

اللهم صل على محمد وآل محمد



دانشکده برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش برق قدرت

مدل سازی و کنترل توربین بادی سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی تغذیه

دوگانه در حالت های خطای شبکه

صابر نقدی گنجی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر محسن اصیلی

تابستان ۱۳۹۰

تقدیم بہ

پدر عزیزم

برپاس دیای بی کران صبر و سخاوتش
او کہ در طوفان زندگی، همچون کوهی استوار بر ایمن تکیہ گاہی بی ہمتاست

و مادر دلسوزم

بر یاد لحظہ لحظہ عشقی کہ شمارم کرد
او کہ برب ترنم دعا دارد و در دل عشقی سوزان

و بہ ہمسر مہربانم

او کہ با نجابت معصومانہ و محبت دلنوازش ہموارہ سردی یاس را از ضمیر وجودم می زداید
ہمو کہ یادش سیان آراشم است و دستہایش مرا بہ آرزو ہایم پیوند می دہد.

و برادرانم

ہمانان کہ تا ہمیشہ نگاہم محتاج نگاہ مہربانان خواہد بود

مشکر و قدردانی

در ابتدا اجازه می‌خواهم سپاس و تشکر ویژه خود را به استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر احمد دارابی نثارکنم.

چه بسا که نظر لطف ایشان در جای‌جای این پایان‌نامه قابل مشاهده است.

در اینجا جادار و از تلاش‌های جناب آقای دکتر محسن اصیلی، استاد مشاور عزیز بنده به دلیل همکاری مؤثر

ایشان در به‌ثمر رسیدن این پایان‌نامه کمال تشکر و قدردانی را داشته‌باشم.

همین‌طور سپاس بی‌دریغ خود را نثار و پدر و مادر عزیزم که پشتوانه روحی بنده بودند و همسر مهربانم که محظی آرام را

برای بنده فراهم کردند، می‌کنم.

صابر نقدی گنجی

تابستان ۱۳۹۰.

چکیده

بسیاری از کشورهای توسعه یافته در پی استفاده از انرژی باد در مناطق دورافتاده، محروم و مناطق نظامی-عملیاتی هستند. همچنین در صنایع دفاع از این طریق می‌توان انرژی لازم برای ابزار و تجهیزات نظامی در مناطق پشتیبانی نظامی را فراهم نمود. در حال حاضر این امکان سنجی در مناطق آبی کشورمان نیز بوجود آمده که مزارع بادی را در دریاها از جمله دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان بنا نهیم. همچنین در مقیاسی کوچکتر می‌توان توربین های بادی قابل حمل را ساخت و به تولید انبوه رساند. با نفوذ رو به رشد توربین‌های بادی، مطالعه و تحقیق در مورد رفتار آن‌ها در هنگام اغتشاشات گذرا و پشتیبانی از آن‌ها با قابلیت‌های در مدار باقی ماندن در حین خطا، تبدیل به یک ضرورت شد. این قابلیت بدان معناست که تمام واحدهای تولیدی، از جمله واحد تولیدی باد، باید توانایی متصل باقی ماندن در هنگام خطاها و حالت‌های کاهش ولتاژ را در محدوده مشخصی را داشته باشند. در بین انواع ژنراتورهای به کار رفته در توربین‌های بادی، ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه دارای قابلیت‌های بسیار جالبی هستند. در این پایان نامه ابتدا با استفاده از معادلات و روابط کنترل برداری میدان گرا، شارها و جریان‌های مرجع بدست آمد. سپس با استفاده از روش کنترل گشتاور مستقیم جریان‌های پیش‌گویانه ارائه شد. برخلاف روش‌های موجود که معمولاً از روش کروربار جهت در مدار باقی ماندن توربین بادی از آن استفاده می‌کنند در روش پیشنهادی نیازی به استفاده از تجهیزات اضافی نیست و جریان‌های رتور در هنگام خطا کنترل شده بدست خواهند آمد. چگونگی این مطلب نیز به وسیله نتایج شبیه سازی بررسی شده است. در پایان نیز رفتار گذرای ماشین در حین و بعد از خطای شبکه در ولتاژ ترمینال به عنوان نمونه، شبیه سازی شده است. نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های مرسوم این معیار کارایی را بهبود بخشیده است.

