مجله پژوهش های معاصر در علوم و تحقیقات
سال ششم، شماره ۵۷، فروردین ۱۴۰۳
ISSN: ۲۶۷۶-۵۷۶٤
www.jocrisar.ir

بررسی دستگاه های کنترل کننده سیستم های توربین بادی

حمید لشنی [۱]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی برق دانشگاه شاهد

چکیده

امروزه با افزایش روزافزون مصرف انرژی و کاهش منابع سوخت فسیلی و آثار زیان‌آور آن بر محیط زیست توجه به انرژی‌های نو، به‌ویژه انرژی بادی ، به یک اولویت مهم تبدیل شده‌است و با توسعه فناوری و افزایش تقاضا برای انرژی پاک، توجه به توربین های بادی به عنوان یکی از راهکارهای اصلی در تولید انرژی برای جامعه گسترش یافته است. از این رو، کنترل توربین‌های بادی به منظور بهره‌وری حداکثری و مقاومت در برابر نوسانات ضروری به نظر می‌رسد. سیستم‌های کنترل کننده ، ضمن ماکزیمم کردن توان تولیدی توربین‌های بادی می‌توانند به پایداری سیستم و کاهش ناپایداری‌ها کمک کنند. پژوهش حاضر تجزیه و تحلیل کتابخانه ای- توصیفی می‌باشد که با گرد آوری اطلاعات از طریق مقالات، کتب، اسناد و پایگاه‌های الکترونیکی معتبر اقدام به مرور جامع و سیستماتیک از سیستم‌های کنترل کننده توربین بادی و بررسی ویژگی‌ها، عملکرد، این سیستم‌ها کرده است. یافته های حاصله حاکی از آن است که بهره گیری روش‌های کنترل‌کننده ضمن بهبود عملکرد سیستم‌های بادی، موجب به حداقل رساندن خطاهای تغییرات بسامد، بهینه‌سازی توان و کاهش هزینه‌ها نیز می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کنترل کننده، توربین بادی، کنترل، کنترلگر

