

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پایان نامه کارشناسی ارشد  
مهندسی برق - قدرت

عنوان:

بهبود قابلیت گذر از خطای توربین‌های بادی دارای DFIG متصل به شبکه با  
استفاده از محدود کننده جریان خطا و سیستم ذخیره انرژی مغناطیسی

استاد راهنما:

دکتر مهرداد طرفدارحق

دکتر سجاد توحیدی

استاد مشاور:

دکتر سعید قاسم‌زاده

پژوهشگر:

همایون ابراهیمی علمداری

بهمن ۱۳۹۳

تقدیم به:

مادر عزیزتر از جانم

سنگ صبوری که الفبای زندگی به من آموخت.

## تقدیر و تشکر

سپاس خداوندی را که بر ما منت نهاد و توفیق فراگیری علم را نصیبمان کرد. اکنون که به لطف خداوند موفق به اتمام پایان نامه کارشناسی ارشد شده‌ام، لازم می‌دانم از همه کسانی که به نحوی مرا در این زمینه یاری نمودند تشکر نمایم. به خصوص از اساتید گران‌مایه، جناب آقای دکتر مهرداد طرفدارحق و جناب آقای دکتر سجاد توحیدی که راهنمایی این پایان‌نامه را به عهده داشتند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم. دانش و روش این اساتید بزرگوار در انجام این کار بسیار موثر بود.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر سعید قاسم‌زاده که از راهنمایی ایشان نهایت بهره را جستم، تشکر می‌نمایم. همچنین از آقای دکتر مهدی عباپور که در جلسه دفاعیه این جانب حاضر شده و نکات سودمندی را یادآوری نمودند سپاسگزارم.

## چکیده

ایراد اصلی توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی از دوسو تغذیه<sup>۱</sup> (DFIG) عملکرد آن‌ها در طی بروز خطا در شبکه می‌باشد. در این پایان‌نامه یک روش جدید برای عملکرد بی‌وقفه<sup>۲</sup> (LVRT) توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی از دوسو تغذیه در طی بروز خطا در شبکه ارائه شده است. یک محدودکننده جریان خطای حالت جامد به طور سری با مدار روتور قرار گرفته است. در طی بروز خطا محدودکننده جریان یک سلف بزرگ را وارد مدار روتور می‌کند تا از افزایش جریان در مدار روتور جلوگیری کند. هنگامی که خطا رفع شد سلف نیز از مدار روتور خارج می‌شود. همچنین از یک ذخیره ساز مغناطیسی انرژی<sup>۳</sup> (SMES) برای تامین توان راکتیو مورد نیاز در طی بروز خطا و صاف کردن توان اکتیو تزریقی توربین بادی به شبکه در زمان کار کرد عادی سیستم، استفاده شده است. صحت عملکرد روش با شبیه سازی سیستم قدرت نمونه در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink تایید شده است.

---

۱- Doubly Fed Induction Generator

۲- Low Voltage Ride Through

۳- Superconducting Magnetic Energy Storage

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	چکیده.....
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۳	مقدمه.....
<b>فصل دوم: بررسی منابع</b>	
۱۵	۱-۲- توربینهای بادی.....
۱۵	۱-۱-۲- انواع توربینهای بادی.....
۱۵	۲-۱-۲- خصوصیات استاتیکی.....
۱۷	۳-۱-۲- اجزای نیروگاه بادی.....
۱۸	۴-۱-۲- انواع مختلف توربینهای سرعت متغیر.....
۱۸	۱-۴-۱-۲- ژنراتورهای سنکرون.....
۱۸	۱-۱-۴-۱-۲- ژنراتور سنکرون باسیم پیچی میدان.....
۱۹	۲-۱-۴-۱-۲- ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم.....
۲۰	۲-۴-۱-۲- ژنراتورهای القایی.....
۲۰	۱-۲-۴-۱-۲- ژنراتور القایی از دوسو تغذیه (DFIG).....
۲۲	۲-۲-۴-۱-۲- ژنراتور القایی روتور قفسی.....
۲۳	۳-۴-۱-۲- انواع دیگر ژنراتورهای توربینهای بادی.....
۲۳	۵-۱-۲- انواع روشهای اتصال توربین های بادی در مزرعه بادی.....
۲۶	۶-۱-۲- سیستمهای قدرت بادی مجهز به DFIG.....
۲۹	۲-۲- محدود کننده جریان خطا.....
۳۰	۱-۲-۲- راکتورهای محدود کننده جریان خطا.....
۳۱	۲-۲-۲- محدود کننده جریان خطای هسته اشباع شده.....
۳۳	۳-۲-۲- Is-Limiter.....
۳۵	۴-۲-۲- محدود کننده جریان خطای حالت جامد (SSFCL).....
۳۷	۵-۲-۲- محدود کننده جریان خطای ابررسانا (SFCL).....
۳۷	۱-۵-۲-۲- نوع مقاومتی.....
۳۹	۲-۵-۲-۲- نوع سلفی.....
۳۹	۳-۲-۲- نوع راکتور DC.....
۴۱	۳-۲- ذخیره سازی انرژی.....

