دانشگاه اصفهان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی برق

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق قدرت گرایش ماشین‌های الکتریکی

کنترل توان اکتیو تولید شده در توربین بادی به منظور کاهش اثر نوسانات فرکانس بالای باد بر روی شبکه قدرت

استادان راهنما:
دکتر آرش کیومرثی
دکتر محمد عطایی

استادان مشاور:
دکتر بهزاد میرزائیان
دکتر امین خدابخشیان

پژوهشگر:
وحید رسولی

بهمن‌ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکـارات و
نوآوری های ناشی از تحقیـق موضـوع ایـن پایـان نامـه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

تقدیم می‌کنم به

یاد پدر و برادرم، مصطفی و سعید

و مادر و خواهرم که وجودشان گلبرگی است برای شبنم هستی‌ام

سپاسگزاری

سپاس می گویم مهر پدر و مادرم را، که همچون خورشید بر سرزمین قلبم تابیدند. سپاس می دارم وجودشان را، که به من آموختند چگونه زیستن را. سپاس می گویم جور استاد را، که بهتر است از مهر پدر. افتخار می کنم به خود که پدر و مادرم زندگی را به من هدیه دادند و وجود استادانم بود که به من نشان داد که شایسته این هدیه هستم.

درود و سپاس خود پیشکش استادان ارجمند، آقای دکتر آرش کیومرثی و آقای دکتر محمد عطایی، که در تمام دوره انجام این پژوهش، هیچ گاه کمک ها و پیشنهاداتشان را دریغ نکردند. همچنین از اساتید گرامی، آقای دکتر بهزاد میرزائیان و آقای دکتر امین خدابخشیان سپاسگزاری می کنم که مشاوره هایشان امیدی بود بر به اتمام رسیدن این پژوهش. زحمات و پیشنهادات سازنده آقایان، دکتر محمد مدنی و دکتر محمد ابراهیمی را در سمت هیأت داوران ارج می نهم و همچنین از آقای دکتر بری راون - پژوهشگر دانشگاه دلف هلند- که اطلاعات مربوط به نیروگاه بادی آلویسک سوئد را در اختیارمان قرار دادند سپاسگزاری می کنم. همکاری و حمایت مالی شرکت برق منطقه ای استان اصفهان را سپاس می گویم و امید دارم با حمایت های بیشتر مسؤلین امر، شاهد پیشرفت هرچه بیشتر علم و تکنولوژی باشیم.

وجود گرانبهای مادر و خواهرم را بهترین دارایی در زندگی ام می دانم و مهر و تلاش و یاری شان را ارج می نهم؛ که چون کتیبه ای است بر هستی من و پندار و کردار و گفتار من از آن ها سرچشمه می گیرد.

چکیده

در این تحقیق با کنترل مناسب توان اکتیو تولید شده در توربین بادی، اثر نوسانات فرکانس‌های بالای باد بر روی شبکه قدرت کاهش می‌یابد. روش کنترلی استفاده شده در این تحقیق بر اساس فیلترینگ توان باد طراحی می‌گردد. بدین صورت که یک نسخه فیلتر شده از توان باد به عنوان توان مرجع شبکه تعریف شده و دینامیک توربین باید آن را دنبال کند. در نتیجه، پایداری توربین تحت تأثیر پارامترهای فیلتر قرار می‌گیرد. برای افزایش کنترل پذیری توربین روشی ارائه می‌گردد که علاوه بر مجزا کردن دینامیک‌های آهسته و سریع توربین از هم، وابستگی این دینامیک‌ها را نسبت به شبکه کاهش می‌دهد. این روش با استفاده از روش کنترل غیر خطی طراحی می‌گردد. تنظیم پارامترهای فیلتر طراحی شده مسئله دیگری است که باید برای بهبود عملکرد سیستم مد نظر قرار داد. هر چقدر ثابت زمانی فیلتر بیشتر باشد، توان بیشتری از باد جذب توربین شده و توان داده شده به شبکه هموارتر خواهد شد. بنابراین، باید موازنه‌ای بین از دست رفتن بخشی از توان باد و کاهش اثر توربین بر شبکه برقرار نمود. همچنین، یک ناحیه مجاز برای ثابت زمانی فیلتر لازم است تا تعیین گردد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که توربین به عنوان یک فیلتر قابل تنظیم، نوسانات توان باد را جذب کرده و توان هموارتری به شبکه تحویل می‌دهد. علاوه بر آن، دینامیک‌های داخلی توربین می‌توانند مستقل از شبکه کنترل شوند.

