عنوان:

بررسی بلک اوت نیروگاه و اسپینیگ رزرو نیروگاه

تهیه کننده

نیما سیمیاری

استاد

دکتر نوروزیان

۱۴مرداد ماه۹۸

پیشگفتار

در این پژوهش ابتدا انگیزه و مفاهیم ابتدایی مرتبط با Black start و توربین بادی معرفی می‌گردد و سپس در همین قسمت بخش‌های مختلف نیروگاه و طبقه‌بندی توربین از حیث عملکرد و ظاهر مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه‌براین، قسمت‌های مهم یک نیروگاه بادی شامل سنسورها، تقویت‌کننده و عملگر برای آشنایی بیشتر بیان شده‌است. اهمیت یک نیروگاه بادی از آن‌جایی است که معمولاً از مزارع شامل توربین‌های بادی به‌عنوان منبع Black start استفاده می‌شود که این منبع یک منبع حیاتی و پرکاربرد در تقریباً تمام پژوهش‌هایی است که مورد بررسی قرار گرفته‌است. علاوه‌براین، مزارع بادی به‌علت در دسترس و پاک بودن جزو منبع انرژی پرکاربرد و حیاتی در آینده‌ی انرژی خواهند بود. در ادامه چند پژوهش مهم و اخیر در این زمینه به‌تفصیل بررسی می‌گردد و مزایا و معایب روش‌های ارائه شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین برخی از نتایج مهم شبیه‌سازی آورده شده در این پژوهش‌ها برای بیان دقیق‌تر مطالب آورده شده که به تفصیل در مورد آن‌ها توضیح داده شده است. بیشتر تحقیقات اخیر به استفاده از توربین‌ها و مزارع بادی به‌عنوان یک انرژی پاک و دسترس برای منبع Black start اشاره کرده‌اند و از روش‌های مختلف فرآیند Black start را در مثال‌ها و حالت‌های مختلف بهبود داده‌اند. بهبود به این معنی‌است که حالت گذرای توان، فرکانس و لتاژ در نیروگاه اصلی در هنگام Black out به کمک یک الگوریتم Black start پایدار و در محدوده‌ی مجاز می‌ماند و بدین ترتیب نیروگاه می‌تواند با ذخیره‌ی انرژی و استفاده‌ی به‌موقع از آن در زمان محدودی که Black out اتفاق افتاده است، به عملکرد مطلوب خود ادامه دهد.

فهرست عنواین:

فصل اول: مقدمه، تعاریف و انگیزه ۸

انگیزه‌های استفاده از انرژی بادی ۹

تاریخچه استفاده از انرژی بادی ۱۲

مفاهیم مقدماتی و انگیزه ی کار ۱۵

فرآیند BLACK START، مفاهیم و کاربرد آن ۱۵

مراحل یک بلک استارت ۱۶

محدودیتهای بلک استارت ۱۶

توربین‌های بادی مورد بهره‌برداری در جهان ۱۷

بخش‌های تشکیل‌دهنده‌ی نیروگاه بادی ۲۱

تقسیم‌بندی توربین‌های بادی ۲۳

طبقه‌بندی توربین‌های بادی از نظر ابعاد ۲۳

طبقه‌بندی توربین‌های بادی از نظر شکل محور ۲۴

طقه‌بندی توربین‌ها از نظر نوع چرخش در برابر باد ۲۵

طبقه‌بندی توربین‌ها از نظر سرعت ۲۵

بررسی سیستم‌های کنترل نیروگاه بادی ۲۶

کنترل فرآیند نیروگاه بادی ۲۶

مؤلفه‌های اصلی سیستم کنترل توربین بادی ۲۸

سنسورها ۲۸

تقویت‌کننده‌های قدرت ۲۹

عملگرهای توربین‌های بادی ۲۹

فصل دوم: بررسی بلک اوت نیروگاه و اسپینیگ رزرو نیروگاه ۳۰

مرور تفصیلی بر تحقیقات گذشته ۳۱

هوشمندسازی شروع سیستم Black start و ذخیرهی انرژی ۳۱

استفاده از سیستم همسایه به عنوان منبع Black start و کنترل فرکانس ۳۷

ملاحظات برای ذخیرهی انرژی در فرآیند Black start ژنراتور توربین گازی ۴۳

بهبود تکنولوژی Black start مبتنی بر توربین بادی برای شبکههای محلی ۴۹
بررسی Black start در نیروگاههای آبی ۵۷
تحققپذیری استفاده از مزرعهی بادی بهعنوان منبع Black start ۶۴
بهبود استراتژی کنترلی و الگوریتم Black start ۷۰
انتخاب و شبیهسازی Black start دیزل ژنراتور ۷۵
تعریف ظرفیت اضطراری ۷۸

فهرست اشکال:

شکل ۱-۱: توربین بادی اسمیت-آتنام ۱۱
شکل ۱-۱: توربین بادی با ژنراتور القایی قفس‌سنجابی (سرعت‌ثابت) ۱۹
شکل ۱-۲: توربین بادی با ژنراتور القایی دو تغذیه‌ای سرعت‌متغیر ۲۰
شکل ۱-۳: توربین بادی با ژنراتور سنکرون سرعت‌متغیر ۲۱
شکل ۱-۴: اجزای مختلف یک توربین بادی ۲۳
شکل ۱-۵: توربین بادی از نوع محور افقی ۲۴
شکل ۱-۶: توربین بادی از نوع محور عمودی ۲۵
شکل ۱-۷: نمای کلی یک سیستم کنترل ۲۸