## فصل سوم: مدلسازی و کنترل

۴۸	۱-۳- ژنراتور القایی از دو سو تغذیه
۴۹	۱-۱-۳- مدل ماشین
۵۱	۲-۱-۳- کنترل DFIG
۵۹	۲-۳- محدود کننده جریان خطا حالت جامد
۶۰	۱-۲-۳- مدار محدود کننده جریان خطا
۶۱	۲-۲-۳- کنترل محدود کننده جریان خطا
۶۲	۳-۳- ذخیره ساز مغناطیسی انرژی
۶۲	۱-۳-۳- ساختار ذخیره ساز مغناطیسی انرژی با ابرسانا
۶۳	۲-۳-۳- مدل کردن SMES
۶۵	۳-۳-۳- کنترل مبدل VSC
۶۶	۴-۳-۳- مدل سازی و کنترل چا پر DC به DC

## فصل چهارم: نتایج شبیه سازی

۶۹	۱-۴- صاف کردن توان خروجی توربین بادی
۷۰	۲-۴- قابلیت گذر از خطای توربین بادی
۷۱	۳-۴- سیستم قدرت نمونه
۷۲	۴-۴- نتایج حاصل از شبیه سازی
۷۲	۱-۴-۴- نوسان توان خروجی توربین بادی
۷۳	۲-۴-۴- نوسان توان خروجی توربین بادی و استفاده از SMES
۷۵	۳-۴-۴- وقوع خطا در شبکه و توربین بادی بدون SMES و SSFCL
۷۷	۴-۴-۴- وقوع خطا در شبکه و حفاظت توربین بادی با SFCL
۸۰	۵-۴-۴- وقوع خطا در شبکه و حفاظت توربین بادی با SMES
۸۲	۶-۴-۴- وقوع خطا در شبکه و حفاظت توربین بادی با SMES و FCL

## فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۸۶	۱-۵- نتیجه گیری
۸۷	۲-۵- پیشنهادات
۸۸	ضمیمه:
۸۹	منابع:

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۹	شکل (۱-۱) اجزای اصلی سیستم توربین بادی [۸]
۱۵	شکل (۲-۱) برش پره توربین بادی [۱]
۱۶	شکل (۲-۲) مدل‌سازی توربین بادی [۱۱]
۱۷	شکل (۲-۳) نمودار ضریب قدرت [۱۱]
۱۷	شکل (۲-۴) اجزای داخلی توربین بادی [۱۲]
۱۸	شکل (۲-۵) ژنراتور سنکرون با سیمپیچی میدان [۱۳]
۱۹	شکل (۲-۶) ژنراتور سنکرون مغناطیس دایم [۱۳]
۲۰	شکل (۲-۷) ژنراتور سنکرون مغناطیس دایم با مبدل PWM [۱۳]
۲۱	شکل (۲-۸) ژنراتور القایی از دو سوتغذیه [۱۳]
۲۲	شکل (۲-۹) ژنراتور القایی از دو سو تغذیه تمام کنترلی [۱۹]
۲۲	شکل (۲-۱۰) ژنراتور القایی قفس سنجابی [۱۳]
۲۴	شکل (۲-۱۳) انواع اتصال توربینهای بادی در مزارع بادی [۶]
۲۷	شکل (۲-۱۴) منحنی LVRT شبکه قدرت چندین کشور صنعتی [۲۱]
۲۸	شکل (۲-۱۵) منحنی LVRT شبکه قدرت کشور آلمان [۲۱]
۳۱	شکل (۲-۱۶) برخی اتصالات متداول CLR [۲۹]
۳۲	شکل (۲-۱۷) منحنی مغناطیس شونده مواد فرومغناطیس (آهن) [۳۴]
۳۳	شکل (۲-۱۸) ساختار کلی یک محدود کننده جریان خطای هسته اشباع شده تکفاز [۳۴]
۳۳	شکل (۲-۱۹) تغییرات منحنی $(\varphi-I)$ محدود کننده جریان خطا از نوع هسته اشباع شده [۳۴]
۳۴	شکل (۲-۲۰) ساختار IS-LIMITER [۳۵]
۳۶	شکل (۲-۲۱) نمونه ای از ساختارهای محدود کننده جریان خطای حالت جامد با عملکرد رزونانسی [۳۶]
۳۷	شکل (۲-۲۲) ساختار محدود کننده جریان خطای حالت جامد اندوکتانسی [۳۷]
۳۸	شکل (۲-۲۳) مدل یک سیستم ابررسانا در دماها و جریانهای مختلف [۴۲]
۳۸	شکل (۲-۲۴) تغییرات مقاومت ابررسانا با تغییرات دما [۴۲]
۳۸	شکل (۲-۲۵) تغییرات مقاومت ابررسانا با تغییرات چگالی جریان [۴۲]
۳۹	شکل (۲-۲۶) مدل مداری یک محدود کننده جریان خطای ابررسانای نوع سلفی [۴۳]
۳۹	شکل (۲-۲۷) ساختارهای مختلف محدود کننده جریان خطای ابررسانای نوع راکتور DC تکفاز [۴۴]
۴۰	شکل (۲-۲۸) ساختار محدود کننده جریان خطای ابررسانای نوع راکتور DC در حالت سه فاز [۴۴]
۴۱	شکل (۲-۲۹) ساختار محدود کننده جریان خطا بدون استفاده از ابررسانا [۴۵]
۴۸	شکل (۳-۱) ساختار DFIG [۵۴]
۴۹	شکل (۳-۲) نحوه اتصال مبدل سمت روتور و شبکه به ژنراتور [۵۵]



