

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق گرایش قدرت

بهبود کیفیت توان با کنترل لغزشی ژنراتور القایی دو سو تغذیه در شبکه با
ولتاژ نامتعادل و هارمونیکی

اساتید راهنما:

دکتر سعید اباذری

دکتر سعید حقوقی

استاد مشاور:

دکتر صمد تقی پور بروجنی

پژوهشگر:

سجاد فرج زاده دهکردی

زمستان ۱۳۹۲

پایان نامه سجاد فرج زاده دهکردی جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق گرایش قدرت با عنوان: "بهبود کیفیت توان با کنترل مد لغزشی ژنراتور القایی دو سو تغذیه در شبکه با ولتاژ نامتعادل و هارمونیک‌ی" در تاریخ / / با حضور هیئت داوران زیر بررسی و با نمره مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. استاد راهنمای پایان نامه دکتر سعید ابادری با مرتبه علمی استادیار امضا

۲. استاد راهنمای پایان نامه دکتر سعید حقوقی با مرتبه علمی استادیار امضا

۳. استاد مشاور پایان نامه دکتر صمد تقی پور بروجنی با مرتبه علمی استادیار امضا

۴. استاد داور گروه دکتر غلامرضا عرب مارکده با مرتبه علمی دانشیار امضا

۵. استاد داور گروه دکتر نوید رضا ابجدی با مرتبه علمی استادیار امضا

دکتر قاسمی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی

دانشکده فنی و مهندسی

کلیه‌ی حقوق مادی مرتبط بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این
پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

به نام او

پاس او

که شوق آموختن را درونم نهاد.

تقدیم به پدر و مادرم

که همه وجودم و ابدار حیات های بی دریغشان است؛

.

.

.

و

استاید محترم دانشگاه شهر کرد

به پاس راهنمایی های ارزشمندشان

چکیده:

با توجه به کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، گازهای طبیعی و افزایش بهای مصرفی و همچنین آثار سوء زیست‌محیطی آن‌ها، استفاده از انرژی‌های نو به ویژه انرژی باد رو به افزایش است. یکی از پرکاربردترین ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی به دلیل داشتن مزایای ویژه، ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG) است. از آنجا که توربین‌های بادی مجهز به DFIG بیشتر در مناطق روستایی با شبکه‌های محلی ضعیف و خطوط نسبتاً طولانی نصب می‌شوند احتمال وقوع عدم تعادل و اعوجاج هارمونیکی در ولتاژ شبکه به دلیل وجود بارهای غیرخطی، نامتقارن و یا خطاهای شبکه افزایش می‌یابد. وجود نامتعادلی در ولتاژ در صورت عدم کنترل، باعث ایجاد نوسانات با فرکانس دابل در گشتاور الکترومغناطیسی، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه، وارد آمدن تنش‌های مکانیکی به شفت ژنراتور و توربین و موجب ناپایداری شبکه می‌گردد. در صورت عدم کنترل DFIG در شرایط نامتعادل بودن ولتاژ، این ژنراتور در ولتاژهای با نامتعادلی بیش از ۶٪، بالاجبار از شبکه جدا می‌گردد که این مسئله در صنعت تولید توان بادی امروزی قابل پذیرش نیست. تاکنون روش‌های کنترلی متعددی بر روی DFIG متصل به شبکه با ولتاژ نامتعادل به کاررفته است. در روش‌های کنترلی اخیر از کنترل لغزان برای کنترل گشتاور الکترومغناطیسی و توان خروجی سیستم توسط مبدل‌های سمت رتور و شبکه DFIG در شرایط نامتعادل و هارمونیکی بودن ولتاژ شبکه بدون جداسازی توالی‌های مثبت و منفی ولتاژ یا جریان استفاده شده است. این مسئله موجب بهبود عملکرد در مقایسه با سایر روش‌های کنترلی شده است. ولی همچنان به دلیل نامتعادل بودن جریان‌های استاتور و رتور و وجود هارمونیکی‌های مزاحم از جمله هارمونیکی‌های مرتبه دو در توان شبکه و گشتاور الکترومغناطیسی DFIG که ناشی از عدم تعادل ولتاژ است نمی‌تواند در حد قابل قبولی به بهبود کیفیت توان اقدام نماید. همچنین وجود گرمای غیریکنواخت در سیم‌پیچ‌ها، در گذر زمان از عمر تجهیزات عایقی سیستم می‌کاهد. از این لحاظ از یک مبدل اضافی سری با استاتور (SGSC) جهت حذف توالی منفی ولتاژ در ساختمان DFIG استفاده می‌نمایند که توانسته تا حد زیادی کیفیت توان را با حذف مؤلفه‌های هارمونیکی دوم در توان و گشتاور الکترومغناطیسی بهتر نماید. روش‌های کنترلی به کاررفته در استفاده از مبدل سوم بیشتر مبتنی بر استفاده از کنترل‌کننده‌های PI می‌باشند. مشکلات عمده این روش‌ها، تنظیم پارامترهای PI و نیاز به تبدیلات متعدد بین قاب‌های مرجع است که در نتیجه پیاده‌سازی این کنترل‌کننده‌ها را مشکل می‌نماید. در این پایان‌نامه از روش کنترل لغزان جهت کنترل سیستم DFIG به همراه SGSC استفاده شده است که ضمن حذف کنترل‌کننده‌های PI، پیاده‌سازی سیستم را ساده و قابل اجرا نموده است. از دیگر مزایای قابل توجه این تحقیق استفاده از روش ساده و سریعی برای بدست آوردن توالی مثبت و منفی ولتاژ شبکه است.