مقدمه

امروزه با افزایش روزافزون مشکلات زیست محیطی ناشی از فعالیت نیروگاه هایی که از سوخت های فسیلی و یا هسته ای استفاده می کنند اهمیت استفاده از انرژی های تجدیدپذیر دو چندان شده است. در این میان، انرژی باد به سبب مزایای اقتصادی به ویژه در زمینه کاهش هزینه‌های تولید برق در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، مورد توجه ویژه قرار گرفته است..(حمیدی و همکاران،۱۳۹۹) بر اساس داده ها تا پایان سال ۲۰۱۵ حدود ۲۴٪ از سهم تولید انرژی در جهان به منابع تجدیدپذیر اختصاص یافته است ، در حال حاضر این رقم بسرعت رو به افزایش است. از میان منابع تولید انرژی تجدیدپذیر، تولیدات بادی حدود ۳,۷٪ یعنی چیزی در حدود ۴۳۳ گیگاوات سهم داشته اند.(کاظمی بوکی،۱۳۹۷) توربین های بادی به عنوان عنصر اساسی منابع بادی با تبدیل انرژی مکانیکی باد به انرژی الکتریکی، می‌توانند برق موردنیاز قسمتی از شبکه را تأمین کنند. کاهش هزینه ی ساخت توربین های بادی و بهبود عملکردی آن، موجب توجه گسترده سرمایه گذران به احداث مزارع بادی شده است.(هاشمی و همکاران، ۱۳۹۷) اما با توجه به ساختار و ترکیب بندی متفاوتی که نیروگاه های بادی از نیروگاه های کلاسیک دارند. نداشتن قطعیت و عدم ثبات در توان تولیدی این نیروگاه ها نه تنها بر پایداری شبکه قدرت تاثیر می گذارد بلکه موجب افزایش هزینه های مدیریت توان و کنترل انرژی نیز می شود.(طاهری و همکاران، ۱۴۰۱) بنابراین ، کنترل توربین‌های بادی به منظور بهره وری حداکثری و تحویل انرژی قابل اطمینان به شبکه اهمیت بسزایی دارد.(شمس، ۱۳۹۸) و کنترل کننده ها به عنوان یکی از اجزای اصلی سیستم های بادی نقش مهمی را در بهبود نوسانات ناشی از بروز اغتشاشات در سیستم را با استفاده از مدارات کنترلی بر عهده دارند و دستورات لازم جهت دریافت انرژی موردنظر و نیز حفظ پایداری سیستم بادی را ارائه می دهند.(سید موسوی،۱۳۹۲)(حمیدی و همکاران، ۱۳۹۹) اهداف کنترل توربین بادی با توجه به تغییرات سرعت باد، متفاوت است. در سرعت‌های باد کمتر از سرعت نامی، هدف اصلی از کنترل توربین بادی دریافت بیشینه توان از سیستم می‌باشد. این هدف توسط ردیابی مقدار بهینه‌ی سرعت ژنراتور حاصل می‌شود. در این ناحیه، با حفظ زوایای پیچ پره‌ها در مقدار بهینه‌ی صفر، مقدار ورودی گشتاور ژنراتور با توجه به سرعت باد به نحوی تغییر می‌کند که در هر لحظه بیشینه توان ممکن از توربین بادی استخراج گردد. در مقابل، در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی باد، یا ناحیه‌ی بار کامل، هدف اصلی از کنترل توربین بادی حفظ توان خروجی در مقدار نامی آن می‌باشد. با حفظ گشتاور ژنراتور در مقدار نامی و تنظیم زوایای پیچ پره‌ها، توربین بادی به گونه‌ای کنترل می‌شود که توان خروجی آن در مقدار نامی باقی بماند. (قنبرپور،۱۳۹۹) با توجه به اینکه سامانه کنترلی با الگوریتم های کنترلی متفاوت با توجه به شرایط ناحیه کاملا در دسترس و قابل ساخت است. در سالیان اخیر روش های زیادی برای کنترل قسمت های مختلف توربین بادی مورد مطالعه قرارگرفته است(قنبرپور،۱۳۹۹) بررسی مقالات مختلف نشان دهنده آن است که تکنیک های کنترلی متعددی در مبحث کنترل وجود دارد که از این میان می توان به کنترل کننده کلاسیک، بهینه، فازی ، تطبیقی، پیش بین و .... اشاره داشت.(زمانی و همکاران، ۱۴۰۳) (قنبرپور،۱۳۹۹) رضایی و همکاران او (۱۴۰۱) ضمن طراحی کنترل کننده تحمل پذیر عیب مبتنی بر کنترل مدلغزشی و سیستم فازی برای سیستم های توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم بیان داشتند که در سیستم کنترل ترکیبی طراحی شده، کنترل مدلغزشی موجب افزایش مقاوم بودن و سیستم فازی موجب تطبیق پذیری کنترل کننده شده است. این نحوه ترکیب و بهره مندی از مزایای کنترل کننده های کلاسیک و هوشمند سبب افزایش تحمل‌پذیری سیستم توربین بادی در برابر رخداد عیب عملگر می شود. پژوهش حمیدی و همکارانش (۱۳۹۹)که با هدف بررسی بهبود پایداری دینامیکی شبکه های قدرت شامل مزارع بادی فراساحلی و با استفاده از کنترل کننده عصبی تطبیقی HVDC مجهز به سیستم