کلید واژه‌ها: در مدار باقی ماندن هنگام خطا، ژنراتور القایی تغذیه دوگانه، شبیه سازی، کنترل توربین بادی.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د.....	فهرست علایم و نشانه‌ها.....
ح.....	فهرست جدول‌ها.....
ط.....	فهرست شکل‌ها.....
۲.....	فصل ۱- مروری بر کارهای گذشته.....
	۱-۱- مقدمه ۲
۴.....	۲-۱- پیشینه پژوهشی.....
۱۰.....	۳-۱- ساختار گزارش.....
۱۲.....	فصل ۲- انرژی باد و مروری بر ژنراتورهای بکار رفته در توربین های بادی.....
	۱-۲- مقدمه ۱۲
۱۳.....	۲-۲- آمار نیروگاه بادی نصب شده در ایران و جهان.....
۱۶.....	۳-۲- معادلات پایه مربوط به انرژی باد.....
۱۷.....	۴-۲- محاسبه توان استخراجی از باد.....
۲۲.....	۱-۴-۲- کنترل انحرافی ناسل توربین بادی.....
۲۲.....	۲-۴-۲- کنترل توان با تغییر زاویه پره.....
۲۳.....	۳-۴-۲- کنترل توان با روش استال.....
۲۳.....	۴-۴-۲- کنترل استال فعال.....
۲۴.....	۵-۲- معرفی انواع ژنراتورهای بکار رفته در توربینهای بادی.....
۲۵.....	۱-۵-۲- ژنراتورهای القایی.....
	۱-۵-۲- قفس سنجابی ۲۶

- ۲-۱-۵-۲- ژنراتور القایی رتور سیم پیچی شده ۲۹
- ۲-۱-۵-۳- ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه ۳۰
- ۲-۵-۲- ژنراتورهای سنکرون ۳۴
- ۱-۲-۵-۲- ژنراتور سنکرون با تحریک کلاسیک ۳۵
- ۲-۲-۵-۲- ژنراتورهای سنکرون با تحریک آهنربای دائم ۳۵
- ۶-۲- مقایسه انواع ژنراتورهای بکار رفته در نیروگاههای بادی ۳۶

فصل ۳- مدلسازی توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه ۴۰

- ۱-۳- مقدمه ۴۰
- ۲-۳- مدل آیرودینامیک پره ۴۰
- ۳-۳- مدل جعبه دنده ۴۲
- ۴-۳- مدلسازی ژنراتور القایی ۴۴
- ۵-۳- بررسی مرتبه های مختلف یک مدل ژنراتور القایی ۴۹
- ۶-۳- مدل سازی مبدل فرکانسی ۵۰
- ۷-۳- مدل مدار کنترل رتور ۵۱

فصل ۴- بررسی و شبیه سازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه با استفاده از روش کنترلی جریان

پیشگویانه ۵۵

- ۱-۴- مقدمه ۵۵
- ۲-۴- روش کنترل مستقیم گشتاور DTC ۵۵
- ۱-۲-۴- اصول روش DTC ۵۵
- ۲-۲-۴- معادله گشتاور بر مبنای شار استاتور و رتور ۵۶
- ۳-۲-۴- نحوه محاسبه شار و گشتاور ۵۸
- ۴-۲-۴- پیاده سازی روش DTC با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ سه فاز ۵۹
- ۵-۲-۴- منطق انتخاب بردارهای کلیدزنی ۶۱