شکل ۱-۸: سنسور سرعت شفت ۲۹
شکل ۲-۱: مدل توربین بادی در محیط PSCAD ۳۳
شکل ۲-۲: مدلی از توربین بادی و عملیات الحاق انرژی ذخیره شده در PSCAD ۳۴
شکل ۲-۳: مدل شروع سیستم توان بادی و سیستم ذخیرهی انرژی با بار سنسور مقاومتی (یک توربین بادی) ۳۵
شکل ۲-۴: نتایج شبیه سازی شامل ۱)شکل موج توان اکتیو ۲) شکل موج ولتاژ باس ۳۵
شکل ۲-۵: مدل شروع توربین بادی و سیستم ذخیرهی انرژی بادی با بار مسنسور مقاومای (دو توربین بادی) ۳۶
شکل ۲-۶: نتایج شبیه سازی شامل ۱)شکل موج توان اکتیو ۲) شکل موج ولتاژ باس ۳۷
شکل ۲-۷: نقطهی اتصال بین موتور AC و ژنراتر سنکرون ۳۹
شکل ۲-۸: کنترل کنندهی اینورتر دریافت کننده ۴۰
شکل ۲-۹: کنترلکنندهی یکسو کننده و فرستنده ۴۱
شکل ۲-۱۰: دو مسیر شکست شده برای راه اندازی موتور *AC* با نیروگاه آبی مجهز به اتصال مستقیم *AC* و سیستم *VSC-HDVC* ۴۱
شکل ۲-۱۱: راهاندازی موتور *AC* در طول مسیر یک و دو ۴۲
شکل ۲-۱۲: رفتار فرکانسی در طول راهاندازی موتور *AC* ۴۲
شکل ۲-۱۳: مقایسهی فرکانسی بین ناحیهی *A* (سمت چپ)، توان فعال تغذیه کنندهی یکسو کننده و تغییرات ولتاژ *DC* در طول راهاندازی موتور *AC* با و بدون کنترل کنندهی فرکانس اینرسی ۴۳
شکل ۲-۱۴: معماری *black start* ارائه شده برای تغذیهی باتری ۴۴
شکل ۲-۱۵: پروفایل بارگذاری موتور آغازگر استفاده شده برای چرخاندن توربین بادی ۴۶
شکل ۲-۱۶: حالت گذار با راهاندازی موتور آغازگر در سیستم چرخهی توربین گازی ۴۷
شکل ۲-۱۷: انرژی نهایی و توان کشیده از موتور در شبیهسازی کامل ۴۸
شکل ۲-۱۸: شبکهی قدرت منطقهی *Jiangsu* با قدرت ۵۰۰-*kV* در چین و سه ایستگاه *black start* ۵۰
شکل ۲-۱۹: ساختار سیستم قدرت محلی با مزرعهی بادی و نیروگاه گرمایی ۵۱
شکل ۲-۲۰: مدل ریاضی سیستم هدایت کنندهی دیزل ۵۲
شکل ۲-۲۱: مدل ریاضی سیستم تحریک بدون جاروبک ۵۲
شکل ۲-۲۲: ساختار سیستم توربین بادی متصل به شبکه ۵۳
شکل ۲-۲۳: مقادیر معتبر سیستم مجزا شده ۵۴
شکل ۲-۲۴: پاسخ فرکانسی سیستم مجزا شده ۵۵
شکل ۲-۲۵: پاسخ توان اکتیو ژنراتور دیزل ۵۵
شکل ۲-۲۶: پاسخ اکتیو توان تولید شده توسیستم توربین بادی ۵۶
شکل ۲-۲۷: پاسخ توان راکتیو سیستم SVG ۵۶
شکل ۲-۲۸: منابع *black start* در *MADHYA PRADESH* ۵۸