شکل (۳-۳) ساختار اصلی RSC [۵۶].....	۵۳
شکل (۳-۴) نمای لینک DC [۵۶].....	۵۴
شکل (۳-۵) ساختار اصلی کنترل GSC [۵۶].....	۵۵
شکل (۳-۶) حلقه کنترل جریان مبدل سمت شبکه [۱۱].....	۵۶
شکل (۳-۷) حلقه کنترل ولتاژ لینک DC [۱۱].....	۵۷
شکل (۳-۸) طراحی حلقه کنترل جریان برای ثابت نگه داشتن فرکانس کلیدزنی [۱۱].....	۵۸
شکل (۳-۹) حلقه کنترل جریان مبدل سمت روتور با در نظر گرفتن دینامیک PWM [۱۱].....	۵۸
شکل (۳-۱۰) حلقه کنترل سرعت DFIG [۱۱].....	۵۹
شکل (۳-۱۱) مدار محدود کننده جریان خطا در لینک DC.....	۶۱
شکل (۳-۱۲) بلوک دیاگرام کنترل کننده محدود کننده جریان خطا [۳۸].....	۶۲
شکل (۳-۱۳) ساختار کلی یک سیستم ذخیره ساز مغناطیس انرژی با ابرسانا [۴۶].....	۶۳
شکل (۳-۱۴) ساختار کلی مدارات قدرت یک SMES [۵۸].....	۶۴
شکل (۳-۱۵) عملکرد چاپر DC به DC در دو حالت شارژ و دشارژ [۵۸].....	۶۵
شکل (۳-۱۶) ساختار کنترلی مبدل VSC [۵۸].....	۶۶
شکل (۳-۱۷) ساختار کنترلی مبدل DC به DC از نوع باک/بوست [۵۸].....	۶۷
شکل (۴-۱) ساختار SMES مورد استفاده در DFIG [۵۳].....	۶۹
شکل (۴-۲) ساختار FCL مورد استفاده در مدار روتور.....	۷۰
شکل (۴-۳) سیستم قدرت نمونه.....	۷۱
شکل (۴-۴) سرعت باد اعمال شده به توربین.....	۷۲
شکل (۴-۵) توان تزریقی توربین بادی به شبکه طی نوسان در سرعت باد اعمال شده به توربین بدون SMES.....	۷۳
شکل (۴-۶) صاف کردن نوسان توان تزریقی توربین بادی به شبکه توسط SMES.....	۷۴
شکل (۴-۷) ولتاژ باس B۲ طی وقوع خطا در سیستم قدرت بدون حفاظت DFIG و سیستم SMES.....	۷۵
شکل (۴-۸) جریان روتور طی وقوع خطا در سیستم قدرت بدون حفاظت و ذخیره ساز انرژی.....	۷۶
شکل (۴-۹) توان راکتیو تزریقی باس B۲ به شبکه طی وقوع خطا در سیستم قدرت بدون حفاظت.....	۷۶
شکل (۴-۱۰) ولتاژ باس B۱ طی وقوع خطا در سیستم قدرت بدون حفاظ.....	۷۷
شکل (۴-۱۱) ولتاژ لینک DC توربین بادی طی وقوع خطا در سیستم قدرت بدون حفاظ.....	۷۷
شکل (۴-۱۲) جریان روتور طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود FCL.....	۷۸
شکل (۴-۱۳) توان راکتیو تزریقی باس B۲ به شبکه طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود FCL.....	۷۸
شکل (۴-۱۴) ولتاژ باس B۱ طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود FCL.....	۷۹
شکل (۴-۱۵) ولتاژ لینک DC توربین بادی طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود FCL.....	۷۹
شکل (۴-۱۶) جریان روتور طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود FCL.....	۸۰