۶۴	.....FOC روش جهت یابی شار	۳-۴
۶۶	..... طرح اساسی کنترل جهت یابی میدان	۱-۳-۴
۶۷	..... کنترل مستقیم جهت یابی میدان	۲-۳-۴
۶۹	..... مدولاسیون بردار فضایی سنتی (SVM)	۳-۳-۴
۷۲	..... کنترل جریان پیش‌گویانه	۴-۴
۷۲	..... کنترل جریان پیش‌گویانه در اینورتر تکفاز	۱-۴-۴
۷۵	..... کنترل جریان پیش‌گویانه اینورتر سه فاز	۲-۴-۴
۷۶	..... معادلات حاکم بر کنترل جریان پیش‌گویانه	۵-۴
۸۲	..... ارزیابی روش کنترلی پیشنهادی با استفاده از شبیه‌سازی	۶-۴
۸۸	..... شرح عملکرد چند بلوک به کار رفته در شبیه‌سازی	۷-۴
۹۱	..... نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۵
۹۱	..... نتیجه‌گیری	۱-۵
	..... پیشنهادها	۲-۵
۹۴	..... فهرست مراجع	
۹۷	..... واژه‌نامه‌ی فارسی به انگلیسی	
۱۰۰	..... واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی	

فهرست علائم و نشانه‌ها

علائم اختصاری	عنوان
E	انرژی جنبشی
m	جرم
V_w	سرعت باد
ρ	چگالی وزنی هوا
A	سطح موثر
C_p	ضریب توان رتور
λ	نسبت سرعت خطی نوک پره‌ها به سرعت باد
w_{rot}	سرعت زاویه‌ای نوک پره‌ها
θ	زاویه گام پره
t	زمان
P	تعداد قطب‌ها
f	فرکانس
n	سرعت خطی
ω_m	سرعت مکانیکی محور
ω_s	سرعت زاویه‌ای ولتاژ استاتور
ω_r	سرعت زاویه‌ای ولتاژ رتور
s	لغزش
P_s	توان استاتور
P_r	توان رتور

P_m	توان مکانیکی محور
β	زاویه پره
D_t	میرایی خودی توربین
D_g	میرایی خودی ژنراتور
D_m	میرایی متقابل
K_{sh}	سختی محور
T_T	گشتاور توربین
T_{sh}	گشتاور محور
J_t	ضریب اینرسی توربین
J_g	ضریب اینرسی ژنراتور
ω_t	سرعت زاویه‌ای توربین
ω_g	سرعت زاویه‌ای ژنراتور
θ_t	زاویه توربین
θ_g	زاویه ژنراتور
v_{ds}	ولتاژ استاتور محور d ژنراتور
v_{qs}	ولتاژ استاتور محور q ژنراتور
v_{os}	ولتاژ استاتور محور خنثی ژنراتور
v_s	ولتاژ استاتور ژنراتور
v_{dr}	ولتاژ رتور محور d ژنراتور
v_{qr}	ولتاژ رتور محور q ژنراتور
v_{or}	ولتاژ رتور محور خنثی ژنراتور
v_r	ولتاژ رتور ژنراتور
i_{ds}	جریان استاتور محور d ژنراتور

i_{qs}	جریان استاتور محور q ژنراتور
i_{os}	جریان استاتور محور خنثی ژنراتور
i_s	جریان استاتور ژنراتور
i_{dr}	جریان رتور محور d ژنراتور
i_{qr}	جریان رتور محور q ژنراتور
i_{or}	جریان رتور محور خنثی ژنراتور
i_r	جریان رتور ژنراتور
ψ_{ds}	شار پیوندی استاتور محور d ژنراتور
ψ_{qs}	شار پیوندی استاتور محور q ژنراتور
ψ_{dr}	شار پیوندی رتور محور d ژنراتور
ψ_{qr}	شار پیوندی رتور محور q ژنراتور
λ_{ds}	شاردور استاتور محور d ژنراتور
λ_{qs}	شاردور استاتور محور q ژنراتور
λ_{dr}	شاردور رتور محور d ژنراتور
λ_{qr}	شاردور رتور محور q ژنراتور
λ_s	شاردور استاتور ژنراتور
λ_r	شاردور رتور ژنراتور
γ	زاویه بین دو شاردور λ_s و λ_r
R_s	مقاومت استاتور ژنراتور
R_r	مقاومت رتور ژنراتور
L_s	ضریب القایی استاتور ژنراتور
L_r	ضریب القایی رتور ژنراتور
L_m	ضریب القایی متقابل ژنراتور