کلمات کلیدی: ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG)، مبدل سمت رتور (RSC)، مبدل سمت شبکه (GSC)، مبدل سری با شبکه (SGSC)، کنترل لغزان (SMC)، کیفیت توان؛

Abstract:

A decreasing trend in fossil fuel sources and natural gases and the increase in energy prices have heightened the need for renewable energy technology, and wind energy is probably the fastest growing one. Due to its especial advantages, one of the generators used in wind power systems is Doubly Fed Induction Generator (DFIG). Wind farms are mainly located in rural areas where nonlinear, asymmetric loads and grid faults can lead to such more frequently disturbances. As a consequence, unbalanced and harmonic disturbances are inevitable in the wind power systems. If unbalanced voltage is not controlled, it may cause oscillations with doubly frequency in electromagnetic torque, active and reactive powers injected to the grid. Furthermore, the grid stability, as well as the safety of the power electronics and the mechanical part of the wind turbine, are put in jeopardy. As a result, DFIGs without unbalanced voltage control may have to be disconnected from the grid when network voltage unbalance is more than 6%, which could not be accepted in today's wind-energy application. So far, several control methods are investigated for DFIG systems under unbalanced grid voltage conditions. Recently, SMC has been designed for controlling electromagnetic torque and system output power by RSC and GSC under both unbalance and harmonic grid voltages without separating positive and negative sequences of voltage or current. This method has improved performance of DFIG compared with other control methods, but it cannot eliminate stator and rotor current unbalances, electromagnetic torque, and power pulsations which decrease the output power quality. Besides, unequal heating in the stator and rotor windings or in the line reactors still exist, which may degrade the lifetime of the windings or coupled inductors insulation materials. So, recently a new DFIG configuration with an additional grid-side converter in series with the generator's stator windings has been proposed in order to eliminate the negative-sequence voltage and improve the output power quality. The main drawback of these methods is that adjusting PI parameter is cumbersome. In addition, these controllers are less robust against parameter variations, despite their complexity. In this thesis, Applying a suitable Sliding-Mode Controller for a DFIG system with Series Grid-Side Converter (SGSC) leads to the proposed control method implements in the stationary reference frame and the inherent complexity design is removed and robustness with respect to parameter variations is increased. Additionally, another advantage of this method is the control of DC-link voltage using SMC.

Keywords: Doubly Fed Induction Generator (DFIG), Unbalanced Voltage, Rotor-Side Converter (RSC), Grid-Side Converter (GSC), Series Grid-Side Converter (SGSC), Sliding-Mode Control (SMC)



**Shahrekord University
Faculty of Engineering
Department of Electrical Engineering**

The thesis of Mr. Sajad Farajzadeh Dehkordi for obtaining the degree of MSc in electrical engineering field with the title of “Improvement of Power Quality by using Sliding-Mode Control for a DFIG-Based Wind-Power Generation System under Distorted Grid Voltage Conditions” was evaluated with the presence of the following thesis committee and was finally ratified with grade out of .

1. The supervisors of the thesis:

Dr. Saeed Abazari, (Assistant Professor)

signature

Dr. Saeed Houghoughi, (Assistant Professor)

signature

2. The advisor of the thesis:

Dr. Samad Taghipour Boroujeni, (Assistant Professor)

signature

3. The examiners of the thesis:

Dr. Gholamreza Arab Markadeh, (Associate Professor)

signature

Dr. Navid Reza Abjadi, (Assistant Professor)

signature

**Dr. Behzad Ghasemi
Deputy of Research and Postgraduate Studies
Faculty of Engineering**



Shahrekord University
Faculty of Engineering

**Improvement of Power Quality by using Sliding-Mode Control for a
DFIG-Based Wind-Power Generation System under Distorted Grid
Voltage Conditions**

M.Sc. thesis of Electrical Engineering

Full name

Mr. Sajad Farajzadeh Dehkordi

Supervisors:

Dr. Saeed Abazari

Dr. Saeed Houghoughi

2013

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۸	فصل اول - مقدمه
۹	۱-۱- مروری بر کارهای گذشته
۱۰	۱-۲- ضرورت موضوع تحقیق
۱۲	۱-۳- روند ارائه مطالب
۱۳	فصل دوم - انرژی باد
۱۳	۱-۲- انرژی باد
۱۴	۲-۲- الگوی باد
۱۵	۲-۳- بازار جهانی برق بادی به تفکیک مناطق مختلف دنیا
۱۸	۲-۳-۱- انرژی باد در ایران
۱۹	۲-۴- کیفیت توان
۱۹	۲-۵- پدیده‌های کیفیت توان
۲۰	۲-۵-۱- هارمونیک‌ها
۲۱	۲-۵-۲- عدم تعادل ولتاژ
۲۴	فصل سوم - مدل‌سازی توربین‌های بادی و ژنراتور القایی دو سو تغذیه
۲۴	۳-۱- انواع توربین‌های بادی
۲۵	۳-۱-۱- توربین بادی با محور افقی
۲۵	۳-۱-۲- توربین بادی با محور عمودی
۲۷	۳-۲- ساختمان توربین‌های بادی
۲۹	۳-۳- کنترل توان در توربین‌های بادی
۳۱	۳-۴- انواع توربین بادی از لحاظ عملکرد
۳۱	۳-۴-۱- توربین‌های بادی سرعت ثابت
۳۲	۳-۴-۲- توربین‌های بادی با سرعت متغیر
۳۲	۳-۵- آیرودینامیک توربین بادی
۳۷	۳-۶- ژنراتورها
۳۷	۳-۶-۱- ژنراتور سنکرون
۳۸	۳-۶-۲- ژنراتورهای القایی
۳۹	۳-۷- ساختمان توربین‌های بادی
۴۰	۳-۷-۱- توربین بادی سرعت ثابت نوع A

- ۴۱ ۲-۷-۳- توربین بادی سرعت متغیر با سرعت رتور محدود شده نوع B
- ۴۲ ۳-۷-۳- توربین سرعت متغیر با مبدل فرکانسی توان جزئی نوع C
- ۴۲ ۴-۷-۳- توربین سرعت متغیر با مبدل فرکانسی توان کل نوع D
- ۴۲ ۸-۳- مدل سازی ژنراتور القایی دو سو تغذیه
- ۴۵ ۱-۸-۳- تبدیل dq
- ۴۸ ۲-۸-۳- مدل دینامیکی ژنراتور القایی دو سو تغذیه در قاب مرجع ساکن استاتور

فصل چهارم- روش کنترل حالت لغزشی

- ۵۰ ۱-۴- روش های کنترل ماشین القایی
- ۵۰ ۱-۱-۴- کنترل اسکالر
- ۵۱ ۲-۱-۴- کنترل برداری
- ۵۳ ۳-۱-۴- کنترل مستقیم گشتاور
- ۵۳ ۴-۱-۴- کنترل مستقیم توان
- ۵۴ ۲-۴- کنترل غیر خطی
- ۵۵ ۳-۴- طراحی کنترل کننده های غیر خطی
- ۵۶ ۴-۴- کنترل حالت لغزشی
- ۵۶ ۱-۴-۴- سطوح لغزش
- ۵۸ ۲-۴-۴- طراحی کنترل کننده

فصل پنجم- بهبود کیفیت توان با کنترل مد لغزشی توان ژنراتور القایی دو سو تغذیه در

- ۶۱ شبکه های با ولتاژ نامتعادل و هارمونیکی
- ۶۱ ۱-۵- رفتار دینامیکی DFIG در قاب مرجع ساکن استاتور
- ۶۳ ۲-۵- کنترل مد لغزشی مبدل سمت رتور
- ۶۶ ۳-۵- مبدل سمت شبکه
- ۶۶ ۱-۳-۵- مدل سازی
- ۶۷ ۲-۳-۵- کنترل مد لغزشی مبدل سمت شبکه
- ۷۰ ۴-۵- کنترل مد لغزشی ولتاژ لینک dc
- ۷۱ ۵-۵- بهبود عملکرد ژنراتور القایی دو سو تغذیه با استفاده از مبدل سری با شبکه
- ۷۲ ۱-۵-۵- ترکیب DFIG و مبدل SGSC
- ۷۲ ۲-۵-۵- مدل سازی سیستم DFIG به همراه SGSC در شبکه با ولتاژ نامتعادل
- ۷۳ ۳-۵-۵- جداسازی توالی های مثبت و منفی ولتاژ در حالت نامتعادل
- ۷۴ ۴-۵-۵- مدلسازی SGSC
- ۷۵ ۱-۴-۵-۵- کنترل مد لغزشی SGSC

۷۶ ۵-۵-۵- کنترل مد لغزشی مبدل سمت سمت شبکه (GSC) یا (PGSC)

۷۷ ۵-۶-۶- کنترل مد لغزشی مبدل سمت سمت رتور (RSC)