واژگان کلیدی: توربین بادی، مدلسازی سرعت باد، کنترل غیر خطی، کنترل توان اکتیو.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- سیستم‌های تبدیل انرژی باد و کنترل آن‌ها ۲

۱-۳- طرح کلی تحقیق ۳

فصل دوم: توربین‌های بادی، اجزا و نقش روش‌های کنترلی در بهبود عملکرد آن‌ها

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- آیرودینامیک توربین بادی ۶

۲-۲-۱- مدل دیسک محرک ۷

۲-۲-۲- مدل المان پره ۱۱

۲-۲-۳- نیرو، گشتاور و توان ۱۴

۲-۳- توربین‌های بادی ۱۸

۲-۳-۱- بخش انتقال حرکت ۱۹

۲-۳-۲- بخش تولید توان ۲۰

۲-۴- نقش روش‌های کنترلی در بهبود عملکرد توربین‌های بادی ۲۸

۲-۴-۱- سیستم‌های کنترل توربین بادی ۳۰

۲-۴-۲- تدابیر کنترلی ۳۹

۲-۵- مثال ۴۰

فصل سوم: سیستم مورد مطالعه و مدلسازی آن

۳-۱- مقدمه ۴۶

عنوان **صفحه**

۳-۲- باد و انرژی باد ۴۷

۳-۲-۱- طیف وندرهوون ۴۹

۳-۲-۲- تغییرات سرعت باد ۵۰

۳-۲-۳- برش باد ۵۲

۳-۲-۴- انرژی موجود در باد ۵۵

۳-۲-۵- اغتشاش ۵۵

۳-۳- مدلسازی تغییرات سرعت باد ۵۶

۳-۳-۱- مدلسازی سرعت باد با استفاده از مدل وندرهوون ۵۷

۳-۳-۲- مدلسازی سرعت باد با استفاده از روش تلفیقی ۵۹

۳-۴- سیستم مکانیکی(انتقال حرکت) ۶۵

۳-۵- سیستم الکتریکی(انتقال توان) ۶۶

۳-۶- مدل شبکه قدرت ۶۸

۳-۷- فرضیات در نظر گرفته شده ۶۹

فصل چهارم: طراحی کنترل کننده غیر خطی برای بهبود عملکرد سیستم کنترل توربین بادی

۴-۱- مقدمه ۷۰

۴-۲- اهداف کنترل ۷۱

۴-۳- روش طراحی ۷۲

۴-۳-۱- ساختار سیستم ۷۲

۴-۳-۲- طراحی کنترل کننده زیرسیستم S_{fast} ۷۷

۴-۳-۳- تحلیل پایداری ۸۹

۴-۳-۴- طراحی کنترل کننده زیرسیستم S_{slow} و نحوه انتخاب ثابت زمانی فیلتر ۹۵

عنوان **صفحه**

۴-۴- خلاصه فصل ۱۰۹

فصل پنجم: نتایج شبیه سازی

۵-۱- نتایج مدلسازی ۱۱۲

۵-۲- نتایج پایداری ۱۱۴

۵-۳- نتایج شبیه سازی کنترل کننده..... ۱۱۷

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات ادامه کار

۶-۱- نتیجه‌گیری ۱۳۰

۶-۲- پیشنهادات ادامه کار ۱۳۱

پیوست(الف)..... ۱۳۳

پیوست(ب)..... ۱۳۴

پیوست(پ)..... ۱۳۵

پیوست(ت) ۱۳۶

پیوست(ث) ۱۳۷

پیوست(ج) ۱۳۸

منابع ۱۴۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل(۲-۱): ساختار توربین بادی، (الف) محور افقی (ب) محور عمودی ۶

شکل(۲-۲): شمای دیسک محرک و گذر جریان هوا قبل و بعد از آن ۷

شکل(۲-۳): تغییرات سرعت و فشار باد در مسیر جریان هوا قبل و بعد از برخورد با دیسک محرک ۸

شکل(۲-۴): برش مقطعی المان پره ۱۲

شکل(۲-۵): بردار سرعت نسبی باد در سطح المان پره ۱۲

شکل(۲-۶): تغییرات ضرایب بالابر و کششی بر حسب α برای یک آیروفویل ۱۳

شکل(۲-۷): نمودار تغییرات ضرایب توان و گشتاور بر حسب نسبت سرعت نوک یک نوع توربین ۱۵