انتقال انجام گرفت نشان داد که این کنترل کننده ی نسبت به کنترل کننده های کلاسیک، عملکرد بهتری از نظر سرعت پاسخ، زمان نشست و فراجهش داشته، و نوسانات ولتاژ و فرکانس را بخوبی در حضوراغتشاشات میراسازی می نماید و موید کارایی سیستم کنترلی انتخاب شده است. فرجامی و همکارانش(۱۳۹۹) در برآورد هایی که از پژوهش خود با محوریت بررسی طراحی کنترل کننده فازی PI^{λ}برای کنترل زاویه گام در توربین بادی سرعت متغیر داشتند اظهارداشتند که به کنترل کننده مناسب برای کنترل زاویه گام، کنترل کننده ای است که بتواند خود را با تغییرات نقاط کار تطبیق داده و با ایجاد زاویه گام مناسب، سرعت توربین و توان تولیدی را بر روی مقادیر نامی آنها به صورت نرمتری تنظیم کند. مقاله ایزدفر و نیکزاد(۱۳۹۵) به بررسی اهمیت کنترل کننده فازی تطبیقی بهینه شده می پردازد که این کنترل کننده در ابتدا با راه اندازی نرم، کاهش دامنه جریان هجومی و کاهش بیشینه گشتاور الکترومغناطیسی را در لحظه اتصال ژنراتور باعث می شود. همچنین پس از راه اندازی و در طی عملکرد معمول توربین، با کنترل بهینه زاویه پره توربین موجب جذب حداکثر انرژی باد و کاهش نوسانات توان می شود. به رغم اهمیتی که سیستم کنترل کننده در کاهش هزینه و عملکرد مطلوب سیستم های بادی برعهده دارد ارائه جامعی که انواع این روش ها را مورد بررسی قرار دهند مشاهده نشده است بدین ترتیب این مقاله با هدف بررسی گسترده سیستم‌های کنترل کننده توربین بادی و ویژگی‌ها، عملکرد آن ها، در راستای بهبود سیستم های بادی انجام گرفته است.

مبانی نظری

یکی از چالش های اصلی که دنیای امروز با آن مواجه است مسئله تامین انرژی است .(زمانی و همکاران،۱۴۰۳) اما محدودیت منابع سوخت های فسیلی، فاجعه آلودگی زیست محیطی ناشی از سوختن مواد فسیلی، گرم شدن هوا و بروز پدیده اثر گلخانه ای و بسیاری عوامل از دیگر، سبب روی آوردن جامعه امروزی به انرژی های تجدیدپذیر شده است.(شاهقلیان و همکاران، ۱۳۹۳) در بین منابع تجدید پذیر، انرژی باد به علت وفور و دسترسی آسان ، فناوری ساده بهره برداری، فضای موردنیاز برای احداث نیروگاه ها و گسیل کمترین آلاینده ها . آلودگی ها بیشتر مورد توجه و تاکید مهندسین برق بوده است.(طاهری و همکاران،۱۴۰۱) استفاده از انرژی باد برای اولین بار در قالب توربین‌های چرخان برای به حرکت درآوردن آسیاب‌های بادی صورت گرفت. نخستین توربین بادی مورد استفاده برای تولید برق، یک دستگاه شارژ باتری بود که توسط جیمز بالیث، مهندس اسکاتلندی، در سال ۱۸۸۷ ساخته شد. چند ماه پس از آن، چارلز فرانسیس براش، مخترع آمریکایی، اولین توربین بادی خودکار را برای تولید برق در کلیولند، اوهایو ایجاد کرد. تا سال ۱۹۰۸، ۷۲ توربین بادی برای تولید برق در آمریکا فعال بودند. در دهه ۱۹۳۰، با توجه به عدم وجود شبکه سراسری توزیع برق، توربین‌های بادی کوچک برای تأمین برق مزارع در آمریکا بسیار رایج شده بودند. در پاییز سال ۱۹۴۱، اولین توربین بادی با ظرفیت مگاوات در ورمونت به بهره‌برداری رسید. بریتانیا نیز در سال ۱۹۵۱، اولین توربین بادی متصل به شبکه را در جزایر اورکنی به راه انداخت.(شمس،۱۳۹۸) در حال حاضر، تولیدکنندگان توربین‌های بادی متعددی در سراسر جهان فعالیت دارند که به منظور افزایش کارایی و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها، از طیف وسیعی از ژنراتورها و مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌کنند.(فالحی،۱۴۰۱)