- شکل (۴-۱۷) توان راکتیو تزریقی باس B۲ به شبکه طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود SMES ..... ۸۱
- شکل (۴-۱۸) ولتاژ باس B۱ طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود SMES ..... ۸۱
- شکل (۴-۱۹) ولتاژ لینک DC توربین بادی طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود SMES ..... ۸۱
- شکل (۴-۲۰) جریان روتور طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود FCL و SMES ..... ۸۳
- شکل (۴-۲۱) توان راکتیو تزریقی باس B۲ به شبکه طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود SMES و FCL ..... ۸۳
- شکل (۴-۲۲) ولتاژ باس B۱ طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود SMES و FCL ..... ۸۴
- شکل (۴-۲۳) ولتاژ لینک DC توربین بادی طی وقوع خطا در سیستم قدرت با وجود FCL ..... ۸۴

## فهرست نمودارها

صفحه	عنوان
۴.....	نمودار (۱ - ۱) تغییرات سالیانه هزینه تولید انرژی الکتریکی بادی [۲]
۴.....	نمودار (۱-۲) ظرفیت تولید و درصد رشد نیروگاه های بادی نصب شده در جهان [۴]
۸.....	نمودار (۱-۳) تغییرات ظرفیت انواع نیروگاهها در اتحادیه اروپا از سال ۲۰۰۰ تا انتهای سال ۲۰۱۳ [۶]

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۵.....	جدول (۱-۱) هزینه های مربوط به ساخت یک توربین بادی ۲ مگاواتی [۲]
۷.....	جدول (۱-۲) ظرفیت نیروگاههای بادی نصب شده در ده کشور برتر [۵]
۸.....	جدول (۱-۳) رشد اندازه توربینهای بادی [۵]
۲۶.....	جدول (۲-۱) مقایسه بین انواع توپولوژی اتصال توربین بادی در مزرعه بادی [۶]
۴۲.....	جدول (۳-۱) دسته بندی کلی ذخیره سازهای انرژی [۴۶]

# فصل اول

## مقدمه

تاریخ استفاده از انرژی باد به دوران باستان بر می‌گردد، هنگامی که از آن برای حرکت کشتی‌های بادی در دریا استفاده می‌گردید. کاربرد بیشتر انرژی باد از ایران سرچشمه گرفته شده که از آن برای آسیاب گندم استفاده می‌شد. بعد از فتح ایران توسط اعراب، این فن‌آوری به مناطق در اختیار اعراب و چین منتقل شد. در اروپا، توربین‌های بادی در قرن یازدهم میلادی ساخته شد و بعد از دو قرن به یک وسیله بسیار مهم تبدیل شد. اولین توربین بادی برای تولید انرژی الکتریکی توسط چارلز براش<sup>۱</sup> که تحقیقات آن بر عهده لاکور در دانمارک بود در کلیولند<sup>۲</sup> اوهایو<sup>۳</sup> آمریکا ساخته شد. این توربین دارای ۱۴۴ پره بود تا استحکام بیشتری پیدا کند، با سرعت کمی می‌چرخید و دارای جعبه دنده بود. قطر این توربین ۱۸/۳ متر و ارتفاع مرکز توربین از سطح زمین ۱۶/۸ متر و کل وزن آن ۴۰ تن و توان آن ۱۲ کیلو وات بود و نوع ژنراتور آن DC بود که از سال ۱۸۸۸ تا ۱۹۰۰ انرژی الکتریکی عمارت چارلز براش را تامین می‌کرد. با وجود این که باد رایگان بود، اما به خاطر هزینه بالای سرمایه‌گذاری و نگهداری آن، در سال ۱۹۰۰ کار آن متوقف شد و انرژی الکتریکی مورد نیاز عمارت بزرگ براش از شبکه کلیولند تامین شد.

