استراتژی بهره‌برداری اقتصادی از مزارع بادی
در بازار برق

انتشارات شمع آوید

سرشناسه : خالقا، حامد، ۱۳۶۲-

عنوان و نام پدیدآور : استراتژی بهره‌برداری اقتصادی از مزارع بادی در بازار برق/حامد خالقا ؛ ویراستار محسن ساکتی.

مشخصات نشر : قزوین: شمع آوید، ۱۴۰۰.

مشخصات ظاهری : ۱۰۰ص.:جدول.

شابک : 978-622-98837-7-8

وضعیت فهرست نویسی : فیپا

یادداشت : کتابنامه:ص.۹۳ - ۹۶.

موضوع : نیروگاه‌های بادی -- جنبه‌های اقتصادی

Wind power plants -- Economic aspects

توربین‌های بادی

Wind turbines

انرژی‌های پایان‌ناپذیر -- جنبه‌های اقتصادی

Renewable energy sources -- Economic aspects

برق -- تولید-- نوآوری

Electric power production -- Technological innovations

رده بندی کنگره : TD۱۹۵

رده بندی دیویی : ۳۳۳/۷۹۴

شماره کتابشناسی ملی : ۸۷۶۶۷۰۳

اطلاعات رکورد کتابشناسی : فیپا

کد پیگیری : ۸۷۶۵۸۰۲

استراتژی بهره‌برداری اقتصادی از مزارع بادی در بازار برق

حامد خالقا

استراتژی بهره‌برداری اقتصادی از مزارع بادی در بازار برق

مؤلف: حامد خالقا

ویراستار: محسن ساکتی

طرح جلد: صنم پورکلباسی

چاپ اول: ۱۴۰۰

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۹۸۸۳۷-۷-۸

قیمت: ۵۵۰۰۰ تومان

حروف‌چینی، صفحه‌آرایی: انتشارات شمعِ آوید

چاپ و صحافی: مجتمع چاپ ایران کهن

شمارگان: ۵۰۰ جلد

انتشارات شمعِ آوید

کد نشر: ۱۶۰۱۹

تلفن: ۰۹۱۲۱۸۲۷۵۲۵ - **مدیر مسئول:** محسن ساکتی

ایمیل: shameavid.pub@gmail.com

وبسایت (سفارش خرید و دریافت نسخه الکترونیکی): https://chaponashr.ir/shameavid

فروشگاه فروش کتاب:

قزوین، میدان نخبگان، ضلع شرقی دانشگاه آزاد قزوین، **شهر کتاب قزوین insta: Qazvin.bookcity**

همه حقوق چاپ و نشر این کتاب برای انتشارات شمعِ آوید محفوظ است.

تکثیر، انتشار و بازنویسی این اثر یا قسمتی از آن به هر شیوه از جمله فتوکپی، الکترونیکی، ضبط و ذخیره در سیستم‌های بازیابی و پخش بدون دریافت مجوز قبلی و کتبی از ناشر ممنوع است.

این اثر تحت حمایت «قانون حمایت از حقوق مؤلفان، مصنفان و هنرمندان ایران» قرار دارد.