سیستم تبدیل انرژی بادی، با دریافت انرژی باد توسط توربین بادی از طریق ژنراتور آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند.(شمس،۱۳۹۸) توربین های بادی در دو حالت سرعت ثابت و متغیر باد انرژی الکتریکی را تولید می کنند که امروزه، با

افزایش اندازه توربین های بادی، فناوری ساخت آن ها از سرعت ثابت به سرعت متغیر به منظور بازدهی بالای آن ها تغییر یافته است.(فالحی،۱۴۰۱)

توربین های بادی در دنیا به دو دسته توربین های ساحلی و فراساحلی تقسیم می شوند.(قادری و محمدی زاده، ۱۴۰۱) توربین های بادی ساحلی عموماً از نظر معیار راستای دروان در دو نوع افق و عمودی ساخته می شوند. توربین های بادی محور افقی[۱](HAWTS) که به طور معمول دارای دو یا سه پره هستند و توربین های بادی عمودی یا داریوس[۲](VAWTS) از یک قسمت محور تشکیل شده اند که پره ها در قسمت بالا و پایین به محور توربین متصل می شوند. هنگامی که باد به پره‌ها برخورد می‌کند، انرژی حاصل از باد به محور توربین منتقل شده و باعث چرخش آن می‌شود. (داناپور سفیدخوان،۱۳۹۹) توربین بادی معمولاً دارای اجزای اصلی ذیل می باشد.

- **برج یا دکل بادی:** پایه فلزی معمولا از جنس فولاد که با فندانسیون مناسبی در محل نصب می شود و که در درون آسانسور یا پله هایی به منظور بالا رفتن برای تعمیر و بازبینی ناسل تعبیه شده است.
- **ناسل:** بخش اصلی یک توربین بادی است که شامل مولد، شیفت اصلی، گیربکس یا همان جعبه دنده و سیستم کنترل چرخش پره‌ها می باشد.
- **رتور:** استوانه ای ساخته شده از آلیاژ مخصوص است که دارای ویژگی های دینامیکی قابل قبولی است و در انتهای رتور پره های توربین و هاب یا توپ مرکزی قرار دارد که پره های توربین به ان متصل هستند.
- **سیستم انتقال قدرت:** مجموعه ای از اجزائ مکانیکی و الکتریکی با هدف انتقال انرژی مکانیکی رتور به مولد می باشد.
- **مولد الکتریکی:** مولد الکتریکی در توربین های بادی انواع مختلفی از قبیل سنکرونف، آسنکرون دارد که می تواند با ساختار رتور سیم پیچی شده یا قفس سنجابی باشد.
- **سیستم کنترل توربین بادی:** سیستم کنترل در توربین های بادی انواع مختلفی از قبیل کنترل گشتاور آئرودینامیکی، کنترل گشتاور مولد، کنترل زاویه و ... دارد. همچنین دارای سنسور های مختلفی همچون سنسور دما، سرعت، موقعیت می باشد که کمیاب های الکتریکی را ثبت و پردازش کرده و اطلاعات لازم را از طریق کامپیوتر به کنترل کننده و اپراتور می رسانند.
- **حساسه سرعت باد و جهت یاب:** اندازه گیری سرعت باد توسط بادسنج های پیاله ای انجام می شود. به طور معمول بادسنج ها به بادنماها متصل می شوند تا جهت باد را مشخص کنند. سیگنال‌های الکتریکی بادسنج ها به کنترل کننده وارد می شود. این کنترل کننده ها با توجه به سیگنال‌های دریافتی، توربین های بادی را در سرعت معینی به کار می اندازند و اگر سرعت باد از حد مجاز تجاوز کند توربین را متوقف می سازند. سیگنال های دریافت شده از جهت یاب نیز به کنترل کننده منتقل می‌شوند تا با توجه به اطلاعات دریافتی میزان انحراف لازم به مکانیسم انحراف دهنده داده شده و توربین در مسیر باد قرار گیرد.