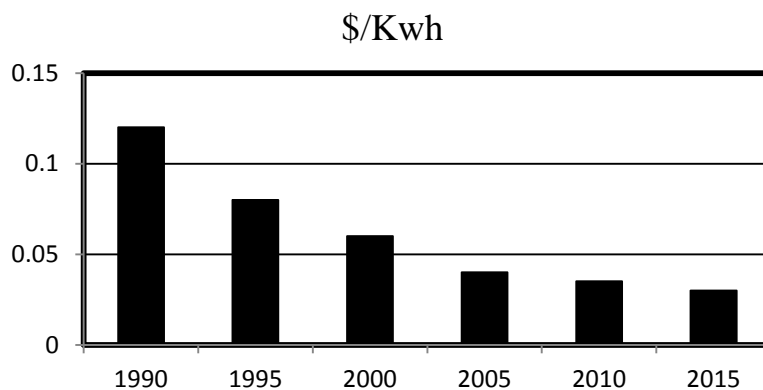
در سال ۱۹۳۹، ساخت ژنراتورهای بادی بزرگ در ورمونت<sup>۴</sup> آمریکا آغاز شد. توان نامی این ژنراتورها ۱/۳ مگاوات در سرعت باد ۱۵ m/s بود و قطر توربین به ۵۳ متر می‌رسید. در سال ۱۹۴۱، تغذیه مستقیم شبکه قدرت به صورت سنکرون انجام گرفت اما به خاطر نقص در طراحی پره‌ها در سال ۱۹۴۵ کار آن متوقف شد. بعد از جنگ جهانی دوم، به خاطر ارزان شدن قیمت نفت، تحقیقات زیادی روی انرژی‌های جایگزین که انرژی باد نیز شامل آن بود، صورت نگرفت. تا اینکه در سال ۱۹۷۳ به خاطر بحران نفتی، علاقه زیادی در استفاده از انرژی‌های جایگزین به خصوص انرژی باد ایجاد شد و بودجه‌های سرمایه‌گذاری زیادی را به خود اختصاص داد که منجر به تاسیس مزارع بادی<sup>۲</sup> شد.

---

Charles Brush -۱  
Cleveland -۲  
Ohio -۳  
Vermont -۴  
Wind Farm -۱

ماشین‌های اولیه به کار رفته در این مزارع، از لحاظ عملکرد ناامید کننده بود و قیمت نگهداری از آن‌ها هم بالا بود. به طور مثال در اوایل دهه ۸۰ میلادی، هزینه هر ۱Kw/h انرژی الکتریکی بادی ۲۵ سنت بود ولی امروزه این هزینه به کمتر از ۵ سنت رسیده است [۲].

نمودار (۱-۱) تغییرات سالیانه قیمت انرژی الکتریکی بادی را بین سالهای ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ میلادی را نشان می‌دهد [۲].



نمودار (۱ - ۱) تغییرات سالیانه هزینه تولید انرژی الکتریکی بادی [۲]

عواملی که باعث شده تا امروزه تولید برق از انرژی باد از لحاظ اقتصادی قابل رقابت باشد موارد زیر است [۳]:

- مشوقها و کمک‌های دولتی.
- رشد صنایع بادی که بازده آیرودینامیکی توربین‌های خود را بهبود داده‌اند.
- پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت و روشهای کنترل جدید برای توربین‌های سرعت متغیر که اجازه می‌دهند عملکرد توربین بادی بهینه باشد.

در کنار مسایل اقتصادی، نیروگاه‌های بادی از نظر زیست محیطی نیز قابل رقابت با انواع نیروگاه‌های رایج هستند که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- نیروگاه‌های بادی گاز کربن دی اکسید و یا گازهای سمی دیگری تولید نمی‌کنند.
- عملکرد نیروگاه‌های بادی هیچ‌گونه پس‌ماند و فاضلابی مانند نیروگاه‌های اتمی ایجاد نمی‌کند.

- در مکان‌هایی که مزارع بادی قرار دارند می‌توان به طور هم زمان از آن مکان‌ها استفاده‌های دیگری مانند کشاورزی و دامداری کرد.

عدم نیاز به سوخت یکی از مهم‌ترین مزایای انرژی باد است که موجب صرفه جویی در ذخایر نفتی می‌شود. این مزیت چنان قابل توجه است که می‌تواند به سادگی افزایش سهم انرژی باد در تأمین انرژی الکتریکی در بیشتر کشورهای دنیا را توجیه کند. تقریباً ۷۵ درصد از کل هزینه مربوط به انرژی باد مربوط به قیمت توربین، سازه، پی سازی و تجهیزات الکتریکی است در حالی که ۴۰ تا ۷۰ درصد از هزینه نیروگاه‌هایی که با سوخت فسیلی کار می‌کنند مربوط به سوخت و بهره برداری و تعمیرات است. در ادامه جدول (۱-۱) هزینه ساخت یک توربین معمولی ۲ مگاواتی را نشان می‌دهد [۲].