شکل ۲-۲۹: موقعیت جغرافیایی و اتصالات شبکهی *ISP* را در اتصال به بارهای ۴۰۰ *kV* ۶۰
شکل ۲-۳۰: دیاگرام *single line* سیستم جزیرهای در حین فرآیند *black start* در ۲۰۱۱ *May* ۲۲ ..... ۶۰
شکل ۲-۳۱: فرکانس جزیره وشبکه در ۲۰۱۱ *May* ۲۲ در فعالیت *black start* ۶۱
شکل ۲-۳۲: *Single line diagram* مربوط به فرآیند *black start* در ۲۰۱۴ *May* ۳۰ ..... ۶۲
شکل ۲-۳۳: فرکانس جزیره و شبکه در طول فرآیند توایند شامل عملکرد عادی و *black out* ۶۲
شکل ۲-۳۴: فرکانس شبکه و چزیره در طول فرآیند *black start* واحد مورد نظر و همزمان سازی با شبکه ۶۳
شکل ۲-۳۵: ساختار پایهی سیستم قدرت جدا شده ۶۴
شکل ۲-۳۶: سیستم خودکار مزرعهی بادی ذخیره کننده انرژی ۶۵
شکل ۲-۳۷: فرآیند ایدهآل شارژ کردن ترنسفورمر *TD* ۶۶
شکل ۲-۳۸: فرآینده ایدهآل شارژ کردن خطوط *Xiliang* و *Yixi* ۶۷
شکل ۲-۳۹: فرآیند ایدهآل شارژ کردن ترنسفورمر *TGB* ۶۸
شکل ۲-۴۰: فرآیند آغاز تغذیهی پمپ ۶۹
شکل ۲-۴۱: مسیر خروجی توان اکتیو و راکتیو سیستم *BESS* ۷۰
شکل ۲-۴۲: طرح واحد *black start* ۷۱
شکل ۲-۴۳: طرح کنترل سلسله ماتبی توان *BSU* ۷۱
شکل ۲-۴۴: فلوچارت توزیع واحد *BSU* ۷۲
شکل ۲-۴۵: دیاگرام برنامهی کنترل خروجی از مزرعهی بادی مبتنی بر لیست اولویت ۷۳
شکل ۲-۴۶: دیاگرام خطی واحد *BSU* استفاده شده در اهداف تست ۷۳
شکل ۲-۴۷: شبیه سازی نتایج تست روی پاسخ فرکانسی مزرعهی بادی ۷۴
شکل ۲-۴۸: شبیه سازی نتایج تست روی توربین گازی ۷۴
شکل ۲-۴۹: شبیهسازی نتایج تست ردیابی فرکانس ۷۴
شکل ۲-۵۰: شبیهسازی نتایج تست پاسخ ولتاژ مزرعهی بادی و *STATCOM* ۷۴
شکل ۲-۵۱: ساختار شبکهی قدرت پارک صنعتی ۷۶
شکل ۲-۵۲: دیاگرام مطلب مدل شبیهسازی شده ۷۶
شکل ۲-۵۳: نمودار سرعت دیزل ژنراتور برحسب pu ۷۷
شکل ۲-۵۴: نمودار جریان تغذیهکنندهی روتور و استاتور پمپ آب ۷۷
شکل ۲-۵۵: نمودار ولتاژ و فرکانس ترمینال دیزل ژنراتور ۷۷
شکل ۲-۵۶: شماتیک موقعیت black start در شمال چین ۷۸
شکل ۲-۵۷: فرآیند محاسبه در الگوریتم black start ۷۹
شکل ۲-۵۸: ترتیب عملیات در برابر خروجی ژنراتور ۸۰
شکل ۲-۵۹: سیستم آزمایشی برای black start ۸۰
شکل ۲-۶۰: توان خروجی ژنراتور Black start ۸۱

فصل اول:

مقدمه، تعاریف و انگیزه

انگیزه‌های استفاده از انرژی بادی

انرژی بخش بزرگی از نیاز گذشته، حال و آینده‌ی بشریت را تشکیل داده است و در حال حاضر تبدیل به یکی از نگرانی‌های بشریت برای آینده شده است [۱]. امروزه با توجه به افزایش روزافزون انواع مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی در شبکه، صنعتی شدن، افزایش جمعیت جهان، افزایش حمل و نقل و همچنین افزایش شاخص مصرف انرژی به دلیل افزایش استانداردهای زندگی، نیاز به گسترش شبکه‌ی موجود و افزایش تولید انرژی الکتریکی بیش از پیش احساس می‌شود. کاهش منابع سوخت فسیلی، افزایش روزافزون هزینه‌ی آنها و مصرف بی‌رویه‌ی انرژی از مهمترین دلایلی است که پژوهشگران را بر آن داشته تا روش‌های جدیدی برای تولید انرژی ارائه دهند. مسئله‌ی مهم در مورد انرژی‌های فسیلی، تأثیرات سود زیست‌محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی است. این سوخت‌ها به عنوان یک تولیدکننده‌ی بزرگ گازهای گلخانه‌ای نظیر تأثیر CO_2 در الگوهای هواشناسی به اضافه‌ی سوخت ناقص هیدروکربن‌ها و مواد احتراقی مانند اکسیدهای نیتروژن و گوگرد در تخریب سلامتی و محیط، یکی از بزرگترین نگرانی‌ها در حوزه‌ی محیط‌زیست را به وجود آورده‌اند. لذا روش‌های جدید تولید انرژی وابسته به طبیعت به وجود آمده که نسبت به روش‌های تولید با سوخت فسیلی، آلودگی‌های کمتری را ایجاد می‌کنند. اما با توجه به اینکه مقدار توان تولیدشده بستگی به تغییرات تصادفی منابع طبیعی انرژی از قبیل باد، خورشید، موج و ... دارد، عموماً خروجی این روش‌ها غیرقابل پیش‌بینی و با قابلیت اطمینان پایین می‌باشند. انرژی‌های تجدیدپذیر در حقیقت انرژی موجود در حرکت طبیعی باد، آب و نورخورشید در محیط می‌باشند. این انرژی‌ها پیوسته به همان‌صورت که استخراج و مصرف می‌شوند، دوباره ساخته شده و هیچ‌گاه تمام نمی‌شوند [۲] و [۳].

انرژی‌های تجدیدپذیر بدون داشتن فرآیندهای شیمیایی و عدم تولید گاز CO_2 و گازهای خطرناک دیگر و همچنین فراوانی و تمیز بودن آنها، ایجاد حالت‌های متنوع برای فراهم کردن انرژی، افزایش استقلال تولید انرژی و ترفیع انتخاب مصرف‌کننده بسیار مورد توجه می‌باشند [۴].

تاریخچه‌ی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مربوط به صدها سال قبل است. آسیاب‌های بادی در یونان و روم باستان، اولین آسیاب‌های بادی با محور عمودی در ایران (قرن هفتم میلادی)، آسیاب‌های بادی در انگلستان (قرن دهم میلادی) و آسیاب‌های بادی در چین و افغانستان و ... از نمونه‌های اولیه‌ی مبدل‌های انرژی‌های تجدیدپذیر بوده‌اند. در وضعیت کنونی نزدیک به ۲۰٪ از مصرف انرژی جهان مربوط به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است [۵].