X_s	اندوکتانس استاتور ژنراتور
X_r	اندوکتانس رتور ژنراتور
X_m	اندوکتانس متقابل ژنراتور
ω_s	سرعت زاویه‌ای شبکه
ω_b	سرعت زاویه‌ای پایه
ω_r	سرعت زاویه‌ای رتور
T_{em}	گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور
T_m	گشتاور مکانیکی ژنراتور

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۵	جدول ۱-۲: ظرفیت نصب شده در نیروگاه منجیل و رودبار [۴۶].....
۱۶	جدول ۲-۲: ظرفیت نصب شده نیروگاه بینالود [۴۶].....
۳۳	جدول ۳-۲: حالات عملکرد ممکن برای ژنراتور القایی تغذیه دوگانه.....
۳۶	جدول ۴-۲: مزایا و معایب انواع ژنراتورها.....
۵۰	جدول ۱-۳: مدل ژنراتورهای القایی با مراتب مختلف.....
۶۳	جدول ۱-۴: چگونگی انتخاب بردارهای ولتاژ مناسب.....
۷۱	جدول ۲-۴: الگوی انتخاب بردار ولتاژ مناسب.....

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۴	شکل ۱-۲: رشد انرژی باد در تولید انرژی [۴۵].....
۱۶	شکل ۲-۲: اجزای بکار رفته در یک نمونه از توربین بادی.....
۱۸	شکل ۳-۲: جریان باد در اطراف توربین.....
۱۹	شکل ۴-۲: نمودار ضریب عملکرد رتور.....
۲۱	شکل ۵-۲: منحنی توان - سرعت [۴۹].....
۲۷	شکل ۶-۲: منحنی توان سرعت با دو سرعت سنکرون.....
۲۸	شکل ۷-۲: نحوه اتصال ژنراتورهای القایی قفس سنجابی به شبکه.....
۲۹	شکل ۸-۲: نحوه اتصال سیستم راه انداز به ژنراتور القایی.....
۳۱	شکل ۹-۲: نحوه اتصال DFIG به شبکه.....
۳۳	شکل ۱۰-۲: منحنی عملکرد یک ژنراتور DFIG (الف) زیر سنکرون (ب) فوق سنکرون.....
۳۵	شکل ۱۱-۲: نحوه اتصال ژنراتورهای SG.....
۳۷	شکل ۱۲-۲: هزینه تقریبی قسمت‌های مختلف یک توربین بادی.....
۳۸	شکل ۱۳-۲: سهم انواع مختلف ژنراتورها در نیروگاههای بادی [۵۳].....
۴۱	شکل ۱-۳: نمودار C_p بر حسب λ برای مقادیر مختلف زاویه ی پره.....
۴۲	شکل ۲-۳: مدل نظری جعبه دنده شامل سرعت، گشتاور و میرایی های رتور و ژنراتور.....
۴۷	شکل ۳-۳: بلوک شبیه سازی ژنراتور به روش فضای حالت.....
۴۸	شکل ۴-۳: مدل ماشین پیاده سازی شده در محیط Matlab/Simulink با قابلیت تخمین پارامترها.....
۵۲	شکل ۵-۳: کنترل اعمال شده در سمت رتور ژنراتور.....
۵۶	شکل ۱-۴: شمای کلی کنترل ماشین القایی به روش DTC.....