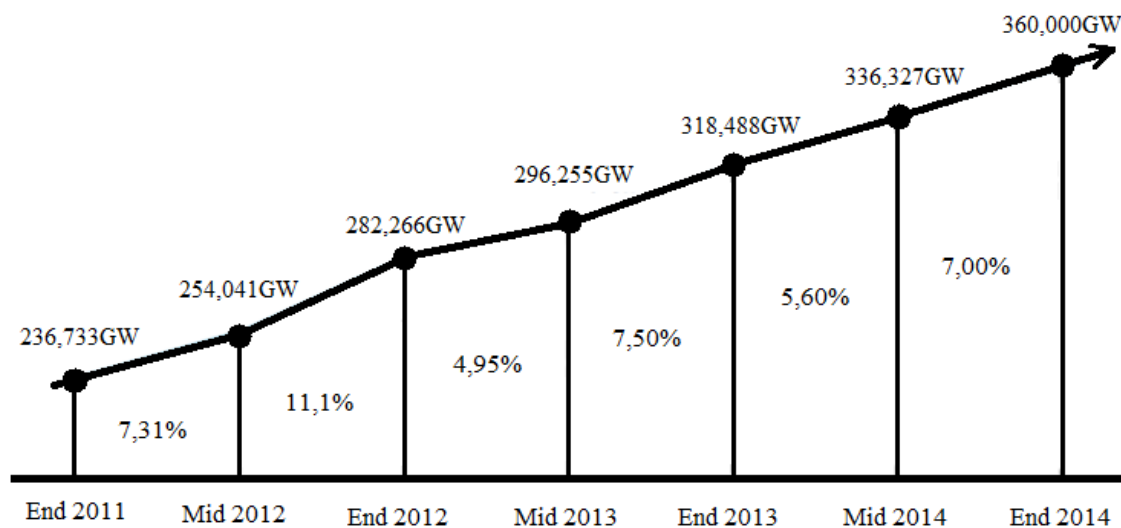
جدول (۱-۱) هزینه های مربوط به ساخت یک توربین بادی ۲ مگاواتی [۲]

نوع هزینه	هزینه سرمایه گذاری (مگاوات/هزار یورو)	سهم از کل قیمت (درصد)
توربین	۹۲۸	۷۵/۶
اتصال به شبکه	۱۰۹	۸/۹
پی ریزی	۸۰	۶/۵
اجاره زمین	۴۸	۳/۹
نصب الکتریکی	۱۸	۱/۵
مشاوره	۱۵	۱/۲
امور مالی و اعتباری	۱۵	۱/۲
ساخت جاده	۱۱	۰/۹
سیستم‌های کنترل	۴	۰/۳
مجموع	۱۲۲۷	۱۰۰



امروزه استفاده از انرژی باد در اروپا و آمریکا به سرعت در حال افزایش است. در ده، پانزده سال گذشته استفاده از انرژی باد ۳۵ درصد رشد داشته است که در میان انرژی‌های تجدیدپذیر بیشترین رشد را داشته است. در حال حاضر در کشورهای دانمارک و اسپانیا ۲۰ درصد برق مورد نیاز از انرژی باد تأمین می‌شود. در آلمان این رقم به ده درصد می‌رسد. البته با توجه به سرمایه‌گذاری کلان آلمان در توسعه نیروگاه‌های بادی، پیش‌بینی می‌شود که این نیروگاه‌ها تا سال ۲۰۵۰ میلادی ۵۰ درصد برق مورد نیاز این کشور را در زمان پیک بار تأمین کنند. امروزه سهم تولید انرژی الکتریکی از توربین‌های بادی در دنیا ۴ درصد است. در حال حاضر ظرفیت نیروگاه‌های بادی در کل دنیا تقریباً ۳۶۰ هزار مگاوات است [۴]. در ایران نیز کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی تا اواسط سال ۲۰۱۲ میلادی، ۱۱۰ مگاوات است [۴].

نمودار (۱-۲) ظرفیت تولید و درصد رشد ظرفیت نیروگاه‌های بادی نصب شده در جهان بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد [۴].



نمودار (۱-۲) ظرفیت تولید و درصد رشد نیروگاه‌های بادی نصب شده در جهان [۴]

ده کشور برتر جهان از لحاظ ظرفیت نیروگاه‌های بادی که در مجموع ۷۸ درصد از کل ظرفیت نیروگاهی بادی در جهان را شامل می‌شوند، چین با ۹۸۵۸۸ مگاوات، آمریکا با ۶۱۹۴۶ مگاوات، آلمان با ۳۶۴۸۸ مگاوات، اسپانیا با ۲۲۹۷۰ مگاوات، هند با ۲۱۲۶۲ مگاوات، انگلستان با ۱۱۱۸۰ مگاوات، فرانسه