با تابش نور خورشید در عرض‌های مختلف کره‌ی زمین موجب تغییراتی در فشار و دمای هوا شده و باد به وجود می‌آید. اتمسفر کره به وسیله‌ی چرخش زمین حول محور خود که از قطبین زمین عبور می‌کند، گرما را از مناطق گرمسیر به مناطق قطبی انتقال می‌دهد. علاوه بر عوامل فوق، عوامل دیگری مانند مشخصات توپوگرافی محل و تغییرات فصلی دما، توزیع انرژی باد را تغییر می‌دهد. برای مثال اختلاف ظرفیت گرمایی بین زمین و آب دریا در ساحل، ایجاد نسیم دریایی می‌کند و در دره‌ها و کوهستان‌ها فرآیند مشابهی منجر به ایجاد بادهای محلی می‌شود. دو درصد از انرژی خورشیدی که به زمین می‌رسد به باد تبدیل شده و۳۵ درصد

انرژی باد در یک کیلومتری از سطح زمین موجود است. محاسبات نشان می‌دهد که برای تمام سیاره‌ی زمین این انرژی برابر انرژی مصرفی دنیاست [۶] و [۷].

توجه به اهمیت بسیار زیاد انرژی در زندگی امروز و افزایش قیمت و نیز محدودیت سوخت‌های فسیلی موجود، دنیای امروز به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی مورد نیاز خود روی آورده است. انرژی باد در حال حاضر سریع‌ترین رشد را در بین منابع انرژی الکتریکی داراست. در آمریکا که در حال حاضر حدود ۱درصد از انرژی ملی آن از انرژی باد تأمین می‌گردد، ظرفیت تولید ۲۰درصد از انرژی الکتریکی این کشور از انرژی باد بدون تغییرات اساسی در شبکه‌ی توزیع برق وجود دارد. با وجود این هنوز مسائل حل‌نشده‌ی زیادی در مورد توسعه‌ی توان باد وجود دارد [۸].

انرژی باد برای مدت زمان زیادی است که مورد استفاده قرار گرفته است. اولین زمینه‌ی کاربردی آن در حدود ۵۰۰۰ سال پیش برای حرکت قایق‌ها در طول رودخانه‌ی نیل بوده است. اولین آسیاب‌بادی‌های ساده در اوایل قرن ۷ در ایران برای اهداف آبیاری و نیز آسیاب کردن دانه‌ها استفاده شد. در اروپا از زمانی‌که کراسیدور[۱] آسیاب‌های بادی را در قرن ۱۱ مصرف کرد، انرژی باد مورد استفاده قرار گرفت. سازه‌ی آنها بر اساس چوب بود و برای محصور کردن باد، به صورت دستی آسیاب را حول ستون اصلی آن می‌چرخاندند. در سال ۱۷۴۵ وسیله‌ای به نام دم‌چتری[۲] اختراع شد که به عنوان یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در تاریخچه‌ی آسیاب‌های بادی محسوب می‌شد. این وسیله به صورت اتوماتیک توربین را رو به باد می‌چرخاند. درپوش‌های چوبی می‌توانستند به صورت دستی یا اتوماتیک باز و بسته شوند تا مقدار ثابتی از باد را در سرعت‌های متغیر باد محصور کنند. مفهوم پیشرفته‌تری از آسیاب‌های بادی در انقلاب صنعتی بیان شد. میلیون‌ها آسیاب بادی در قرن نوزدهم در ایالات متحده‌ی آمریکا ساخته شد که دلیل افزایش چشمگیر استفاده از آن به خاطر پیشرفت در آمریکای غربی بود. خانه‌های جدید و کشاورزان نیاز به راه‌هایی برای بیرون آوردن آب داشتند. روند انقلاب صنعتی بعدها باعث کاهش استفاده از آسیاب‌های بادی گردید [۹].

بنابراین در طی روند انقلاب صنعتی جرقه‌ی استفاده از آسیاب‌بادی‌های بزرگ برای تولید انرژی برق زده شد. اولین توربین بادی جهت تولید برق، توسط پل لاکور[۳] ابداع شد. در اواخر ۱۹۳۰ آمریکایی‌ها طراحی یک توربین بادی در ابعاد مگاوات را شروع کردند که نتیجه‌ی آن توربین بادی اسمیت-آتنام[۴] با طرفیت ۱/۲۵MW بود. شکل زیر در سال ۱۹۴۱ بزرگترین توربین ساخته شده تا آن زمان بود و این امکان را برای ۴۰سال حفظ کرد.

---

[۱] Crusaders

[۲] fantail

[۳] Poul la cour

[۴] Smith-Putnam

شکل ۰-۱: توربین بادی اسمیت-آتنام

منابع بادی سوخت یک توربین بادی می‌باشند و تغییرات اندک در میزان باد، اثرات بزرگی بر ارزش تجاری برق تولیدی آن دارد. انرژی موجود در باد با مکعب سرعت باد متناسب است.

در چند سال اخیر به علل مختلفی کشورها به نصب توربین در دریا پرداخته‌اند که از جمله مهمترین آنها، یکی آنکه می‌توان آنها را بزرگتر از توربین‌های روی خشکی ساخت و بنابراین حجم برق تولیدی در هر توربین افزایش می‌یابد و دیگر آنکه در سطح دریاها بادهای بیشتر و عظیم‌تری می‌وزد. توربین‌های بادی دریایی معمولاً در آب‌های نسبتاً کم‌عمق (کمتر از ۳۰ متر) ساخته می‌شوند. در آب‌های عمیق‌تر نیز ساخت آنها امکان‌پذیر است که مهمترین آنها سکوهای نفتی دریای شمال است اما برق تولید شده گران می‌شود [۱۰].