فهرست مطالب

پیشگفتار ۹

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه ۱۱

۱-۲- حضور منابع تجدیدپذیر در بازارهای برق ۱۳

۱-۳- انرژی باد ۱۵

۱-۳-۱- قسمت‌های اصلی توربین بادی ۱۶

۱-۴- بازار رقابتی برق ۱۷

۱-۴-۱- ساختار بازار انرژی ۱۸

۱-۵- ذخیره‌ساز انرژی ۲۱

۱-۵-۱- مزایای فنی و اقتصادی ۲۱

۱-۵-۲- انواع ذخیره‌سازهای انرژی ۲۲

۱-۵-۲-۱- باتری ۲۳

۱-۶- جمع‌بندی ۲۳

فصل دوم: ادبیات پژوهش

۲-۱- مقدمه ۲۵

۲-۲- انواع روش‌های مشارکت واحدها (UC) ۲۶

۲-۲-۱- مشارکت بر مبنای قیمت ۲۶

۲-۲-۲- مشارکت بر مبنای امنیت ۲۶

۲-۲-۳- مشارکت بر مبنای امنیت و قیمت ۲۷

۲-۳- استراتژی بهینه‌سازی مختلط غیرخطی ۲۷

۲-۳-۱- چگونگی مدل‌سازی در بهینه‌سازی غیرخطی ۲۷

۲-۳-۱-۱- روش‌های حل مدل‌ها ۲۸

۲-۳-۱-۲- تقسیم‌بندی مسائل بهینه‌سازی غیرخطی ۳۰

۲-۳-۱-۳- مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی ۳۱

۲-۳-۲- برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح ۳۴

۲-۴- کاربرد منابع تجدیدپذیر در سیستم قدرت ۳۵

۲-۵- شرکت در بازارهای انرژی..... ۳۵
۲-۶- مسائل برنامه‌ریزی تصادفی..... ۳۷
۲-۷- باتری‌های الکتریکی..... ۴۰
۲-۸- جمع‌بندی..... ۴۱

فصل سوم: روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- مقدمه..... ۴۵
۳-۲- اهداف اصلی پژوهش..... ۴۶
۳-۳- مدل‌سازی..... ۴۷
۳-۳-۱- مدل‌سازی باد..... ۴۷
۳-۳-۲- مدل‌سازی بازار..... ۵۲
۳-۴- برنامه‌ریزی واحد بادی و سنتی در حضور باتری‌ها..... ۶۰
۳-۵- برنامه‌ریزی مشارکت واحدها..... ۶۰
۳-۵-۱- روابط ریاضی مشارکت واحدها..... ۶۱
۳-۵-۱-۱- تابع هدف، بیشینه کردن سود:..... ۶۱
۳-۵-۱-۲- قیود واحدهای حرارتی..... ۶۱
۳-۵-۱-۳- باتری‌های متصل به شبکه و محدودیتهای مربوطه..... ۶۲
۳-۶- افق برنامه‌ریزی مشارکت واحدها..... ۶۳

فصل چهارم: نتایج

۴-۱- مقدمه..... ۶۵
۴-۲- مورد اول: پیشنهاددهی راهبردی واحد بادی در حضور رقبا..... ۶۵
۴-۲-۱- سیستم مورد مطالعه..... ۶۵
۴-۳- مورد دوم: برنامه‌ریزی واحد بادی به‌صورت غیرراهبردی در حضور باتری‌ها..... ۸۳

فصل پنجم: نتیجه‌گیری

۵-۱- خلاصه..... ۸۹
۵-۲- پیشنهادها..... ۹۰
منابع و مآخذ..... ۹۳

فهرست جداول

جدول ۳-۱ مقادیر احتمال سناریوها ۵۰
جدول ۴-۱ مشخصات حاشیه‌ای واحدهای تولیدکننده مرسوم رقیب ۶۶
جدول ۴-۲ میزان تقاضا و محل قرارگیری بارهای بزرگ ۶۶
جدول ۴-۳ قیمت‌های پیشنهادهای مصرف‌کنندگان در بازه ۲۴ ساعت ۶۷
جدول ۴-۴ توان تسویه شده واحد بادی ۶۹
جدول ۴-۵ توان واحد بادی در بازار تعادل ۷۰
جدول ۴-۶ قیمت تسویه بازار ۷۱
جدول ۴-۷ توان رقیب اول ۷۲
جدول ۴-۸ توان رقیب دوم ۷۴
جدول ۴-۹ توان رقیب سوم ۷۶
جدول ۴-۱۰ توان رقیب چهارم ۷۸
جدول ۴-۱۱ توان رقیب پنجم ۷۹
جدول ۴-۱۲ توان رقیب ششم ۸۰
جدول ۴-۱۳ توان رقیب هفتم ۸۱
جدول ۴-۱۴ توان رقیب هشتم ۸۲
جدول ۴-۱۵ مشخصات بار و قیمت بازار ۸۳
جدول ۴-۱۶ مشخصات کلی واحدهای موجود ۸۵
جدول ۴-۱۷ توان واحدها در حضور باتری‌های الکتریکی ۸۶

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ اجزای توربین بادی..... ۱۷
شکل ۲-۱ درخت سناریو برای یک مسئله چند مرحله‌ای..... ۳۸
شکل ۳-۱ تابع توزیع ویبال..... ۴۸
شکل ۳-۲ مشخصه توان - سرعت نیروگاه بادی..... ۴۹
شکل ۳-۳ شبکه شش شینِ..... ۵۱
شکل ۳-۴ توان واحد بادی در سناریوهای مختلف..... ۵۱
شکل ۴-۱ سناریوهایی خروجی منابع بادی..... ۶۸
شکل ۴-۲ توان تسویه شده واحد بادی..... ۶۹