۷۸ فصل ششم - پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی DFIG

۷۸ ۶-۱- بهبود کیفیت توان با کنترل مد لغزشی DFIG در شبکه با ولتاژ نامتعادل و هارمونیک

۷۹ ۶-۲- نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید توان الکتریکی از انرژی باد بر پایه DFIG

۷۹ ۶-۲-۱- نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ

۸۴ ۶-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی آزمایش مقاوم بودن

۸۸ ۶-۲-۳- نتایج شبیه‌سازی مربوط به اعوجاج هارمونیک ولتاژ شبکه

۹۳ ۶-۳- نتایج شبیه‌سازی سیستم تولید توان الکتریکی از انرژی باد بر پایه DFIG و به‌کارگیری SGSC

۹۳ ۶-۳-۱- نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ

۹۷ ۶-۳-۲- نتایج شبیه‌سازی مربوط به آزمایش مقاوم بودن

۹۹ فصل هفتم - نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۰۰ ۷-۱- نتیجه‌گیری

۱۰۱ ۷-۲- پیشنهادها

۱۰۲ پیوست‌ها

۱۰۲ پیوست ۱: لیست نمادها، زیرنویس‌ها و بالانویس‌ها

۱۰۳ پیوست ۲: پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده

۱۰۴ منابع و مأخذ

فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۱۲	شکل (۱-۱): ساختار یک سیستم تولید توان بادی بر پایه DFIG
۱۸	شکل (۱-۲): ظرفیت جهانی برق بادی نصب شده به صورت الف) تجمعی ب) سالیانه (۲۰۱۱ - ۱۹۹۶)
۱۸	شکل (۲-۲): ظرفیت برق بادی نصب شده در ۱۰ کشور برتر جهان
۱۹	شکل (۳-۲): ظرفیت سالانه نصب شده برق بادی جهان به تفکیک مناطق مختلف
۱۹	شکل (۴-۲): پیش بینی تولید برق از انرژی باد به صورت سالانه و تجمعی در جهان به همراه نرخ رشد
۲۲	شکل (۵-۲): مقادیر توالی مثبت و منفی ولتاژ بر حسب درصد عدم تعادل در ولتاژ
۲۲	شکل (۶-۲): مقدار توالی منفی جریان استاتور بر حسب درصد عدم تعادل در ولتاژ استاتور
۲۳	شکل (۷-۲): مقدار جریان فازهای مختلف استاتور بر حسب درصد عدم تعادل در ولتاژ
۲۳	شکل (۸-۲): میزان تلفات در سیم پیچ های مختلف بر حسب درصد عدم تعادل
۲۴	شکل (۹-۲): نوسان گشتاور در ژنراتور القایی به دلیل نامتعادلی ولتاژ استاتور
۲۶	شکل (۱-۳): توربین بادی با محور افقی
۲۷	شکل (۲-۳): توربین بادی با محور عمودی
۲۷	شکل (۳-۳): توربین های در جهت باد و خلاف جهت باد
۲۸	شکل (۴-۳): قسمت های مختلف یک توربین بادی
۳۰	شکل (۵-۳): طرح کنترل گام توربین بادی سرعت متغیر
۳۱	شکل (۶-۳): پره توربین بادی و سرعت باد
۳۲	شکل (۷-۳): ژنراتور القایی قفس سنجابی با توربین بادی سرعت ثابت متصل به شبکه
۳۴	شکل (۸-۳): جریان هوای عبوری از یک دیسک محرک
۳۴	شکل (۹-۳): چگونگی تغییرات سرعت و فشار هوا در نقاط مختلف تونل جریان
۳۶	شکل (۱۰-۳): منحنی C_p بر حسب λ
۳۷	شکل (۱۱-۳): مشخصه توان استخراج شده بر حسب سرعت شفت رتور
۴۲	شکل (۱۲-۳): توربین بادی سرعت ثابت نوع A
۴۲	شکل (۱۳-۳): توربین سرعت متغیر نوع B
۴۳	شکل (۱۴-۳): توربین با سرعت متغیر نوع C
۴۳	شکل (۱۵-۳): توربین بادی سرعت متغیر نوع D
۴۴	شکل (۱۶-۳): مدار الکتریکی یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه
۴۸	شکل (۱۷-۳): رابطه بین دستگاه مرجع سه فاز و دستگاه مرجع دو فاز
۴۸	شکل (۱۸-۳): دستگاه مرجع ساکن استاتور
۴۹	شکل (۱۹-۳): مدار معادل DFIG در قاب مرجع ساکن استاتور
۵۰	شکل (۲۰-۳): نمای کلی DFIG در حالت اتصال به شبکه
۵۲	شکل (۱-۴): شباهت ماشین جریان مستقیم و ماشین القایی