شکل(۲-۸): منحنی گشتاور- سرعت رتور توربین برای سرعت‌های باد گوناگون($\beta = 0^o$) ۱۶

شکل(۲-۹): منحنی توان- سرعت رتور توربین برای سرعت‌های باد گوناگون($\beta = 0^o$) ۱۷

شکل(۲-۱۰): منحنی گشتاور- سرعت رتور توربین برای زاویه‌های پرتاب گوناگون($V = ۱۲\ \mathrm{m/s}$) ۱۷

شکل(۲-۱۱): منحنی توان- سرعت رتور توربین برای زاویه‌های پرتاب گوناگون($V = ۱۲\ \mathrm{m/s}$) ۱۸

شکل(۲-۱۲): شمای کلی توربین بادی و بخش‌های اصلی آن ۱۹

شکل(۲-۱۳): شمای سیستم توربین بادی شامل کانورتر و جعبه دنده ۲۰

شکل(۲-۱۴): شمای توربین بادی با ژنراتور القایی قفسه سنجابی(SCIG) ۲۲

شکل(۲-۱۵): شمای توربین بادی OptiSlip با ژنراتور القایی رتور سیم پیچی شده(WRIG) ۲۳

شکل(۲-۱۶): شمای توربین بادی DFIG با ژنراتور القایی رتور سیم پیچی شده(WRIG) ۲۳

شکل(۲-۱۷): شمای توربین بادی با ژنراتور سنکرون(WRSG یا PMSG) ۲۵

شکل(۲-۱۸): شمای ساختار کانورتر back-to-back ۲۷

شکل(۲-۱۹): نمودار توان الکتریکی یک توربین بادی ۲ مگاواتی بر حسب سرعت باد ۲۹

عنوان **صفحه**

شکل(۲-۲۰): سیستم کنترل زاویه پرتاب توربین بادی با حلقه پسخور ۳۱

شکل(۲-۲۱): نیروهای وارد شده به المان پره در روش کنترل زاویه پرتاب ۳۲

شکل(۲-۲۲): ضرایب بالابر و کششی به ازای سرعت‌های V_0 و V_1 در روش کنترل زاویه پرتاب ۳۲

شکل(۲-۲۳): مشخصه گشتاور- سرعت چرخشی رتور توربین‌های FS-FP ۳۴

شکل(۲-۲۴): منحنی توان الکتریکی توربین‌های FS-FP بر حسب سرعت باد ۳۵

شکل(۲-۲۵): منحنی ضریب توان توربین‌های FS-FP بر حسب سرعت باد ۳۶

شکل(۲-۲۶): نیروهای وارد شده به المان پره در روش کنترل سکون پسیو ۳۶

شکل(۲-۲۷): ضرایب بالابر و کششی به ازای سرعت‌های V_0 و V_1 در روش کنترل سکون پسیو ۳۷

شکل(۲-۲۸): نیروهای وارد شده به المان پره در روش کنترل سکون اکتیو ۳۷

شکل(۲-۲۹): ضرایب بالابر و کششی به ازای سرعت‌های V_0 و V_1 در روش کنترل سکون اکتیو ۳۸

شکل(۲-۳۰): منحنی توان الکتریکی توربین بادی سرعت ثابت و متغیر بر حسب سرعت باد ۴۱

شکل(۲-۳۱): منحنی ضریب توان توربین بر حسب نسبت سرعت نوک ۴۲

شکل(۲-۳۲): منحنی ضریب گشتاور توربین بر حسب نسبت سرعت نوک ۴۳

شکل(۲-۳۳): منحنی تغییرات توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد ۴۵

شکل(۳-۱): طیف وندرهوون ۴۸

شکل(۳-۲): تغییرات سرعت باد بر حسب زمان. محور عمودی: سرعت باد بین ۰ تا ۲۰m/s ۵۱

شکل(۳-۳): تابع توزیع احتمال سرعت باد بر حسب سرعت باد میانگین ۵۲

شکل(۳-۴): برش باد- راست: در اثر اختلاف در جهت باد- چپ: در اثر اختلاف در سرعت باد ۵۳