پیشگفتار

با افزایش تولید از انرژی‌های تجدیدپذیر و به طور خاص مزارع بادی، جهت شرکت در بازارهای تجدید ساختاریافته، اجرای یک برنامه متناسب با درنظرگرفن عدم قطعیت بازار و عدم قطعیت باد، ضروری به نظر می‌رسد؛ لذا یک مسئله دوسطحی تصادفی برای محاسبه راهبرد پیشنهاددهی بهینه توسط واحد بادی طی بازه ۲۴ ساعت ارائه شده است. مسائل دوسطحی به مسائلی اطلاق می‌شود که در آن دو تابع هدف در سطح بالا و پایین وجود دارد. در این پژوهش، ابتدا واحدهای بادی یکی از تولیدکنندگان تعیین‌کننده قیمت فرض شده است؛ لذا این امکان در اختیار واحد بادی قرار می‌گیرد تا بتواند با استفاده از شرایط بازار با تغییر قیمت تسویه به سود خود زمینه‌ساز افزایش سود خود گردد. در این پژوهش به پیشنهاددهی راهبردی واحدهای بادی در بازار روز بعد پرداخته شده است و در کنار واحدهای بادی، واحدهای سنتی نیز به‌صورت رقیب در کنار واحد بادی در بازار شرکت می‌کنند. مسئله ابتدایی دارای دو سطح می‌باشد. سطح بالا به بیشینه‌سازی سود واحد بادی می‌پردازد که غیرخطی می‌باشد و مسئله سطح پایین به فرایند تسویه بازار روز بعد که عبارتی خطی است. نهایتاً این دو تابع هدف پس از خطی‌سازی، به حالت خطی مختلط عدد صحیح تبدیل می‌شود. همچنین در ادامه به ترکیب سیستم ذخیره‌ساز با واحدهای بادی پرداخته شده است، این مسئله در راستای کاهش عدم قطعیت احتمالی مزارع بادی انجام شده است، نتایج حاکی از این است که در ساعاتی که واحد بادی کاهش توان دارد باتری‌ها عمدتاً در حالت دشارژ قرار گرفته و در ساعاتی که واحد بادی توان زیادی تزریق می‌کند در حالت شارژ هستند.

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه

پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های اخیر و افزایش تولید و مصرف انرژی در سطح دنیا چالش‌های گوناگونی را در این زمینه به وجود آورده است و بشر همواره در این راه به دنبال اصلاح ساختار و رفع موانع آن می‌کوشد. از آن جمله می‌توان به نیاز اجرایی‌شدن تجدید ساختار در شبکه‌های قدرت جهت رفع نیاز مصرف‌کنندگان و افزایش امنیت شبکه از طرفی و تأمین تعهد تولیدکنندگان و سودآوری این صنعت از طرف دیگر اشاره کرد. باتوجه‌به بحران انرژی و گرم‌شدن سطح زمین استفاده از انرژی‌های نو، پاک و ارزان‌قیمت نیز محتمل به نظر می‌رسد. برق با نگاه اقتصادی می‌تواند از جذاب‌ترین و درعین‌حال، پیچیده‌ترین بازارها در سطح دنیا باشد. باتوجه‌به ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌عنوان‌مثال مزارع بادی به ابهامات آن نیز افزوده خواهد شد بنابراین لازم است به بحث بهره‌برداری و قیمت‌دهی بهینه این تولیدکنندگان باتوجه‌به عدم قطعیت و عدم تناوب تولید توجه ویژه‌ای داشت. در این پژوهش یک مسئله دوسطحی تصادفی برای محاسبه راهبرد پیشنهاددهی بهینه توسط واحد بادی طی بازه ۲۴ ساعت ارائه‌شده است. مسائل دوسطحی به مسائلی اطلاق می‌شود که در آن دو تابع هدف در سطح بالا و پایین وجود دارد، این دو تابع هدف با استفاده از شرایط بهینگی کروش-کان-تاکر به یک تابع هدف تبدیل می‌شود.