- ۵۸ شکل (۲-۴): شرط لغزشی
- ۶۰ شکل (۳-۴): تعبیر ترسیمی معادلات
- ۶۰ شکل (۴-۴): لرزش ناشی از سوئیچینگ
- ۶۳ شکل (۱-۵): ساختار یک سیستم توان بادی بر پایه DFIG
- ۶۳ شکل (۲-۵): مدار معادل DFIG در قالب مرجع ساکن استاتور
- ۶۴ شکل (۳-۵): ساختار مبدل سمت رتور DFIG
- ۶۷ شکل (۴-۵): ساختار مبدل سمت شبکه
- ۶۸ شکل (۵-۵): ساختار توربین بادی بر پایه DFIG
- ۶۹ شکل (۵-۶): طرح کنترلی مبدل سمت شبکه
- ۷۲ شکل (۵-۷): ساختار یک سیستم DFIG به همراه SGSC
- ۷۴ شکل (۵-۸): ساختار مبدل سری با شبکه (SGSC)
- ۷۹ شکل (۱-۶): ولتاژ شبکه در حالت نامتعادل
- ۷۹ شکل (۲-۶): گشتاور الکترومغناطیسی در حالت عدم تعادل ولتاژ طبق مرجع [۴۲]
- ۸۰ شکل (۳-۶): بزرگ‌نمایی گشتاور الکترومغناطیسی در حالت عدم تعادل ولتاژ طبق مرجع [۴۲]
- ۸۱ شکل (۴-۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC و با روش کنترلی مرجع [۴۲] (الف) گشتاور الکترومغناطیسی (ب) توان اکتیو استاتور (ج) توان راکتیو استاتور
- ۸۱ شکل (۵-۶): پاسخ دینامیکی کنترل‌کننده مرجع [۴۲] به سیگنال مرجع Q_{sref}
- ۸۲ شکل (۶-۶): پاسخ دینامیکی کنترل‌کننده پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC به سیگنال Q_{sref}
- ۸۳ شکل (۷-۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC و با روش کنترلی مرجع [۴۲] (الف) ولتاژ لینک DC (ب) توان اکتیو سمت شبکه (ج) توان راکتیو سمت شبکه
- ۸۴ شکل (۸-۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC و با روش کنترلی مرجع [۴۲] (الف) توان اکتیو خروجی سیستم (ج) توان راکتیو خروجی سیستم
- ۸۶ شکل (۹-۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ و تغییر پارامتر با روش کنترلی مرجع [۴۲] (الف) گشتاور الکترومغناطیسی (ب) توان راکتیو استاتور (ج) ولتاژ لینک DC (د) توان اکتیو سمت شبکه
- ۸۸ شکل (۱۰-۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ و تغییر پارامتر با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC (a) بدون تغییر پارامتر (b) با تغییر پارامتر (الف) گشتاور الکترومغناطیسی (ب) توان راکتیو استاتور (ج) ولتاژ لینک DC (د) توان اکتیو سمت شبکه (ه) توان اکتیو خروجی سیستم (و) توان راکتیو خروجی سیستم
- ۸۹ شکل (۱۱-۶): ولتاژ شبکه در حالت اعوجاج هارمونیک
- ۹۰ شکل (۱۲-۶): نتایج شبیه‌سازی مربوط به اعوجاج هارمونیک ولتاژ با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC و با روش کنترلی مرجع [۴۲] (الف) گشتاور الکترومغناطیسی (ب) توان اکتیو استاتور (ج) توان راکتیو استاتور

- شکل (۶-۱۳): نتایج شبیه‌سازی مربوط به اعوجاج هارمونیک ولتاژ با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC و با روش کنترلی مرجع [۴۲] (الف) ولتاژ لینک DC (ب) توان اکتیو سمت شبکه (ج) توان راکتیو سمت شبکه
- ۹۱
- شکل (۶-۱۴): نتایج شبیه‌سازی مربوط به اعوجاج هارمونیک ولتاژ با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC و با روش کنترلی مرجع [۴۲] (الف) توان اکتیو خروجی سیستم (ج) توان راکتیو خروجی سیستم
- ۹۲
- شکل (۶-۱۵): درصد اعوجاج هارمونیک جریان استاتور در حالت ولتاژ هارمونیک شبکه با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC و با روش کنترلی مرجع [۴۲]
- ۹۳
- شکل (۶-۱۶): درصد اعوجاج هارمونیک جریان رتور در حالت ولتاژ هارمونیک شبکه با روش کنترل پیشنهادی بدون به‌کارگیری SGSC و با روش کنترلی مرجع [۴۲]
- ۹۳
- شکل (۶-۱۷): نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ با روش‌های کنترل پیشنهادی با به‌کارگیری SGSC و بدون آن و با روش کنترلی مرجع [۴۲] (الف) گشتاور الکترومغناطیسی (ب) توان اکتیو استاتور (ج) توان راکتیو استاتور (د) ولتاژ لینک DC (ه) توان اکتیو سمت شبکه (و) توان راکتیو سمت شبکه (ز) توان اکتیو خروجی سیستم (ح) توان راکتیو خروجی سیستم
- ۹۶
- شکل (۶-۱۸): نتایج شبیه‌سازی مربوط به عدم تعادل ولتاژ و تغییر پارامتر با روش کنترل پیشنهادی با به‌کارگیری SGSC (A) بدون تغییر پارامتر (B) با تغییر پارامتر (الف) گشتاور الکترومغناطیسی (ب) توان راکتیو استاتور (ج) ولتاژ لینک DC (د) توان اکتیو سمت شبکه (ه) توان اکتیو خروجی سیستم (و) توان راکتیو خروجی سیستم
- ۹۸