شهرت استفاده از انرژی باد همواره تحت تأثیر قیمت سوخت‌های فسیلی بوده است. تحقیقات و توسعه در زمینه‌ی انرژی اتمی و دسترسی به نفت در طی دهه‌ی ۱۹۶۰ منجر به کاهش توسعه‌ی توربین‌های بادی گردید اما زمانی‌که قیمت نفت در دهه‌ی ۱۹۷۰ ناگهان افزایش یافت، تمایل به استفاده از توربین‌های بادی دوباره بالا رفت.

توربین‌های بادی خشکی معمولاً دارای توان حدود ۳-۱ مگاوات و پره‌هایی به طول ۱۰۰-۶۰ متر و توربین‌های بادی دریایی غالباً دارای توان حدود ۳-۱/۵ مگاوات و پره‌هایی به طول ۱۲۵-۷۵ متر هستند.

بزرگترین توربین در آلمان ساخته شده که قدرت آن ۷ مگاوات است. یک توربین بادی ۱۰ کیلوواتی در یک مکانی که سرعت باد به طور متوسط ۱۲ مایل در ساعت باشد، قادر است سالانه حدود ۱۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت برق تولید کند. در آسیاب‌های بادی، از انرژی باد مستقیماً برای خردکردن دانه‌ها و یا پمپ‌کردن آب استفاده می‌شود. در انتهای سال ۲۰۱۰ میلادی میزان ظرفیت نامی تولید برق بادی در سراسر جهان برابر ۱۹۷ گیگاوات بوده است [۱۱].

براساس اطلاعات منتشرشده از طرف سازمان انرژی‌های نو در سال ۱۳۸۶، جهت‌گیری این سازمان در چهارمین برنامه‌ی اقتصادی کشور، تولید ۵۰۰ مگاوات انرژی الکتریکی از انرژی‌های نو از طریق پروژه‌های خصوصی و دولتی است که ۱درصد ظرفیت نیروگاهی نصب شده را در پایان برنامه (سال ۱۳۸۸) شامل می‌شود.

در زمینه‌ی انرژی بادی فعالیت‌های سازمان انرژی‌های نو عمدتاً در دو منطقه‌ی منجیل (گیلان) و بینالود (خراسان) متمرکز است. توربین‌های بادی منجیل درحال حاضر ۴۵ مگاوات معادل ۷۵ درصد کل ظرفیت برق نیروگاه‌های بادی کشور را تولید می‌کنند. ۲۵ درصد بقیه، سهم توربین‌های بینالود است. در مجموع در دو منطقه‌ی یاد شده حدود ۱۰۰ توربین فعال هستند.

درایران با توجه به وجود مناطق بادخیز، طراحی و ساخت آسیاب بادی از ۲۰۰ سال پیش از میلاد مسیح رایج بوده و هم‌اکنون نیز بستر مناسبی جهت گسترش بهره‌برداری از توربین‌های بادی فراهم است. مطالعات و محاسبات انجام‌شده در زمینه‌ی تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان داده‌اند که تنها در ۲۶ منطقه از کشور (شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب)، میزان ظرفیت اسمی سایت‌ها، با در نظر گرفتن یک بازده‌ی کلی ۳۳٪، در حدود ۶/۵MW است و این در شرایطی است که ظرفیت اسمی کل نیروگاه‌های برق کشور در حال حاضر حدود ۳۴۰۰۰MW می‌باشد.

تاریخچه استفاده از انرژی بادی

یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر انرژی باد است. تاریخچه‌ی استفاده از انرژی باد نشان می‌دهد که پیشینیان ما از گذشته‌های بسیار دور درصدد بهره‌جستن از این انرژی به عنوان نیرومحرکه در انجام کارهای خود بوده‌اند.

سیستم‌های ابتدایی استفاده از این انرژی در چین باستان و خاور نزدیک به کار گرفته شد و اولین کرجی که به وسیله‌ی انرژی باد به حرکت درآمد توسط مصریان جهت رفت‌وآمد بر روی رودخانه ساخته شد و همچنین ایرانیان نخستین آسیاب بادی را که پره‌های آن توسط نیروی باد چرخانده می‌شد، جهت آرد کردن غلات در آن زمان ساختند.

در جریان جنگ‌های صلیبی، فن‌آوری استفاده از انرژی باد به اروپا انتقال یافت به طوری‌که در قرن ۱۴ میلادی، هلند پیشرفته‌ترین کشور در زمینه‌ی استفاده از انرژی باد محسوب گردید و در نیمه‌ی دوم قرن نوزدهم، کشور دانمارک در استفاده از انرژی باد پیشرفت زیادی پیدا کرد به طوری‌که بیش از ۲۵٪ از نیاز خود به انرژی را از انرژی باد تأمین می‌کرد. نیروی باد جزء منابع جدید تولید برق است که امروزه سریع‌ترین رشد را در سطح جهانی به خود اختصاص داده است [۱۲].