در این پژوهش ابتدا واحدهای بادی یکی از تولیدکنندگان تعیین‌کننده قیمت فرض شده است؛ لذا این امکان در اختیار واحد بادی قرار می‌گیرد تا بتواند با استفاده از شرایط بازار با تغییر قیمت تسویه به سود خود زمینه‌ساز افزایش سود واحد گردد. در قسمت بعدی به ترکیب سیستم ذخیره‌ساز با واحدهای بادی پرداخته شده است، این مسئله در راستای کاهش عدم قطعیت احتمالی مزارع بادی انجام شده است، در این قسمت فرض شده است که واحد بادی مانند یک تولیدکنندهٔ پذیرنده قیمت در بازار شرکت نموده است و از سیستم ذخیره‌ساز برای جبران نوسانات آن و رسیدن به سود بالاتر بهره برده شده است.

درگذشته سیستم قدرت دو ویژگی اصلی را دارا بود، یکی کنترل متمرکز واحدهای تولیدی و دیگری غیرفعال یا پسیو بودن شبکه توزیع اما با پیشرفت‌های حاصله در فنّاوری‌های منابع تجدیدپذیر و نیازهای روزافزون برای به‌کارگیری این‌گونه منابع، تولید توزیع‌شده[1] (پراکنده) جایگزین بخش قابل‌توجهی از انرژی تولیدشده به‌وسیله نیروگاه‌های بزرگ متعارف[2] (مرسوم) گردید. البته وجود نیروگاه‌های مرسوم برای تضمین عملکرد مطمئن دستگاه‌های قدرت با ارائه خدمات پشتیبانی همچون تعقیب بار[3]، تنظیم فرکانس، تنظیم ولتاژ و ارائه رزرو، لازم و ضروری است. بایستی توجه داشت ارائه خدمات مذکور توسط واحدهای تولیدی مرسوم نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان آن‌هم در بخش انتقال و هم در بخش توزیع هست. ازاین‌رو برای هرچه بیشتر بهره‌بردن از منابع انرژی توزیع‌شده مدلی جدید برای بهره‌برداری از دستگاه‌های قدرت بر مبنای عملکرد مشترک واحدهای تولیدی توزیع‌شده و بارهای تغییرپذیر که بتوانند جایگزین نیروگاه‌های مرسوم گردند، ارائه شده است. مدل بهره‌برداری جدید برای منابع انرژی توزیع‌شده امکان تعامل با سیستم انتقال و شرکت در بازارهای انرژی و مدیریت شبکه را فراهم می‌آورد.

از طرفی پیش‌بینی می‌شود که شبکه‌های توزیع آینده پذیرای هزاران واحد تولیدی پراکنده و بار تغییرپذیر باشند درنتیجه امکان ارتباط بین این واحدها و اپراتور سیستم انتقال که امری ضروری هست وجود ندارد، زیرا هزینه برقراری این ارتباطات که نیازمند تجهیزات بسیاری برای انتقال حجم بالایی از اطلاعات است بسیار بالا هست. در این پژوهش به

---

1. Disturbuted generation
2. Conventional power plant
3. Load following

پیشنهاددهی راهبردی واحدهای بادی در بازار روز بعد پرداخته شده است و در کنار واحدهای بادی واحدهای سنتی نیز به‌صورت رقیب در کنار واحد بادی در بازار شرکت می‌کنند. مسئله ابتدایی دارای دو سطح می‌باشد. سطح بالا به بیشینه‌سازی سود واحد بادی می‌پردازد که غیرخطی می‌باشد و مسئله سطح پایین به فرایند تسویه بازار روز بعد می‌پردازد که عبارتی خطی است. نهایتاً این دو تابع هدف با استفاده از تئوری دوگانگی قوی و شرایط بهینگی کروش-کان-تاکر به حالت خطی مختلط عدد صحیح تبدیل می‌شود. همچنین با فرض کاهش عدم قطعیت باد می‌توان از ذخیره‌سازهای انرژی نیز استفاده نمود که در ادامه طرح قیمت دهی در حضور ذخیره‌ساز برای یک مزرعه بادی به طور خاص نیز مورد بررسی قرار گرفته است، ازاین‌رو در ادامه به نقش واحدهای تجدیدپذیر در بازارهای برق پرداخته خواهد شد.