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۷	جدول (۱-۲): ظرفیت جهانی برق بادی به تفکیک مناطق مختلف
۲۰	جدول (۲-۲): میزان تولید انرژی برق از باد در ایران تا انتهای سال ۱۳۹۱
۳۷	جدول (۱-۳): مقدار ثابت‌های c1 تا c6 در رابطه (۱۳-۳)
۴۱	جدول (۲-۳): ساختارهای مختلف توربین بادی معرفی شده در مرجع [۲]

فصل اول

مقدمه

در این فصل به بیان موضوع تحقیق به صورت کلی، مروری کوتاه بر تاریخچه کارهای انجام گرفته در زمینه انرژی باد و ضرورت موضوع این تحقیق پرداخته می‌شود. در پایان، روند کلی پایان‌نامه با مرور اجمالی فصول ترسیم شده است.

۱-۱- مروری بر کارهای گذشته

امروزه با توجه به کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، گازهای طبیعی و افزایش بهای مصرفی آن‌ها و همچنین افزایش نگرانی‌ها از آلودگی محیط‌زیست به علت احتراق سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی‌های نو و پاک به ویژه انرژی باد رو به افزایش است. ژنراتورهای گوناگونی در توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱، ۲]. ژنراتور القایی دو سو تغذیه به علت مزایای ویژه چون عملکرد سرعت متغیر، کاهش توان مبدل به حدود ۳۰٪ توان ژنراتور، کاهش تلفات و هزینه و امکان کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو بیش‌ترین کاربرد را در سیستم‌های مدرن توربین بادی به خود اختصاص می‌دهد [۳]. استاتور این ژنراتور به صورت مستقیم و رتور آن توسط دو مبدل پشت به پشت با یک لینک DC مشترک به شبکه متصل می‌گردد. مبدلی که به شبکه متصل می‌گردد مبدل سمت شبکه و مبدلی که به سیم‌پیچ‌های رتور متصل است را مبدل سمت رتور می‌نامند [۴، ۵]. از آنجا که توربین‌های بادی بیشتر در مناطق روستایی با شبکه‌های محلی ضعیف و خطوط نسبتاً طولانی نصب می‌شوند و استاتور به صورت مستقیم به شبکه متصل می‌شود، این ژنراتور نسبت به اختلالات شبکه بسیار حساس است و عدم تعادل اندکی در ولتاژ شبکه، جریان شبکه را به میزان قابل‌توجهی نامتعادل می‌کند. این مسئله نه تنها باعث ایجاد گرمای غیریکنواخت در سیم‌پیچ‌های استاتور می‌شود بلکه عامل ایجاد نوسانات توان و گشتاور با فرکانس دابل شبکه هم خواهد شد [۶-۱۰] که هم برای پایداری شبکه مضر است و هم به سیستم مکانیکی توربین صدمه می‌زند. کنترل^۱ DFIG در شبکه‌های متعادل به صورت کنترل برداری [۱۱، ۱۲] و به روش‌های گوناگون از جمله کنترل برداری با جهت‌دهی شار فاصله هوایی [۱۳]، جهت‌دهی شار و ولتاژ استاتور [۱۴-۱۷]، کنترل مستقیم گشتاور [۱۸-۲۳] و کنترل مستقیم توان [۲۴-۲۹] صورت می‌گیرد. اولین روش‌های کنترلی در شرایط ولتاژ نامتعادل شبکه، بر پایه کنترل‌کننده PI بر روی جریان طراحی شده‌اند [۳۰-۳۲] ولی در تمام روش‌های کنترلی فوق نیاز به استخراج توالی مثبت و منفی جریان است. در [۳۳] از دو کنترل‌کننده PI جداگانه یکی برای کنترل مؤلفه‌ی مثبت جریان رتور و دیگری برای کنترل مؤلفه‌ی منفی آن استفاده شده است. این روش پاسخ حالت دائمی مطلوبی دارد اما پاسخ دینامیکی و پایداری سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در [۳۴-۳۶] از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-رزونانسی (PIR)^۲ استفاده شده است، که پاسخ دینامیکی بهتری داشته اما نیازمند انتقال پارامترها به قاب مرجع سنکرون است. در نتیجه ساختار پیچیده‌تر و محاسبات بیشتری را می‌طلبد. همچنین تمامی روش‌های فوق نسبت به تغییر پارامتر، مقاوم نیستند.