نیروی باد، پره‌های توربین بادی را که در بالای برج‌های بلند نصب می‌شوند به حرکت درمی‌آورند و این پره‌ها از طریق شفت یا میله‌ی گردان انتقال‌دهنده‌ی حرکت و یک‌سری چرخ‌دنده، ژنراتور الکتریکی را به حرکت درمی‌آورند. اولین توربین بادی در سال ۱۹۴۰ توسط اسمیت[۵] که ژنراتور آن با جریان DC کار می‌کرد و دارای دو پره بود، ساخته شد. سپس در سال‌های پس از آن توربین‌های سه‌پره‌ای ساخته شدند که ژنراتورهای آسنکرون AC جایگزین ژنراتورهای DC در آن زمان گشتند. به خاطر بهبود فن‌آوری شامل نوآوری‌های

---

[۵] F.L.Smith

طرح‌های تولیدی، توربین‌های بزرگ‌تر با کارایی بیشتر در زمینه‌های مختلف از قبیل تولید آب شیرین و ...، برق بادی توان رقابت با منابع متعارف فسیلی را پیدا کرده است.

در بهترین سایت‌های بادی، هزینه‌های تولید برق بادی در حال حاضر، معادل هزینه‌ی تولید برق از نیروگاه‌های جدید زغال‌سنگ‌سوز و گازسوز است. اگر هزینه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی تولید برق نیز در محاسبات مد نظر قرار گیرد، برق بادی ارزان‌تر از دیگر فن‌آوری‌های تولید برق است. از سوی دیگر، برق بادی موجب حذف اثرات اقتصادی در ریسک‌های مربوط به قیمت‌های متزلزل و فرآیند سوخت‌های فسیلی می‌شود و با توجه به هزینه‌های ثابت و مشخص برق بادی، هیچ‌گونه نااطمینانی نسبت به قیمت آتی برق وجود نخواهد داشت [۱۳].

پژوهشگران معتقدند که برای رقابتی کردن قیمت برق بادی هنوز به پیشرفت‌های تکنولوژیک بیشتری نیاز است که بتواند قیمت برق بادی را تا ۳۰درصد دیگر کاهش دهد تا این نوع انرژی بتواند به طور کامل با سوخت‌های سنتی نظیر سوخت فسیلی رقابت کند.

در حال حاضر انرژی باد با رشد متوسط سالیانه‌ی بیش از ۲۶درصد از سال ۱۹۹۰ به بعد، بالاترین میزان رشد را در بین منابع مختلف انرژی داشته است و از نظر تاریخی بازار انرژی بادی عمدتاً تحت کنترل پنج کشور آلمان، اسپانیا، ایالات متحده‌ی آمریکا، هلند و دانمارک بوده است. روند رو به افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران و به ویژه وجود منابع قابل توجه انرژی باد در کشور در سواحل جنوبی، استان‌های غربی و شمالی و سیستان و بلوچستان لزوم بررسی و بهینه‌سازی استفاده از توربین‌های بادی را لازم می‌دارد [۱۴].

اولین توربین بادی در ایران در سال ۱۳۷۸ در منجیل نصب شد. بر این اساس می توان گفت که ۸ سال پس از آن تاریخ، سالانه ۸ توربین در کشور نصب شده است که بسیار ناچیز است.

کاربرد این نوع از منابع انرژی به صورت مستقل از شبکه افزایش چشمگیری پیدا کرده است. با در نظر گرفتن رشد سریع استفاده از ذخایر سوخت‌های فسیلی، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر سهم عمده‌ای در آینده‌ی منابع انرژی خواهند داشت [۱۵]. منابع انرژی جایگزین، ماهیت غیرآلاینده داشته و در دسترس هستند [۱۶]. با این وجود کاربرد آنها در سیستم‌های توزیع سنتی، به دلیل هزینه‌ی اولیه‌ی زیاد و مسائل پایداری، محدود است [۱۷] و [۱۸]. مهمترین مسأله در مورد این سیستم‌های دوست‌دار محیط‌زیست، هزینه‌ی و قابلیت اطمینان سیستم است. یکی از امیدبخش‌ترین کاربردهای تولیدات انرژی نو در زمینه‌ی توسعه‌ی سیستم‌های تغذیه برای مناطق دوردست که اتصال به شبکه‌ی سراسری در این موارد مقرون به صرفه نخواهد بود، است [۱۹] و [۲۰]. تنها در سال ۲۰۰۶، ۱۵/۶گیگاوات بر توان نیروگاه‌های بادی نصب شده در سراسر جهان گزارش شده است. لازم به ذکر است که توان نصب شده‌ی کل تا سال ۲۰۰۶، ۲/۷گیگاوات بوده است که در ۱۰ سال اخیر این مقدار رشد تقریباً ۱۰برابری را نشان می‌دهد [۲۱]. سیستم‌های نیروگاهی تولید توان مستقل کوچک، جایگزین باارزشی برای منابع انرژی الکتریکی می‌باشند. این‌گونه سیستم‌ها در مناطقی که استقرار سیستم تولید مرسوم امکان‌پذیر نیست، کاربرد دارند. به عنوان مثال روستایی دورافتاده در یک کشور در حال توسعه و کشتزاری دور از شبکه‌ی اصلی برق را در نظر بگیرید. نشان داده شده است که تأمین برق

باری که فقط چند کیلومتر از خطوط اصلی قدرت فاصله دارد، توسط توربین بادی مستقل از شبکه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است [۲۲].

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

منابع:

[۱] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, and N. Durrani, “Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine,” *Renew. Energy*, vol. ۳۵, no. ۲, pp. ۴۱۲–۴۲۲, ۲۰۱۰.