۱-۲- حضور منابع تجدیدپذیر در بازارهای برق

تقاضا برای مصرف انرژی و از جمله انرژی الکتریکی در جامعه امروزی و به طور خاص در کشورهای درحال‌توسعه از جمله ایران به‌شدت درحال‌رشد است. این امر باعث شده است که سالانه بخش زیادی از بودجه‌های جاری دولت‌ها برای توسعه، تولید و انتقال انرژی به مصرف‌کنندگان صرف شود؛ بنابراین مدیران صنعت برق کشورها را بر این داشته است که برای تولید، انتقال و توسعه شبکه‌های انرژی الکتریکی برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت را انجام دهند.

در حال حاضر مدیران بخش تولید صنعت برق تمایل زیادی به استفاده از واحدهای تولید کوچک متصل به شبکه‌های توزیع و نزدیک به مصرف‌کنندگان به‌جای واحدهای تولیدی بزرگ متصل به شبکه انتقال نشان می‌دهند. این واحدهای کوچک را واحدهای تولید پراکنده می‌نامند.

استفاده از این منابع تولید پراکنده دارای مزایائی است که باعث شده است مدیران و برنامه‌ریزان صنعت برق تمایل بیشتری به استفاده از آنها به‌جای واحدهای تولیدی بزرگ باشند. از جمله این مزایا می‌توان به کاهش تلفات در شبکه به دلیل نزدیکی به بار، کاهش و به تأخیر انداختن هزینه سرمایه‌گذاری تولید و احداث خطوط انتقال جدید، پیک‌زایی بار

و کاهش بار در اوج مصرف که منجر به تأخیر انداختن هزینه سرمایه‌گذاری تولید و احداث خطوط انتقال جدید و پایین آمدن قیمت انرژی در اوج مصرف، نصب سریع و آسان، امکان استفاده از منابع تجدیدپذیر و در نتیجه کاهش آلودگی، افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم از جمله مهم‌ترین مزایای این منابع تولید پراکنده می‌باشند.

فن‌آوری‌های مطرح تولید پراکنده شامل توربین‌های بادی، پیل‌های سوختی، سیستم‌های فتوولتائیک، توربین‌های گازی، میکروتوربین‌ها، موتورهای احتراق داخلی، موتورهای احتراق صنعتی و بیو انرژی می‌باشد.

منابع تجدیدپذیر از جمله توربین‌های بادی و سیستم‌های فتوولتائیک (انرژی خورشیدی) از جمله انرژی‌هایی هستند که به دلیل عدم آلایندگی و هزینه بهره‌برداری پایین به‌شدت درحال‌رشد هستند. این منابع با استفاده از انرژی‌های موجود در طبیعت انرژی الکتریکی را با قیمت قابل‌قبول تولید می‌کنند. البته باید توجه داشت که چون انرژی‌های ورودی این منابع تولیدی از طبیعت سرچشمه می‌گیرد بنابراین تولید انرژی الکتریکی در آنها شدیداً به شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد و اگر بخواهیم از این منابع در شبکه قدرت در سطح بالا استفاده کنیم بایستی علاوه بر مسئله زیست‌محیطی و اقتصادی، به مسائل قابلیت اطمینان سیستم به دلیل نوسانات تولید این منابع توجه خاصی شود.

هزینه سوخت تعداد زیادی نیروگاه‌ها که بار یک سیستم را تأمین می‌کنند، بسیار گران است. مثلاً آمارها نشان می‌دهد که در سال ۱۹۸۰ شرکت‌های تولیدی برق ایالات متحده حدود ۴۰ درصد از درآمدهای خود را صرف خرید سوخت می‌کردند و روند روبه‌رشد هزینه سوخت بر اهمیت این موضوع می‌افزاید و صرفه‌جویی زیادی با استفاده از واحدهای ارزان‌قیمت و خاموشی واحدهای گران‌قیمت و به‌طورکلی بهره‌برداری بهینه از این مجموعه واحدها حاصل می‌شود.

پس در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها[1] هدف یافتن نقطه بهینه‌ای از روشن و خاموش بودن واحدها است که بتوان با کمترین هزینه انرژی و رزرو چرخان موردنیاز سیستم را با رعایت قیود واحدهای تولیدی و شبکه تأمین نمود[۱].

---

[1]. Unit Commitment

از طرف دیگر افزایش حساسیت‌ها نسبت به مسائل زیست‌محیطی و آلودگی ناشی از واحدهای تولید انرژی با سوخت فسیلی در سال‌های اخیر باعث شده است که علاوه بر حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری، مسئله حداقل‌سازی آلودگی ناشی از این واحدها به‌عنوان بخشی از مسئله بهره‌برداری بهینه موردتوجه قرار گیرد.