چندین طرح اصلاح‌شده‌ی کنترل مستقیم توان هم برای DFIG در شرایط عدم تعادل ولتاژ شبکه هم پیشنهاد شده است [۳۷-۴۰]. در [۳۷] ولتاژهای مرجع مورد نیاز رتور به وسیله یک کنترل‌کننده PIR تولید می‌شوند. این روش امکان تنظیم توان اکتیو و راکتیو و جریان استاتور را مطابق با اهداف کنترلی مختلف فراهم می‌کند و به علاوه نسبت به تغییرات پارامترها که ناشی از گرمای نامتعادل و یا اضافه جریان هستند، مقاوم است، اما نیاز به انتقال پارامترها به قاب مرجع سنکرون داشته و مستلزم محاسبات پیچیده‌ای است. در [۳۸] مؤلفه‌ی توالی منفی جریان رتور برای کاهش ریپل توان اکتیو و راکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش پاسخ دینامیکی خوبی داشته و توانایی کاهش تأثیر تغییرات سرعت باد بر روی سرعت و گشتاور

^۱ Doubly Fed Induction Generator

^۲ Proportional-Integrator-Resonance

تولیدی را دارد، اما نمی‌تواند نوسانات توان اکتیو و راکتیو را به طور هم‌زمان حذف نماید. در [۳۹] از روش کنترل مستقیم توان (DPC^۱) استفاده شده که موجب مقاوم بودن سیستم نسبت به تغییر پارامتر می‌شود. ولی در این روش نیز نیاز به استخراج توالی‌های مثبت و منفی جریان است. روش کنترلی DPC+ در [۴۰] معرفی شده است که امکان کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو DFIG را در شرایط عدم تعادل ولتاژ شبکه فراهم می‌کند. در این روش پارامتر k طوری تعریف شده که با تغییر آن بین ۱ تا ۱- اهداف کنترلی مختلف تأمین می‌شوند. در [۴۱] یک روش کنترلی بر مبنای کنترل حالت لغزشی پیشنهاد شده است که توان استاتور را در قاب مرجع ساکن استاتور و بدون نیاز به انتقال پارامترها به قاب مرجع سنکرون تنظیم می‌کند. در این روش مؤلفه‌های جبرانی مورد نیاز برای کنترل توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده و اهداف کنترلی مختلف قابل دستیابی هستند. عیب عمده این روش کنترلی هم این است که امکان تأمین هم‌زمان اهداف کنترلی وجود ندارد. در هیچ‌کدام از روش‌های کنترلی فوق به مسئله‌ی آلودگی هارمونیکی پرداخته نشده است. در [۴۲] به کنترل هم‌زمان توان‌های اکتیو و راکتیو و گشتاور الکترومغناطیسی با روش کنترل حالت لغزشی پرداخته شده، عیب عمده این روش نیاز به تنظیم دقیق پارامترهای کنترل‌کننده PI و باقی ماندن نوسانات فرکانس 100Hz در توان‌های خروجی است. اخیراً از یک مبدل اضافی سری با استاتور (SGSC) جهت حذف توالی منفی ولتاژ در ساختمان DFIG استفاده شده است که توانسته کیفیت توان را با حذف مؤلفه‌های هارمونیک دوم در توان و گشتاور الکترومغناطیسی بهتر نماید [۴۳-۴۵]. در [۴۴،۴۵] اهداف کنترلی مختلف با بهره‌گیری از روش کنترل برداری مبتنی بر استفاده از کنترل‌کننده‌های PI و جداسازی توالی‌های مثبت و منفی ولتاژ و جریان قابل دستیابی هستند. مشکلات عمده این روش‌ها، تنظیم پارامترهای PI و نیاز به تبدیلات متعدد بین قاب‌های مرجع است که در نتیجه پیاده‌سازی این کنترل‌کننده‌ها را مشکل می‌نماید.