[۲] E. Martínez, J. Blanco, E. Jiménez, J. C. Saenz-Díez, and F. Sanz, “Comparative evaluation of life cycle impact assessment software tools through a wind turbine case study,” *Renew. Energy*, vol. ۷۴, pp. ۲۳۷–۲۴۶, ۲۰۱۵.

[۳] R. H. Barnes, E. V. Morozov, and K. Shankar, “Improved methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades,” *Compos. Struct.*, vol. ۱۱۹, pp. ۶۷۷–۶۸۴, ۲۰۱۵.

[۴] Y. Guo, R. Bergua, J. van Dam, J. Jove, and J. Campbell, “Improving wind turbine drivetrain reliability using a combined experimental, computational, and analytical approach,” in *ASME ۲۰۱۴ International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, ۲۰۱۴, pp. V۰۰۷T۰۵A۰۰۴–V۰۰۷T۰۵A۰۰۴.

[۵] K. S. Hansen, R. J. Barthelmie, L. E. Jensen, and A. Sommer, “The impact of turbulence intensity and atmospheric stability on power deficits due to wind turbine wakes at Horns Rev wind farm,” *Wind Energy*, vol. ۱۵, no. ۱, pp. ۱۸۳–۱۹۶, ۲۰۱۲.

[۶] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, “Wind turbine power coefficient analysis of a new maximum power point tracking technique,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. ۶۰, no. ۳, pp. ۱۱۲۲–۱۱۳۲, ۲۰۱۳.

[۷] L. Arany, S. Bhattacharya, J. Macdonald, and S. J. Hogan, “Simplified critical mudline bending moment spectra of offshore wind turbine support structures,” *Wind Energy*, ۲۰۱۴.

[۸] J. H. Laks, L. Y. Pao, and A. D. Wright, “Control of wind turbines: Past, present, and future,” in *American Control Conference, ۲۰۰۹. ACC’۰۹.*, ۲۰۰۹, pp. ۲۰۹۶–۲۱۰۳.

[۹] R. L. Hills, *Power from wind: a history of windmill technology*. Cambridge University Press, ۱۹۹۶.

[۱۰] O. Badran, “Wind turbine utilization for water pumping in Jordan,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. ۹۱, no. ۱۰, pp. ۱۲۰۳–۱۲۱۴, ۲۰۰۳.

[۱۱] P. J. Fritz, K. G. Harding, and B. G. Moore, *System and method for performing an external inspection on a wind turbine rotor blade*. Google Patents, ۲۰۱۴.

[۱۲] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, ۲۰۱۰.

[۱۳] J. G. Slootweg, H. Polinder, and W. L. Kling, “Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations,” *Energy Convers. Ieee Trans. On*, vol. ۱۸, no. ۴, pp. ۵۱۶–۵۲۴, ۲۰۰۳.

[۱۴] “سازمان انرژی‌های نو ایران.” گروه توسعه‌ی نیروگاه‌های بادی، گزارش عملکرد سالیانه نیروگاه‌های برق بادی.

[۱۵] M. M. Badejani, M. A. S. Masoum, and M. Kalantar, “Optimal design and modeling of stand-alone hybrid PV-wind systems,” in *Power Engineering Conference, ۲۰۰۷. AUPEC ۲۰۰۷. Australasian Universities*, ۲۰۰۷, pp. ۱–۶.

[۱۶] M. A. Green, “Solar cells: operating principles, technology, and system applications,” ۱۹۸۲.

[۱۷] A. A. Ghoneim, “Environmental impacts of grid connected photovoltaic system adapted for peak load reduction in Kuwait,” *Chem. Eng.*, vol. ۲۹, ۲۰۱۲.

[۱۸] M. Zigliotto, M. Carraro, R. Antonello, and A. Costabeber, “A fast-MPPT low-complexity autonomous PV water pumping scheme for PMSM,” ۲۰۱۴.

[۱۹] E. S. Gavanidou, A. G. Bakirtzis, P. S. Dokopoulos, and D. A. Pantousas, “Design of a stand alone system with renewable energy sources,” in *Athens Power Tech, ۱۹۹۳. APT ۹۳. Proceedings. Joint International Power Conference*, ۱۹۹۳, vol. ۲, pp. ۷۱۶–۷۲۰.

[۲۰] E. S. Gavanidou and A. G. Bakirtzis, “Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods,” *Energy Convers. IEEE Trans. On*, vol. ۷, no. ۱, pp. ۴۲–۴۸, ۱۹۹۲.

[۲۱] T. S. Pedersen, P. Andersen, K. M. Nielsen, H. L. Starmose, and P. D. Pedersen, “Using heat pump energy storages in the power grid,” in *Control Applications (CCA), ۲۰۱۱ IEEE International Conference on*, ۲۰۱۱, pp. ۱۱۰۶–۱۱۱۱.

[۲۲] A. Beluco, P. K. de Souza, and A. Krenzinger, “A method to evaluate the effect of complementarity in time between hydro and solar energy on the performance of hybrid hydro PV generating plants,” *Renew. Energy*, vol. ۴۵, pp. ۲۴–۳۰, ۲۰۱۲.

[۲۳] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, “A review of power converter topologies for wind generators,” *Renew. Energy*, vol. ۳۲, no. ۱۴, pp. ۲۳۶۹–۲۳۸۵, ۲۰۰۷.

[۲۴] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafáfila-Robles, “A review of energy storage technologies for wind power applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. ۱۶, no. ۴, pp. ۲۱۵۴–۲۱۷۱, ۲۰۱۲.