همچنین این عامل باعث رشد استفاده از منابع تجدیدپذیر و افزایش نفوذ این منابع در شبکه شده است. هرچند این منابع تجدیدپذیر (باد، خورشید و غیره) دارای آلودگی نیستند اما ماهیت تصادفی و غیرقطعی بودن آن‌ها باعث به‌وجودآمدن مسئله عدم قطعیت در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها می‌شود. پس مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها باید با درنظرگرفتن این عدم قطعیت در مسئله حل شود[۲].

یکی از فاکتورهای مهم در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها بحث بزرگی ابعاد مسئله است که باعث پیچیدگی آن شده است. تاکنون روش‌های مختلفی برای حل این مسئله بیان شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های برنامه‌ریزی پویا[۱]، روش لاگرانژ[۲]، برنامه‌ریزی با الگوریتم‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک[۳]، الگوریتم اجتماع ذرات[۴]، روش سلسله‌مراتبی، روش از مدار خارج کردن[۵]، روش یکایک شماری جامع[۶]، لیست حق‌تقدم[۷]، روش تابو[۸]، روش شبیه‌سازی سردکردن[۹] و روش‌های توزیع اقتصادی بار مانند روش لامبدای[۱۰]، گرادیان، گرادیان کاهش‌یافته و غیره سیستم اشاره کرد[۳].

۱-۳- انرژی باد

بدون شک صنعت ساخت توربین‌های بادی، نصب، راه‌اندازی و نگهداری آنها طی دهۀ اخیر به یکی از جذاب‌ترین صنایع موجود، تبدیل شده است. عمده‌ترین دلایل رشد این صنعت را می‌توان در افزایش بهای سوخت‌های فسیلی در کنار افزایش قابلیت طراحی

1. Dynamic Programming
2. Lagrangian Relaxation
3. Genetic Algoritm
4. Particle Swarm Optimization
5. Unit Decommitment
6. Exhaustive Enumeration
7. Priority List
8. Tabu Search
9. Simuling Anealing
10. Lambda method

سیستم‌های پیچیده‌تر و بزرگ‌تر بادی و اجزای آن دانست. تا ۱۵ سال پیش هر یک مگاوات ظرفیت بادی نصب شده بیش از ۲ میلیون دلار هزینه در بر داشت، اما اکنون به‌راحتی می‌توان با هزینه‌ای کم‌تر از یک میلیون دلار به‌ازای هر مگاوات صاحب توربین بادی شد. این کاهش سریع قیمت به همراه شرایط مساعد دیگری نظیر افزایش حامل‌های انرژی فسیلی، افزایش نگرانی‌ها در مورد آلاینده‌های زیست‌محیطی و غیره وضعیت این صنعت را در بهترین شرایط خود قرار داده است. در سال ۱۹۹۷ میلادی کم‌تر از ۷/۵ گیگاوات ظرفیت نصب‌شدهٔ توان بادی در کل جهان بود، درحالی‌که این ظرفیت در پایان سال ۲۰۱۱ به بیش از ۲۳۷ گیگاوات افزایش پیدا کرده است. یعنی در عرض ۱۴ سال ظرفیت نصب‌شدهٔ بادی با یک‌روند رشد بیش از ۳۰۰۰٪ روبرو بوده است. از سال ۲۰۰۸ تا کنون، شتاب رشد این صنعت کند شده است که این قضیه به رکود اقتصاد جهانی بازمی‌گردد. دو کشور پیشرو در زمینه نصب توربین‌های بادی و استفاده از انرژی باد عبارت‌اند از امریکا و چین. در سال ۲۰۰۰ کشور آمریکا تنها حدود ۲/۵ گیگاوات ظرفیت نصب شده داشته است که در سال ۲۰۱۰ این ظرفیت را به بیش از ۴۰ گیگاوات رسانده است. کشور دیگر، کشور چین است که طی سال‌های اخیر بالاترین رشد را در بین کشورهای فعال در این صنعت به خود اختصاص داده است. این کشور فقط در سال ۲۰۱۰ در حدود ۱۹ گیگاوات ظرفیت بادی به توربین‌های نصب شده خود اضافه کرده است که در نوع خود بی‌نظیر است. در سال ۲۰۱۰ میزان ظرفیت نصب شده این کشور به حدود ۴۸ گیگاوات رسیده است[۵].