شکل(۳-۵): نمونه ای از برش باد عمودی ۵۳

شکل(۳-۶): برش باد- تغییر در سرعت باد نسبت به ارتفاع (α=۰/۱۴) ۵۴

شکل(۳-۷): نوسانات سرعت باد با استفاده از مدل وندرهوون در یک دوره ۵ ساعته ۵۸

عنوان **صفحه**

شکل(۳-۸): اغتشاشات سرعت باد با استفاده از مدل ون کارمن($V_m = ۷\text{m/s}\ ,\ L = ۱۸۰\text{m}\ ,\ \sigma = ۰/۱۲$) ... ۵۹
شکل(۳-۹): تغییرات سرعت باد با استفاده از روش تلفیقی در دوره زمانی ۱۵۰۰۰ ثانیه ۶۵
شکل(۳-۱۰): مدل بخش مکانیکی(انتقال حرکت) توربین بادی ۶۶
شکل(۳-۱۱): بخش الکتریکی(انتقال توان) توربین بادی- کانورتر واصل بین ژنراتور و شبکه ۶۸
شکل(۳-۱۲): مدل بخش الکتریکی(انتقال توان) توربین بادی ۶۸
شکل(۳-۱۳): مدل تکفاز شبکه و کانورتر ۶۸
شکل(۴-۱): تغییرات حالت زیرسیستم‌های کند و سریع ۷۴
شکل(۴-۲): نقاط تعادل به ازای سرعت‌های مختلف باد و توان شبکه ثابت ۹۰
شکل(۴-۳): نقاط تعادل به ازای مقادیر مختلف توان شبکه و سرعت باد ثابت ۹۱
شکل(۴-۴): تغییرات نقاط تعادل و منحنی مقادیر ویژه سیستم خطی شده S_{slow} ۹۲
شکل(۴-۵): محدوده پایداری سرعت چرخشی توربین ۹۳
شکل(۴-۶): منحنی تغییرات نقاط تعادل به ازای ثابت زمانی بزرگ فیلتر ۹۶
شکل(۴-۷): منحنی تغییرات گشتاور بر حسب سرعت چرخشی ۹۷
شکل(۴-۸): بلوک دیاگرام فیلتر طراحی شده برای استخراج توان شبکه در حوزه لاپلاس ۹۸
شکل(۴-۹): دیاگرام بود مربوط به تابع تبدیل $G(j\omega)$، دامنه وفاز آن به ازای مقادیر مختلف τ ۱۰۵
شکل(۴-۱۰): منحنی $\bar{\omega}_h - \upsilon_\omega$ به ازای مقادیر مختلف ثابت زمانی ۱۰۷
شکل(۴-۱۱): محدوده انتخابی ثابت زمانی به ازای مقادیر مختلف λ^* ۱۰۸
شکل(۴-۱۲): بلوک دیاگرام کنترل کننده زیرسیستم S_{slow} ۱۰۸
شکل(۴-۱۳): بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تبدیل انرژی باد متصل به شبکه ۱۱۰
شکل(۵-۱): طیف فرکانسی سرعت باد- باد واقعی، مدل ون کارمن، مدل طراحی شده ۱۱۲
شکل(۵-۲): طیف فرکانسی توان باد- باد واقعی، مدل ون کارمن، مدل طراحی شده ۱۱۲

عنوان **صفحه**

شکل(۵-۳): وضعیت پایداری توربین به ازای انتخاب ثابت زمانی در محدوده پایداری $\tau_1 = ۴۰$ s ۱۱۴

شکل(۵-۴): وضعیت ناپایداری توربین به ازای انتخاب ثابت زمانی بیشتر از مقدار بیشینه $\tau_2 = ۱۶۰$ s ۱۱۵

شکل(۵-۵): حالت‌های سیستم به ازای $\lambda^* = ۹/۲۸$ و $\tau = ۲۷$ s ۱۱۹

شکل(۵-۶): تغییرات سرعت باد و سرعت چرخشی توربین به عنوان متغیر حالت زیرسیستم کند ۱۲۰

شکل(۵-۷): متغیرهای حالت زیرسیستم سریع ۱۲۱

شکل(۵-۸): مقایسه متغیرهای حالت سیستم در دو روش کنترلی به ازای $\lambda_1^* = ۹/۲۸$ و $\tau_1 = ۲۷$ ۱۲۳

شکل(۵-۹): مقایسه متغیرهای حالت سیستم در دو روش کنترلی به ازای $\lambda_2^* = ۸$ و $\tau_2 = ۴۰$ ۱۲۴