[۲۵] A. Garces and M. Molinas, “A study of efficiency in a reduced matrix converter for offshore wind farms,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. ۵۹, no. ۱, pp. ۱۸۴–۱۹۳, ۲۰۱۲.

[۲۶] G.-H. Kim, N. Kim, K.-M. Kim, M. Park, I.-K. Yu, S. Lee, and T.-J. Park, “EMTDC based simulation of ۱۰ MW class grid-connected superconducting wind turbine generator,” *Appl. Supercond. IEEE Trans. On*, vol. ۲۲, no. ۳, pp. ۵۲۰۲۱۰۵–۵۲۰۲۱۰۵, ۲۰۱۲.

[۲۷] J. Fuglsang-Petersen and J.-B. Franke, *Gear box of a wind power plant*. Google Patents, ۲۰۱۴.

[۲۸] J. Bettermann, B. Bloch, A. Frye, and M. Gottschalk, *Wind farm, wind power plant in a wind farm and operating control for this purpose*. Google Patents, ۲۰۱۴.

[۲۹] K. Nęcka and J. Knaga, “Quality characteristics of electric energy generated in a wind power plant,” *Agric. Eng.*, vol. ۱۸, ۲۰۱۴.

[۳۰] S. Davoust, A. Jehu, M. Bouillet, M. Bardon, B. Vercherin, A. Scholbrock, P. Fleming, and A. Wright, “Assessment and Optimization of Lidar Measurement Availability for Wind Turbine Control,” ۲۰۱۴.

[۳۱] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, ۲۰۰۱.

[۳۲] J. M. Espí and J. Castelló, “Wind turbine generation system with optimized DC-link design and control,” *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. ۶۰, no. ۳, pp. ۹۱۹–۹۲۹, ۲۰۱۳.

[۳۳] C. Jauch, “A flywheel in a wind turbine rotor for inertia control,” *Wind Energy*, ۲۰۱۴.

[۳۴] X. Yao, C.-C. Guo, and Y. Li, “LPV H-infinity controller design for variable-pitch variable-speed wind turbine,” in *Power Electronics and Motion Control Conference, ۲۰۰۹. IPEMC’۰۹. IEEE ۶th International*, ۲۰۰۹, pp. ۲۲۲۲–۲۲۲۷.

[۳۵] D. Wood, *Small wind turbines*. Springer, ۲۰۱۱.

[۳۶] Wang. A, "Self-starting analysis of new energy system with wind power and energy Storage", Proceedings of the ۳۷th Chinese Control Conference, July۲۵-۲۷, ۲۰۱۸, Wuhan, China.

[۳۷] Akbulut. A, “Neighboring System as Black Start Source and Restoration Process based on the VSC-HVDC as Tie Line,”, *۲۰۱۷. EPE'۱۷ ECCE Europe*.

[۳۸] Beil, I, “Considerations when using Utility-Scale Battery Storage to Black Start a Gas Turbine Generator,” *IEEE Conference International*, ۲۰۱۷.

[۳۹] Fitzgerald, J., et al. “The economics of battery energy storage.” Rocky Mountain Institute, Oct ۲۰۱۵..

[۴۰] Keller, James, and Benjamin David Kroposki. “Understanding fault characteristics of inverter-based distributed energy resources.” National Renewable Energy Laboratory, ۲۰۱۰.

[۴۱] NFPA ۸۵, “Boiler and Combustion Systems Hazard Code.” ۲۰۱۵ Edition, National Fire Protection Association.

[۴۲] Dai. J, “Black Start Technology for Local Power Grid via PMSG-based Wind Power Generation” *IEEE International Conference*, ۲۰۱۷.

[۴۳] P. Mukhopadhyay, “Black Start Experiences for ۴۰۰ kV Hydro Power Plant In Western Regional Grid of,” *IEEE International Conference*, ۲۰۱۶.

[۴۴] Liu. L “A Feasibility Study of Applying Storage-Based Wind Farm as Black-Start Power Source in Local Power Grid,” *۲۰۱۶ International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies*.

[۴۵] M. Zengqiang, S. Xunwen, and Y. Qixun, “Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms,” *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. ۲۵, issue. ۵, pp. ۱۶۲-۱۶۹, ۲۰۱۰.

[۴۶] H. Xing, J. Xinmin, and M. Lin, and Y. Li, “An optimized island micro-grid black-start control method,” *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. ۲۸, issue. ۴, pp. ۱۸۲-۱۹۰, ۲۰۱۳.

[۴۷] Teng. W, “Construction and Control Strategy Research of Black Start Unit Containing Wind Farm," *IEEE International Conference*, ۲۰۱۵.

[۴۸] Liu. M “Selection and Simulation of Black-start Diesel Generating Set in Regional Power Grid,” *۲۰۱۸ China International Conference on Electricity Distribution*, Tianjin, ۱۷-۱۹ Sep.

[۴۹] Q S Meng and G R Zhang, “Discussion on Capacity Selection Black Start Diesel Generator” SHANDONG DIANLI JISHU, vol. ۲, pp ۲۱–۲۵, ۲۰۱۰.

[۵۰] IEEE Task force on load representation for dynamic performance Standard load models for power flow and dynamic performance simulation, *IEEE Trans on Power Systems*, vol. ۱۰, pp ۱۳۰۲–۱۳۱۳, ۱۹۹۵.

[۵۱] Shang. J, “etermining the Emergency Capacity of the Upper Reservoir for,” *ICSET ۲۰۰۸, IEEE International*, ۲۰۰۸.