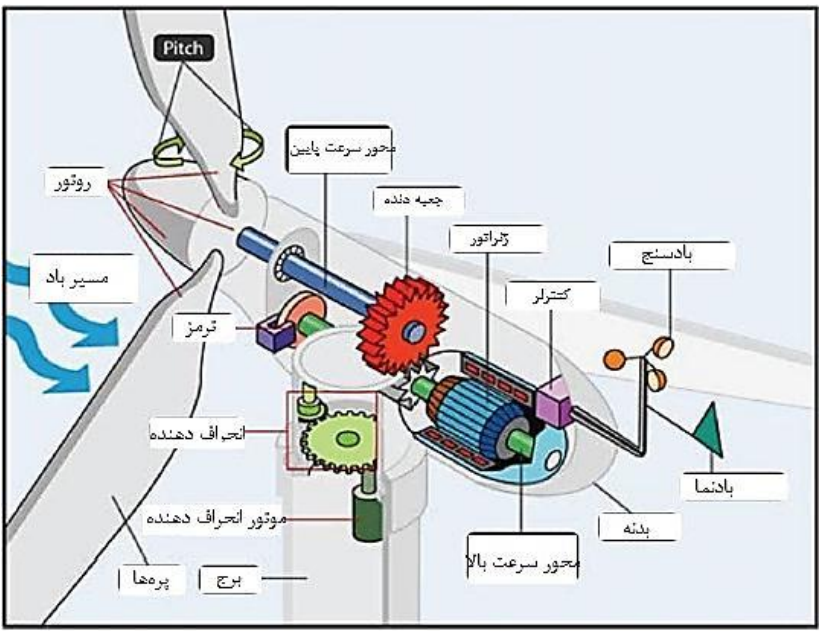
۱-۳-۱- قسمت‌های اصلی توربین بادی

یک توربین بادی به‌طورکلی از قسمت‌هایی مانند درایو[1]، سیستم کنترلی موتور[2]، پیچ کنترل[3]، دکل[4] و مجموعه‌ای از الکترونیک قدرت[5] که تمامی این مجموعه به غیر از دکل درون ناسل[6] قرار می‌گیرد را شامل می‌شود.

هر یک از این اجزاء روتور، جعبه‌دنده، محور سرعت پایین، محور سرعت بالا، ژنراتور،

1. Drive Train
2. Yaw System
3. Pitch System
4. Tower
5. Power Electronics
6. nacelle

برج نگهداری سیستم روتور، مکانیزم‌های انحراف توربین، بادنما، بادسنج و بدنه توربین نقش مخصوصی را در توربین ایفا می‌کنند. در شکل ۱-۱ نمایی از اجزای توربین بادی نشان‌داده‌شده است.



شکل ۱-۱ اجزای توربین بادی

۱-٤- بازار رقابتی برق

بازار رقابتی برق را می‌توان حاصل مسیر تکنولوژی برق نامید که در سال‌های اخیر تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت را رقم زده و همواره پیچیدگی‌های مختلفی را در زمینه‌های گوناگون شامل بهره‌برداری مناسب، قیمت‌دهی بهنه، پایداری شبکه و.. را در خود جای داده است.

صنعت برق ابتدا با یک ساختار عمودی و انحصاری اداره می‌شد که این موضوع کاهش راندمان و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری را با خود همراه داشت، در راستای حل این

موضوع در ده‌های اخیر ساختار جدیدی جهت بهبود شرایط فوق و پویایی آن تحت عنوان تجدید ساختار سیستم‌های قدرت شکل گرفت، که در آن در چهارچوب قوانین شکل‌گرفته در یک فضای رقابتی تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان می‌توانند به خریدوفروش انرژی الکتریکی پردازند.

از دلایل شکل‌گیری تجدید ساختار می‌توان به‌طورکلی به ایجاد رقابت، افزایش بازده اقتصادی کمبود منابع مالی، افزایش توجه به مسائل زیست‌محیطی و مهم‌تر افزایش کیفت و قابلیت اطمینان شبکه نام برد.

بازار برق از نظر ارائه خدمات به شرح ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند:

- بازار انرژی
- بازار خدمات جانبی
- بازار انتقال

بازار معاملات خود توان مصرفی به بازار انرژی موسوم است.