شکل(۵-۱۰): تغییرات سرعت توربین و توان شبکه به ازای پارامترهای جدول(۵-۲) ۱۲۶

شکل(۵-۱۱): طیف فرکانسی سرعت توربین و توان شبکه به ازای پارامترهای جدول(۵-۲) ۱۲۷

شکل(۵-۱۲): مقدار دامنه DC و دامنه هارمونیک‌های اول تا دهم سرعت توربین و توان شبکه ۱۲۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول(۳-۱): بخش‌های طیف سرعت باد افقی وندرهوون ۵۰

جدول(۳-۲): مقادیر z_0 و α برای سطوح مختلف ۵۵

جدول(۴-۱): مقادیر ثابت زمانی کمینه فیلتر به ازای مقادیر مختلف نسبت سرعت نوک بهینه ۱۰۴

جدول(۴-۲): مقادیر ثابت زمانی کمینه و بیشینه فیلتر به ازای مقادیر مختلف نسبت سرعت نوک بهینه ۱۰۷

جدول(۵-۱): مقادیر ثابت زمانی، فرکانس پیک و دامنه بخش سینوسی سرعت باد برای شبیه سازی پایداری ۱۱۳.

جدول(۵-۲): مقادیر و پارامترهای مربوط به شکل(۵-۱۰) ۱۲۵

جدول(۵-۳): نسبت توان شبکه به توان آیرودینامیکی بیشینه در هارمونیک‌های اول تا دهم ۱۲۸

فهرست علائم

A	سطح مقطع دیسک پره توربین	g	گرانش زمین
A_m	دامنه مؤلفه سینوسی سرعت باد	H	ارتفاع توربین از سطح زمین
a	ضریب تداخل جریان محوری هوا	$H_F(j\omega)$	تابع تبدیل مدل‌کننده اغتشاشات باد
B	تابع بتا	J	اینرسی رتور
C	ضریب مقیاس	J_g	اینرسی شفت ژنراتور
C_{dc}	ظرفیت خازن لینک DC	J_h	اینرسی پره‌های توربین
C_D	ضریب نیروی کششی	K_F	بهره تابع تبدیل $H_F(j\omega)$
C_L	ضریب نیروی بالابر	K_S	سختی اتصالات پره و ژنراتور
C_P	ضریب توان توربین	k	ضریب شکل دهی
C_Q	ضریب گشتاور آیرودینامیکی	$k_{\sigma,v}$	شیب منحنی رگرسیون
C_T	ضریب پرتاب	L	مقیاس طولی اغتشاش
c	طول وتر المان پره	n	نسبت سرعت جعبه دنده
E_K	انرژی جنبشی موجود در باد	op	نقطه کار
F_D	نیروی اعمالی به باد توسط توربین	P_0	فشار اتمسفر
f_D	نیروی کششی المان پره	P_{aero}	توان آیرودینامیکی توربین
f_L	نیروی بالابر المان پره	P_D	فشار هوا در اطراف پره توربین
f_T	نیروی پرتاب محوری المان پره	P_e	توان تحویلی به شبکه

P_{grid} توان شبکه	V_D مؤلفه تانژانتی سرعت المان پره
P_m توان مکانیکی توربین	V_{grid} ولتاژ شبکه
P_{wind} توان موجود در باد	V_m متوسط سرعت باد
$p(V_m)$ تابع چگالی احتمال ویبول	V_{rel} سرعت نسبس المان پره
R شعاع دیسک پره توربین	v مؤلفه تغییرات اتمسفری سرعت باد
r شعاع دیسک المان پره	v_{dc} ولتاژ خازن لینک DC
SD انحراف معیار	$v_{filtered}$ سرعت باد فیلتر شده
S_{fast} زیرسیستم سریع	v_m سرعت باد مینگین
S_{slow} زیرسیستم کند	v_ω سرعت لحظه‌ای باد
$S_{vv}(\omega)$ تابع توزیع فرکانسی انرژی جنبشی باد	v_ω^{OP} سرعت باد در نقطه کار
T_{aero} گشتاور آیرودینامیکی توربین	$v(t)$ سرعت باد بر حسب زمان
T_F ثابت زمانی فیلتر $H_F(j\omega)$	$v_{ml}(t)$ مؤلفه بلند و میانه نوسانات باد
T_{gen} گشتاور ژنراتور	$v_t(t)$ مؤلفه کوتاه نوسانات باد
T_{grid} گشتاور معادل توان شبکه	z_0 طول ناهمواری سطح
T_S زمان نمونه برداری	α زاویه حمله
T_{S1} زمان نمونه برداری اغتشاش	β زاویه پرتاب
V سرعت باد	λ نسبت سرعت نوک
V_{con} ولتاژ کانورتر	λ^* نسبت سرعت نوک نقطه کار