- شکل ۴-۲: نمایش بردارهای شار استاتور و رتور و جریان های استاتور (با صرفنظر از مقاومت استاتور). ۵۷
- شکل ۴-۳: بلوک دیاگرام تخمین گر شار و گشتاور (Flux and torque estimator). ۵۹
- شکل ۴-۴: بلوک دیاگرام یک اینورتر منبع ولتاژ سه فاز. ۶۰
- شکل ۴-۵: نمایش بردارهای مبدل دو سطحی. ۶۱
- شکل ۴-۶: تأثیر بردارهای شش گانه روی شار استاتور و گشتاور موتور. ۶۲
- شکل ۴-۷: تقسیم بندی فضای کار موتور در یک سیکل. ۶۳
- شکل ۴-۸: دیاگرام فازوری جهت یابی میدان ماشین القایی. ۶۵
- شکل ۴-۹: بلوک دیاگرام عمومی برای سیستم کنترل جهت یابی میدان. ۶۷
- شکل ۴-۱۰: طرح جهت یابی مستقیم میدان. ۶۸
- شکل ۴-۱۱: ولتاژ خروجی تولیدی توسط بردارهای فضایی. ۶۹
- شکل ۴-۱۲: الگوی کلیدزنی در وضعیتی از مقادیر احتمالی Δi_d و Δi_q زاویه رتور. ۷۱
- شکل ۴-۱۳: اینورتر پل تک فاز با بار غیر خطی. ۷۲
- شکل ۴-۱۴: نحوه ردیابی جریان مرجع در یک پریود T. ۷۴
- شکل ۴-۱۵: طرح مدار فیلتر اکتیو موازی. ۷۵
- شکل ۴-۱۶: مدار ماشین القایی در مرجع dq. ۷۷
- شکل ۴-۱۷: شماتیک مدل شبیه سازی شده مزرعه بادی در شبکه قدرت و محل وقوع خطا. ۸۲
- شکل ۴-۱۸: شکل موج سه فاز در پایانه خروجی ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین خطا و پس از آن. ۸۳
- شکل ۴-۱۹: کاهش اندازه ولتاژ به ۱۰ درصد مقدار نامی آن و تغییرات شکل موج ولتاژ استاتور در حین خطا. ۸۴
- شکل ۴-۲۰: شکل موج جریان استاتور فاز b بدون استفاده از روش کنترلی جریان پیشگویانه. ۸۵
- شکل ۴-۲۱: شکل موج جریان استاتور فاز b با استفاده از روش کنترلی جریان پیشگویانه. ۸۵
- شکل ۴-۲۲: شکل موج توان اکتیو خروجی از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا. ۸۶

شکل ۴-۲۳: شکل موج توان راکتیو خروجی از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا.. ۸۶

شکل ۴-۲۴: شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه در حین و پس از خطا.