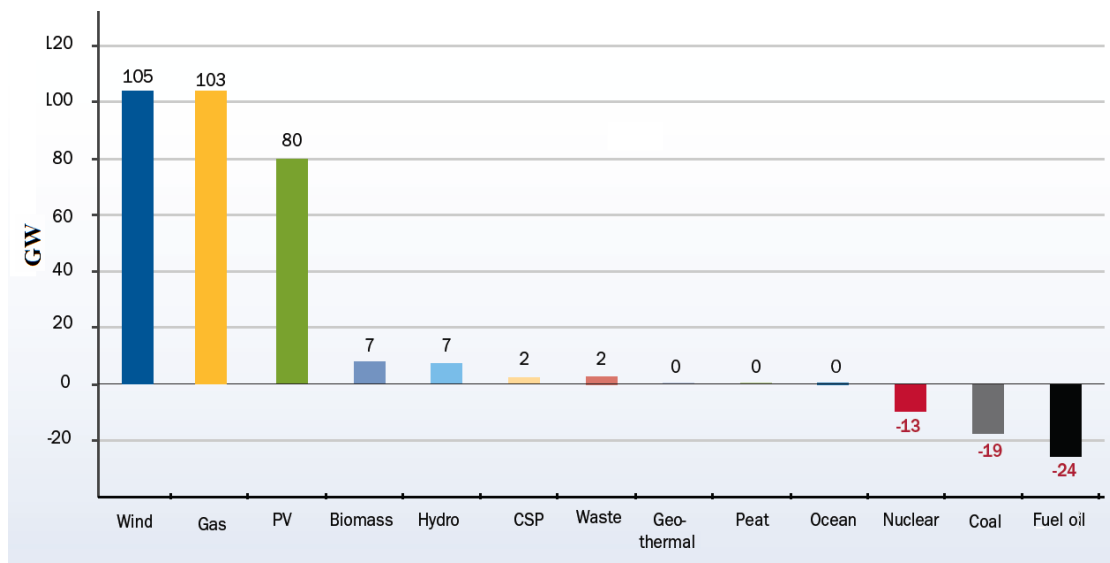
با ۸۵۹۲ مگاوات، ایتالیا با ۸۵۸۶ مگاوات کانادا ۸۵۲۶ مگاوات، دانمارک با ۴۸۵۵ مگاوات می باشند.

جدول (۱-۲) ظرفیت نیرو گاه های بادی نصب شده در ده کشور برتر جهان را نشان می دهد [۵].

جدول (۱-۲) ظرفیت نیرو گاه های بادی نصب شده در ده کشور برتر [۵]

ردیف	کشور	کل ظرفیت تولیدی تا ژانویه ۲۰۱۴ [MW]	ظرفیت نصب شده در سال ۲۰۱۴ [MW]	ظرفیت نصب شده در سال ۲۰۱۳ [MW]	ظرفیت نصب شده در سال ۲۰۱۲ [MW]
۱	چین	۹۸۵۸۸	۷۱۷۵	۵۵۰۳	۵۴۱۰
۲	آمریکا	۶۱۹۴۶	۸۳۵	۱۰۶	۲۸۸۳
۳	آلمان	۳۶۴۸۸	۱۸۳۰	۱۱۴۳	۹۴۱
۴	اسپانیا	۲۲۹۷۰	۰.۱	۱۲۲	۴۱۴
۵	هند	۲۱۲۶۲	۱۱۲	۱۲۴۳	۱۴۷۱
۶	انگلستان	۱۱۱۸۰	۶۴۹	۱۳۳۱	۸۲۲
۷	فرانسه	۸۵۹۲	۳۳۸	۱۹۸	۳۲۰
۸	ایتالیا	۸۵۸۶	۳۰	۲۷۳	۶۵۰
۹	کانادا	۸۵۲۶	۷۲۳	۳۷۷	۲۴۶
۱۰	دانمارک	۴۸۵۵	۸۳	۴۱۶	۵۶

در کشورهای اروپایی تلاشهای زیادی در زمینه تولید انرژی بادی انجام می گیرد. در سال ۲۰۰۸ میلادی انرژی باد در اتحادیه اروپا برای اولین بار بالا ترین ظرفیت نصب را نسبت به انواع نیروگاه های دیگر داشته است، که این نشان دهنده اهمیت نیروگاه های بادی در این کشورها است. در انتهای سال ۲۰۱۳ حدود ۳۶/۷ درصد از کل ظرفیت انرژی بادی جهان در اروپا تولید شده است. نمودار (۱-۳) نمودار تغییرات ظرفیت انواع نیروگاه ها را در اتحادیه اروپا از سال ۲۰۰۰ تا انتهای سال ۲۰۱۳ نشان می دهد [۷۶].