$\lambda_{optimal}$ نسبت سرعت نوک بهینه

θ_{diff} اختلاف زاویه بین شفت توربین و ژنراتور

θ_g زاویه شفت ژنراتور

θ_h زاویه شفت پره توربین

ρ چگالی هوا

σ شدت اغتشاش

σ_v انحراف معیار تغییرات سرعت باد

τ ثابت زمانی فیلتر توان

τ_{fast} ثابت زمانی زیرسیستم سریع

τ_r گشتاور چرخشی المان پره

τ_{slow} ثابت زمانی زیرسیستم کند

ω سرعت چرخشی پره توربین

ω_g سرعت چرخشی ژنراتور

ω_h سرعت چرخشی پره توربین

ω_h^{OP} سرعت چرخشی توربین در نقطه کار

ω_{stable} سرعت چرخشی پایدار

$\omega_{unstable}$ سرعت چرخشی ناپایدار

$\omega_{optimal}$ سرعت چرخشی بهینه

ω_{grid} فرکانس شبکه

ω فرکانس تغییرات سرعت باد

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

از زمان‌های گذشته باد[۱] به صورت‌های مختلفی بکار گرفته شده است. انرژی باد هزاران سال برای آسیاب کردن غلات، پمپاژ آب و سایر کاربردهای مکانیکی بکار می‌رفت. امروزه نیز چند صد هزار آسیاب بادی[۲] در سرتاسر جهان وجود دارد، که خیلی از آنها برای پمپاژ آب بکار می‌روند[۱]. با ظهور انقلاب صنعتی، سوخت‌های فسیلی بتدریج جایگزین انرژی باد شدند. در قرن بیستم، طراحی‌های جدید توربین[۳] بادی تولید الکتریسیته را در ابعاد کوچک برای کاربردهای شارژ باتری فراهم کردند. بعد از بحران نفتی اوایل سال ۱۹۷۰، انقلابی در تکنولوژی باد رخ داد. افزایش قیمت نفت انگیزه‌ای شد برای بسیاری از کشورها تا تولید الکتریسیته با استفاده از انرژی باد را ترویج دهند. در نتیجه، طراحی توربین‌های بادی مدرن توسعه یافت و تولید انرژی الکتریکی با استفاده از باد، در ابعاد بزرگ بنیاد نهاده شد.

---

[۱] Wind

[۲] Windmill

[۳] Turbine

طی دهه‌های اخیر، افزایش نگرانی‌ها در رابطه با محیط زیست و تمایلات بیشتر به سمت گوناگون بودن بازار انرژی[۱]، توجه کشورها را به سمت بهره‌برداری از انرژی باد افزایش داده است[۲]. از ابتدای قرن نوزدهم تلاش‌های زیادی برای تولید الکتریسیته از انرژی باد شده است. همچنان مشاهده می‌شود که هزینه تولید الکتریسیته توسط توان بادی از دهه ۱۹۸۰ افت مؤثری داشته است. این کاهش هزینه بخاطر تکنولوژی‌های نو و تولید بیشتر است که از نتایج آن، بازده[۲] بالاتر و گسترش توربین‌های بادی با قابلیت اطمینان[۳] بیشتر است[۲].

۱-۲- سیستم‌های تبدیل انرژی باد[۴] و کنترل آن‌ها

کنترل، نقش بسیار مهمی در سیستم‌های تبدیل انرژی باد مدرن ایفا می‌کند. در حقیقت، کنترل توربین بادی باعث می‌شود بتوان با کم کردن بارهای مکانیکی که عمر مفید قطعات را کاهش می‌دهند، از ظرفیت توربین بادی بهتر استفاده کرد. سیستم‌های تبدیل انرژی باد، باید بتوانند از عهده تغییرات فصلی و متناوب بودن باد برآیند. به همین خاطر، این سیستم‌ها شامل مکانیسم‌هایی هستند تا در سرعت‌های باد بالا، توان جذب شده را محدود کنند تا با این کار از اضافه بار جلوگیری شود. یکی از روش‌های محدود کردن توان، اساساً این گونه است که زمانی‌که توان دریافتی به مقدار نامی خود نزدیک می‌شود، نیروی بالا برنده[۵] پره‌ها را کاهش می‌دهد. برای این کار، از تلفیق قطعات مکانیکی و هیدرولیکی درون توربین به منظور چرخاندن پره‌ها نسبت به محور طولی آن‌ها استفاده می‌شود.

