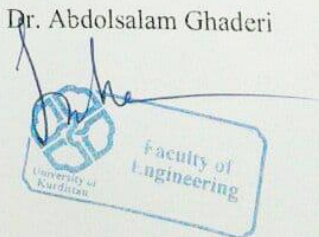
Head of Department:

Dr. Yazdan Batmani



Faculty Graduate Coordinator:

Dr. Abdolsalam Ghaderi





University of Kurdistan
Faculty of Engineering
Department of Electrical Engineering

A Thesis
Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
M.Sc. in Electrical Engineering

Title:
**Virtual inertia control for improving of power systems
stability in the presence of wind energy**

By:
Salar Hasaneh

Supervisor:
Dr. Rahmatollah Mirzaei

Advisor:
Dr. Ali Hesami Naghshbandy

September, 2020



University of Kurdistan
Faculty of Engineering
Department of Electrical Engineering

A Thesis
Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
M.Sc. in Electrical Engineering

Title:
**Virtual inertia control for improving of power systems
stability in the presence of wind energy**

By:
Salar Hasaneh

Supervisor:
Dr. Rahmatollah Mirzaei

Advisor:
Dr. Ali Hesami Naghshbandy

September, 2020