۸۷

شکل ۴-۲۵: پارامترهای ماشین اعمالی به کنترل اصلی..... ۸۸

شکل ۴-۲۶: تبدیل کد بردار به سیگنال‌های آتش مناسب برای اینورتر..... ۸۹

شکل ۴-۲۷: دیاگرام شبیه سازی شده حافظه موقت برای تثبیت فرکانس کلیدزنی..... ۸۹

فصل اول

مروری بر کارهای گذشته

امروزه به علت کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش نگرانی‌ها در مورد افزایش آلودگی و گرمای زمین، تمایل به استفاده از منابع غیر فسیلی و تجدید پذیر جهت تولید برق افزایش یافته است. منابع متفاوت تجدید پذیر مانند خورشید، زمین گرمایی، باد و غیره برای این منظور معرفی شده‌اند که در حال حاضر انرژی باد از سایر موارد مورد بیشترین توجه قرار گرفته و بیشترین رشد را داشته است به طوری که بسیاری از کشورها مانند آلمان و دانمارک برنامه ریزی بلند مدتی انجام داده‌اند تا در چند سال آینده بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی خود را از طریق باد تأمین نمایند. انرژی باد و توربین‌های بادی در ابتدا به عنوان تلمبه‌هایی جهت بالا کشیدن آب از زیر زمین استفاده می‌شدند ولی با پیشرفت تکنولوژی فکر استفاده از این توربین‌ها برای تولید برق به ذهن بشر رسوخ کرد. همچنین همان‌طور که از نشانه‌هایی که توسط باستان‌شناسان کشف شده است توربین‌های بادی در ابتدا به صورت محور عمودی بوده‌اند که بسیاری از آنان در ایران یافت شده است. استفاده از باد جهت تولید برق در ابتدا ساده به نظر می‌رسد زیرا با استفاده از این نیرو و گرداندن یک ژنراتور می‌توان برق تولید کرد. با این حال عملاً بکار بردن این نیرو نیاز به تکنولوژی نسبتاً پیچیده‌ای دارد که یکی از دلایل آن غیر قابل پیش بینی و غیر قابل کنترل بودن نیروی باد می‌باشد. این نیرو مانند آب در پشت سدها قابل مهار نبوده و در ابتدا جهت کنترل آن باید فکری شود. به همین منظور جهت افزایش کارایی و کیفیت برق تولیدی از این نیروگاه‌ها روش‌های متفاوتی از جمله مکانیکی و الکتریکی اجرا شده و همچنان به علت تازگی این نوع تکنولوژی در حال انجام است.

انرژی باد نظیر سایر منابع انرژی تجدید پذیر از نظر جغرافیایی گسترده و در عین حال به صورت پراکنده و غیر متمرکز و تقریباً همیشه در دسترس می‌باشد. انرژی باد طبیعتی نوسانی و متناوب داشته و وزش دائمی ندارد. هزاران سال است که انسان با استفاده از آسیاب‌های بادی تنها جزء بسیار کوچکی از آن را استفاده می‌کند. این انرژی تا پیش از انقلاب صنعتی به عنوان یک منبع انرژی به طور گسترده‌ای مورد بهره‌برداری قرار می‌گرفت، ولی در دوران انقلاب صنعتی، استفاده از سوخت‌های فسیلی به دلیل

ارزانی و قابلیت اطمینان بالا جایگزین انرژی باد شد. در این دوره توربین‌های بادی قدیمی دیگر از نظر اقتصادی قابل رقابت با بازار انرژی‌های نفت و گاز نبودند. تا اینکه در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۸ دو شوک بزرگ نفتی ضربه بزرگی به اقتصاد انرژی‌های حاصل از نفت و گاز وارد آورد. به این ترتیب هزینه انرژی تولید شده به وسیله توربین‌های بادی، در مقایسه با نرخ جهانی قیمت انرژی بهبود یافت. پس از آن مراکز و مؤسسات تحقیقاتی و آزمایشگاهی متعددی در سراسر دنیا به بررسی تکنولوژی‌های مختلف جهت استفاده از انرژی باد به عنوان یک منبع بزرگ انرژی پرداختند. به علاوه این بحران باعث ایجاد تمایلات جدیدی در زمینه کاربرد تکنولوژی انرژی باد جهت تولید برق متصل به شبکه، پمپاژ آب و تأمین انرژی الکتریکی نواحی دور افتاده شد. همچنین در سال‌های اخیر مشکلات زیست محیطی و مسائل مربوط به تغییر آب و هوای کره زمین به علت استفاده از منابع انرژی فسیلی بر شدت این تمایلات افزوده است.

تاریخچه استفاده از ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه (DFIG) در بین ژنراتورهای توربین بادی چند-مگاواتی (WTG) افزون بر ۲۰ سال است. به دلیل بحران قیمت نفت در دهه ۷۰ میلادی تلاش‌های ارزشمندی در آلمان و آمریکا صرف توسعه ژنراتورهای توربین بادی چند-مگاواتی برای پیوستن به سیستم‌های انتقال و توزیع الکتریکی شده است.