طی مدت زمان زیادی، سیستم‌های تبدیل انرژی باد با ژنراتور الکتریکی که به صورت مستقیم به شبکه قدرت متصل شده بودند، کاربرد زیادی داشته‌اند. در این سیستم‌ها، سرعت چرخشی توسط فرکانس شبکه تعیین می‌شود. علی‌رغم هزینه کم و قابلیت اطمینان بالا، این ساختارهای سرعت ثابت به سختی با تغییرات باد سازگار می‌شوند. از آنجا که ماکزیمم توان جذب شده در نسبت سرعت نوک[۶] بهینه بدست می‌آید، لذا سیستم‌های تبدیل انرژی باد

---

[۱] Energy Market

[۲] Efficiency

[۳] Reliability

[۴] WECS: Wind Energy Conversion Systems

[۵] Lift

[۶] Tip-Speed-Ratio

سرعت ثابت[۱] تنها در یک سرعت باد خاص می‌توانند با بازده تبدیل بهینه کار کنند. در نتیجه به منظور بهتر استفاده کردن از توربین، سیستم‌های تبدیل انرژی باد سرعت متغیر[۲] پدید آمدند. این سیستم‌ها با ترکیب کانورترهای الکترونیکی بعنوان رابط بین ژنراتور و شبکه AC، سرعت چرخشی را از فرکانس شبکه مستقل کرده‌اند. این سیستم‌ها همچنین دارای کنترل سرعت هستند تا بتوان نسبت سرعت نوک بهینه را در سرعت‌های بالاتر از نامی نیز دنبال کرد. علاوه بر این، کانورترهای الکترونیکی می‌توانند کنترل شوند و نقش منبع تولید توان راکتیو و یا مصرف کننده توان راکتیو را طبق نیازهای سیستم قدرت ایفا کنند[۲].

در[۳] پایداری یک نوع سیستم تبدیل انرژی بادی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله، از مدل دو جرمی برای مدلسازی بخش انتقال حرکت توربین استفاده شده است. دینامیک‌های بخش انتقال حرکت، بر روی پایداری سیستم اثر می‌گذارند؛ زیرا مدهای فرکانس پایین آن می‌توانند باعث ناپایداری سیستم گردند. بدین منظور، با استفاده از روش جبران سازی گشتاور ژنراتور بر پایه تخمین جریان لینک DC، پایداری سیستم تضمین می‌گردد. از آنجا که هیچ گونه میراکننده‌ای در طراحی سیستم بکار نرفته است، نوسانات سرعت و گشتاور پیچشی نمایان می‌شوند. کنترل کننده گشتاور، با کاهش این نوسانات، سیستم را پایدار کرده ولی منجر به محدود شدن ظرفیت تولید توان توربین بادی می‌شود. همچنین، از مدل دو جرمی در[۴] نیز استفاده شده است. در این مقاله، با استفاده از یک روش غیرخطی، توربین بادی سرعت متغیر کنترل می‌شود. هدف اصلی، بهینه کردن جذب توان از باد در شرایطی است که بارهای مکانیکی بخش انتقال حرکت محدود شوند. ابتدا روش‌های کنترل مرسوم مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و نشان داده می‌شود که این روش‌ها در شرایطی که دینامیک سرعت باد در نظر گرفته نشود، عملکرد خوبی ندارند. بدین منظور، کنترل کننده‌هایی طراحی می‌گردند که از روش فیدبک حالت غیرخطی و تخمین سرعت باد استفاده می‌کنند.

۱-۳- طرح کلی تحقیق

در این تحقیق، یک روش کنترلی به منظور کاهش اثر توربین بادی بر شبکه قدرت طراحی و ارائه می‌گردد. در فصل دوم، ابتدا ساختمان توربین‌های بادی و نحوه تولید توان و گشتاور در آن‌ها شرح داده می‌شود. سپس پیشینه‌ای بر

---

[۱] Fixed-Speed

[۲] Variable-Speed