نمودار (۱-۳) تغییرات ظرفیت انواع نیروگاه‌ها در اتحادیه اروپا از سال ۲۰۰۰ تا انتهای سال ۲۰۱۳ [۶]

علاوه بر ظرفیت تولید، اندازه توربین‌های بادی نیز در حال افزایش است. جدول (۱-۳) رشد اندازه توربین‌های بادی را از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد [۵].

جدول (۱-۳) رشد اندازه توربین‌های بادی [۵]

سال	۱۹۹۰	۱۹۹۵	۲۰۰۰	۲۰۰۵	۲۰۱۰	۲۰۱۴
ارتفاع (متر)	۵۰	۷۸	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۱۷۸
توان (مگاوات)	۰/۱۵	۰/۶	۱/۵	۵	۷/۵	۱۰

تکنولوژی سیستم تبدیل انرژی بادی در دهه اخیر تغییرات زیادی پیدا کرده است. توسعه و رشد توربین‌های بادی بر اساس سه هدف اصلی زیر آغاز شد [۵]:

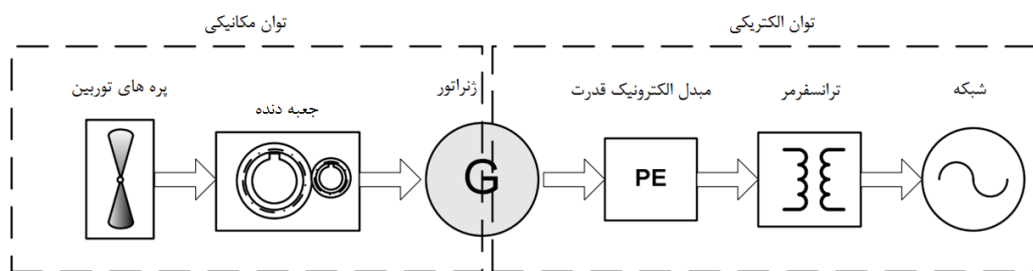
۱. به دست آوردن انرژی ارزان قیمت با بازده بالا و قابلیت اطمینان بالا.

۲. به دست آوردن کیفیت توان بهتر و اتصال به شبکه بهتر.

۳. مقبولیت عمومی (کاهش سروصدا و اثرات زیست محیطی).

اجزای اصلی سیستم توربین بادی شامل: روتور توربین، جعبه دنده، ژنراتور، ترانسفورماتور و در صورت

امکان مبدل الکترونیک قدرت می‌باشد که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است [۸].



شکل (۱-۱) اجزای اصلی سیستم توربین بادی [۸]

روتور توربین انرژی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند و سپس این انرژی توسط ژنراتور به توان الکتریکی تبدیل شده و سپس از طریق ترانسفورماتور و خطوط انتقال به شبکه قدرت منتقل می شود. توربین های بادی توان را از باد می گیرند و آن را به توان مکانیکی چرخشی تبدیل می کنند. تعداد پره ها معمولاً سه عدد است و اگر شعاع پره ها افزایش یابد، سرعت چرخشی آنها کاهش می یابد. برای بازه توانی مگاوات، سرعت دورانی پره های توربین بادی ۱۰-۱۵ دور بر دقیقه می باشد. راه حل موثر تبدیل سرعت پایین و گشتاور بالا به توان الکتریکی، استفاده از جعبه دنده و ژنراتور با سرعت استاندارد است. جعبه دنده سرعت پایین محور توربین را به سرعت بالا برای ژنراتور تبدیل می کند. ممکن است برای سیستم های ژنراتور چند قطب جعبه دنده نیاز نباشد. نقطه اتصال توربین های بادی به شبکه ممکن است در ولتاژ پایین، ولتاژ متوسط، ولتاژ بالا و حتی ولتاژهای خیلی بالا باشد. امروزه بیشتر توربین های بادی به سیستم ولتاژ متوسط متصل اند و مزارع بادی در دریا به سطح ولتاژ بالا و یا خیلی بالا متصل هستند. برای سیستم های توربین بادی مدرن، هر توربین خود یک ترانسفورماتور برای افزایش ولتاژ از سطح ولتاژ توربین (۴۰۰ تا ۶۹۰ ولت) به ولتاژ متوسط دارد. ترانسفورماتور معمولاً نزدیک به توربین بادی است تا از طولانی شدن کابل های ولتاژ پایین جلوگیری شود. فقط توربین های بادی کوچک به طور مستقیم به خطوط ولتاژ پایین بدون ترانسفورماتور متصل می شوند و یا تعدادی از توربین های کوچک در یک مزرعه بادی به یک ترانسفورمر متصل می شوند. به دلیل تلفات بالا در خطوط ولتاژ پایین، مزارع بادی بزرگ ممکن است یک پست مجزا برای افزایش ولتاژ از سطح ولتاژ متوسط به سطح ولتاژ بالا داشته باشند [۹].