از سال ۱۹۷۵ پیشرفت‌های شگرفی در زمینه توربین‌های بادی در جهت تولید برق به عمل آمده است. در سال ۱۹۸۰ اولین توربین برق بادی متصل به شبکه سراسری نصب گردید. بعد از مدت کوتاهی اولین مزرعه برق بادی چند مگاواتی در آمریکا نصب و به بهره برداری رسید.

در پایان سال ۱۹۹۰ ظرفیت توربین‌های برق بادی متصل به شبکه در جهان به ۲۰۰ مگاوات رسید که توانایی تولید سالیانه ۳۲۰۰ گیگا وات ساعت برق را داشته که تقریباً تمام این تولید مربوط به ایالت کالیفرنیا آمریکا و کشور دانمارک بود. امروزه کشورهای دیگری نظیر هلند، آلمان، بریتانیا، ایتالیا، اسپانیا، چین و هندوستان برنامه‌های ملی پروژه‌ای را در جهت توسعه و عرضه تجاری انرژی باد آغاز کرده‌اند.

در طی دهه گذشته هزینه‌های تولید انرژی به کمک توربین‌های بادی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. در حال حاضر توربین‌های بادی از کارایی و قابلیت اطمینان بیشتری در مقایسه با ۱۵ سال پیش برخوردارند. با این همه استفاده وسیع از سیستم‌های مبدل انرژی باد (WECS) هنوز آغاز نگردیده

است. در مباحث مربوط به انرژی باد بیشتر تاکیدها بر توربین‌های بادی مولد برق جهت اتصال به شبکه است زیرا این نوع از کاربرد انرژی باد می‌تواند سهم مهمی در تأمین برق مصرفی جهان داشته باشد. بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط انجمن انرژی بادی (WWEA) انرژی بادی تا سال ۲۰۲۰ قادر به تأمین حداقل ۱۲٪ از برق مصرفی جهان خواهد بود و همچنین ظرفیت نصب شده جهانی در این سال به حداقل ۱۵۰۰ گیگاوات خواهد رسید. به طور کلی با استفاده از انرژی باد به عنوان یک منبع انرژی در دراز مدت می‌توان دو برابر مصرف انرژی الکتریکی فعلی جهان را تأمین کرد.

۱-۲- پیشینه پژوهشی

استفاده از نیروی باد برای تولید برق با بکار بردن توربین‌های بادی ساده شروع شد ولی برق تولیدی آن‌ها از کیفیت و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار نبود. در ابتدا با اضافه کردن تجهیزاتی به همان نوع توربین‌ها سعی در بهبود برق تولیدی نمودند و تلاش‌ها فقط در جهت شبیه‌سازی خود توربین بادی صورت می‌گرفت [۱] و [۲]. به عنوان مثال در [۳] با استفاده از مدل درجه پنجم DFIG یک مدل ساده استخراج نموده و تأثیر خطاهای مختلف را بر مدل پیشنهادی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC آزمایش کرده است. با این حال نتایج حاصل از شبیه‌سازی را می‌توان مشابه با نتایج یک مدل پیچیده‌تر نیز دید. با گذشت زمان به طور کلی توربین‌های بادی جدید و پیشرفته‌تری پیشنهاد و به شبکه متصل گردید؛ بنابراین بررسی تأثیر آن‌ها بر شبکه لازم به نظر می‌رسید. [۴] به بررسی تأثیر توربین بادی بر پارامترهای شبکه و پایداری آن در هنگام اتصال به شبکه پرداخته ولی روشی را جهت بهبود آن ارائه نداده است. [۵] توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه را در یک شبکه بسیار ساده ولی نامتقارن مدل کرده و برای بهبود کارایی آن در کنترلرها (DFIG) پارامترهای توالی مثبت و منفی را پس از جداسازی به طور مجزا کنترل نموده است ولی نوآوری در استفاده از کنترلرهای پیچیده‌تر یا تغییر نوع مبدل‌ها دیده نمی‌شود. همچنین با اعمال یک فیلتر در خروجی توربین بادی در حقیقت خواننده را از مشاهده خروجی واقعی توربین بادی محروم کرده است.