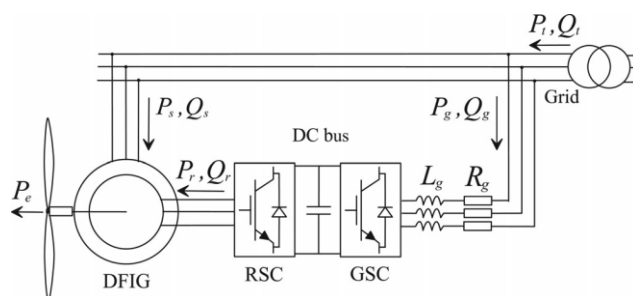
۱-۲- ضرورت موضوع تحقیق

با توجه به کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، گازهای طبیعی و افزایش بهای مصرفی آن‌ها استفاده از انرژی‌های نو به ویژه انرژی باد رو به افزایش است. یکی از پرکاربردترین ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی به دلیل داشتن مزایای ویژه (عملکرد سرعت متغیر، امکان تنظیم مستقل توان اکتیو و راکتیو، کوچک بودن مبدل و کاهش هزینه آن)، ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG) است. از آنجا که توربین‌های بادی بیشتر در مناطق روستایی با شبکه‌های محلی ضعیف و خطوط نسبتاً طولانی نصب می‌شوند و استاتور به صورت مستقیم به شبکه همان‌گونه که در شکل (۱-۱۰) مشخص است متصل می‌شود، احتمال هارمونیکی شدن ولتاژ و وقوع عدم تعادل آن افزایش می‌یابد [۴۶]. همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، عدم تعادل در ولتاژ استاتور منجر به ایجاد توالی منفی در ولتاژ استاتور و شار گردان رتور می‌گردد. وجود توالی منفی کوچک در ولتاژ باعث ایجاد جریان‌های بزرگ با توالی منفی خواهد شد. جریان نامتعادل باعث تغییر در میزان تلفات در فازهای مختلف و افزایش آن در برخی سیم‌پیچ‌های ژنراتور می‌گردد و ایجاد گرمای غیریکنواخت در این سیم‌پیچ‌ها می‌نماید که منجر به تخریب عایق آن‌ها شده و به صورت کلی عمر سیم‌پیچ‌ها را می‌کاهد. همچنین این جریان نامتعادل در صورت عدم کنترل، باعث ایجاد نوسانات گشتاور، توان‌های اکتیو

¹ Direct Power Control

² Series Grid-Side Converter

و راکتیو تزریقی به شبکه و وارد آمدن تنش‌های مکانیکی به شفت ژنراتور و توربین و ناپایداری شبکه می‌گردد [۴۷].



شکل (۱-۱): ساختار یک سیستم تولید توان بادی بر پایه DFIG

به دلیل کافی نبودن درجات آزادی در کنترل، حل تمام مشکلات فوق از طریق فرمان دادن به مبدل‌های سمت رتور (RSC^1) و سمت شبکه (GSC^2) امکان‌پذیر نیست [۴۸]. در این رابطه معمولاً الگوریتم کنترلی رایجی معرفی گردیده که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است [۳۱، ۳۰] و به طور خلاصه به شرح ذیل است:

۱. مبدل سمت رتور نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو استاتور را حذف می‌کند.
۲. مبدل سمت شبکه نیز باید ولتاژ لینک dc ثابت و توان اکتیو خروجی پایدار و ثابت سیستم را تأمین کند.

لازم به ذکر است که کنترل مبدل‌های فوق باید به صورت هماهنگ باشد. دو الگوریتم کنترلی بر پایه روش کنترل مد لغزشی (SMC^3)، برای دو مبدل سمت رتور و سمت شبکه طراحی گردیده که در شرایط نامتعادل بودن و اعوجاج هارمونیک ولتاژ شبکه موجب عملکرد مطلوب DFIG می‌گردد. به دلیل اینکه سیگنال‌های کنترل فقط به مقادیر حالت‌های سوئیچینگ انتخابی بستگی دارند، روش فوق در مقابل تغییر پارامترها مقاوم است و همچنین چون توانایی ردیابی سیگنال با روش کنترل مد لغزشی وجود دارد، کنترل در دستگاه مرجع ساکن استاتور اجرا می‌شود. همچنین در این روش نیازی به استخراج توالی‌های مثبت و منفی ولتاژ یا جریان نیست.

این بخش در دو قسمت انجام شده است:

- ۱) ولتاژ لینک dc به روش کنترلی PI توسط مبدل‌های DFIG کنترل شود [۴۲].
- ۲) ولتاژ لینک dc به روش کنترلی SMC توسط مبدل‌های DFIG کنترل شود.

به دلیل اینکه لینک dc به روش SMC کنترل می‌شود، نسبت به روش کنترل PI در مراجع ذکر شده، از خطای کمتر و مقاومت بیشتری در شرایط تغییر وضعیت و پارامترهای سیستم برخوردار است. همچنین دشواری یافتن ضرایب تنظیم کنترل‌کننده PI حذف می‌شود. با وجود اینکه در روش دوم تا حدی کیفیت توان بهبود بخشیده می‌شود ولی همچنان نوسانات با فرکانس دابل در گشتاور الکترومغناطیسی و توان خروجی شبکه باقی است که در گذر زمان از عمر تجهیزات می‌کاهد. از این لحاظ از یک مبدل اضافی سری با

¹ Rotor-Side Converter

² Grid-Side Converter

³ Sliding-Mode Control