بازار خدمات جانبی، همان بازار توان راکتیو و خدمات رزرو و ظرفیت و سایر خدماتی که برای حفظ توان ظاهری در شبکه موردنیاز است را گویند.

بازار انتقال، بازاری است که در آن خدمات انتقال انرژی الکتریکی مورد معامله قرار می‌گیرد در این بازار مکانیزم دریافت و پرداخت پول از مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان به عهده نهادی تحت عنوان بهره‌بردار بازار است و مسائل فنی شامل کنترل پایداری شبکه پیش‌بینی بار، تعیین میزان رزرو و سایر امور فنی را نهادی مستقل با نام بهره‌بردار مستقل بازار بر عهده گرفته است.

در حقیقت بهره‌بردار مستقل سیستم وظیفه راهبری، مسیردهی و مدیریت بازار را بر عهده دارد. به عبارتی می‌توان گفت پیش‌بینی و تأمین خدمات تولید شامل انرژی و رزرو، بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، و اداره بازار از مسئولیت‌های این نهاد است.

۱-٤-۱- ساختار بازار انرژی

مسئولیت بخش‌های تولید، انتقال و خدمات توزیع در اختیار شرکت‌های مختلفی قرار دارد.

این تفکیک خدمات نتیجه‌ای از ایجاد تغییر ساختار در قوانین می‌باشد که معمولاً تحت نظارت نهادهای مسئول دولتی انجام می‌پذیرد. پس از این مرحله وظیفه نهادهای نظارتی به ارزیابی عملکرد بازار و کارایی آن محدود می‌شود.

نکته مهم دیگر آن است که عملکرد بازار انرژی الکتریکی عاری از هرگونه تبعیض باشد. تنها در قالب این شرط است که شرکت‌های مختلف می‌توانند در امر خرید یا فروش برق به رقابت با یکدیگر بپردازند. خصوصیت مشترک دیگر ساختار بازارها، بهره‌برداری تک‌قطبی از سیستم انتقال نیرو می‌باشد؛ بنابراین جهت بهره‌برداری ایمن و عاری از هرگونه تبعیض از این سیستم، در ساختار اکثر بازارهای انرژی الکتریکی، تأسیس نهادی مستقل به‌عنوان بهره‌بردار شبکه ضروری دیده شده است.

نکته دیگر در ساختار بازار برق نوع زمان ارائه آن بازار است و به‌طورکلی به دو بازار پیش از موعد و بازار هم‌زمان تقسیم می‌شود.

بازار پیش از موعد به معنای مبادله و حراج انرژی برای زمانی در آینده است. تقریباً همهٔ بازارهای نقدی برق در دنیا و از جمله بازار ایران، بازاری پیش از موعد و از نوع یک روز قبل است. در بازار یک روز قبل، اگر فرضاً روز تحویل فیزیکی انرژی یا خدمات جانبی، ۲۰ مهر باشد، تا روز ۱۹ مهر همهٔ شرکت‌کنندگان فرصت دارند تا پیشنهادهای خرید یا فروش خود را که می‌تواند راجع به تحویل برق در یک ساعت یا یک دورهٔ چند ساعتی باشد، ارائه نمایند. روز قبل از تحویل، رأس ساعت معینی حراج پایان‌یافته و محاسبات توسط بهره‌بردار مستقل سیستم یا مرکز مبادله توان[1] به‌منظور تعیین قیمت تسویهٔ بازار و برنامهٔ تولید و مصرف شرکت‌کنندگان و اعلام آن آغاز می‌شود. برنامه معمولاً در بعدازظهر روز قبل اعلام می‌شود و از ساعت ۰:۰ روز تحویل، شرکت‌کنندگان، می‌باید مطابق برنامه، انرژی را از شبکه تحویل گرفته یا به آن تحویل دهند. تسویهٔ این بازارها معمولاً روزانه یا هفتگی است.

به‌منظور حفظ فرکانس و عملکرد مطمئن سیستم قدرت، در هر زمان باید تولید و مصرف با هم در تعادل باشند. مصرف یا تولید واقعی ممکن است با آنچه در بازار پیش از موعد تعیین شده، متفاوت باشد؛ لذا، برای تأمین قدرت تعادلی[2] بازار هم‌زمان ایجاد می‌شود. این

---

[1]. power exchange

[2]. balancing power