[۱]Horizontal Axis Wind Turbines

[۲]Vertical Axis Wind Turbines

سیستم کنترل سیستم بادی با هدف کلی، کمینه کردن هزینه های عملیاتی در کنار ماکزیمم کردن توان تولید طراحی شده است.(قنبرپور،۱۳۹۹) کنترل سیستم های بادی شامل دو نوع کنترل تووربین و مولد می باشد؛ کنترل توان بهینه به وسیله کنترل مولد و کنترل سرعت و بهینه سازی توان در سرعت های بالای وزش باد توسط کنترل توربین انجام می شود.(عطاپور، ۱۳۹۰)

برای کنترل توربین‌های بادی از روش‌های کنترلی متعددی استفاده شده است.(ایزانلو، ۱۳۹۷) سیستم های کنترل کننده کلاسیک به عنوان یکی از کنترل کننده های متداول معمولاً در مبدل های بادی کوچیک کاربرد دارند. (Apata, Oyedokun, ۲۰۲۰) یکی از متداول ترین کنترل کننده های کلاسیک کنترل کننده دارای سه بخش تناسبی- مشتقی- انتگرالی یا به عبارتی PID می‌باشد. (عطاپور،۱۳۹۰) این کنترل کننده، دارای ساختاری ساده، پایداریِ مناسب و قابلیت اطمینان بالا است و براساس مدل دقیق ریاضی سیستم طراحی می‌شود(ایزدفر و نیکزاد، ۱۳۹۵) کنترل‌کننده‌های PID گام کسری نوعی از توسعه‌یافته‌های کنترل‌کننده‌های کلاسیک PID هستند. این کنترل‌کننده‌ها در مقایسه با PID کلاسیک، حساسیت کمتری به تغییرات پارامترهای سیستم دارند. به طور کلی، از مزایای کنترل‌کننده‌های FOPID نسبت به کنترل‌کننده‌های PID می‌توان به کاهش خطای حالت ماندگار، کاهش نوسانات و فراجذبش، کاهش تلاش‌های کنترلی، زمان پاسخ بهتر، مقاومت به تغییر در بهره‌سیستم (خاصیت ایزومیرایی)، رد اغتشاش خروجی و مشخصات حافظه‌ذاتی اشاره کرد. این مزایا نشان‌دهنده‌ی پیشرفت‌های مهمی است که کنترل‌کننده‌های PID گام کسری نسبت به نسخه‌های کلاسیکی خود دارند و از آنها برای بهبود عملکرد و کنترل بهتر سیستم‌ها استفاده می‌شود.(طاهری و همکاران، ۱۴۰۱) اما به رغم این موارد ، کنترل کننده های کلاسیک مقاومت کافی و لازم در برابر نویز، اغتشاشات و عدم قطعیت هایی مانند تغییر پارامترها و دینامیک مدل نشده سیستم را ندارند. بنابراین، توسعه روش‌های کنترلی کارآمد و قابل اعتماد برای بهبود عملکرد بهینه، بسیار حیاتی به نظر می رسداز این رو بسیاری از کارشناسان و محققان به دنبال مطالعه رویکردهای کنترلی بهبود یافته و کارآمدتر از جمله روش های هوشمند هستند.(مزارع و تقی زاده،۱۴۰۰)

کنترل هوشمند از زمان‌های دور مورد توجه دانشمندان زمینه علم کنترل بوده است، اما در چند دهه اخیر، با افزایش نیاز انسان به سیستم‌های کنترل پیچیده‌تر و ظهور ابزارهایی مثل شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی، توجه به این زمینه بیشتر شده است. هدف اصلی از کنترل هوشمند، کنترل یک سیستم بدون نیاز به داشتن معادلات دقیق دینامیکی آن سیستم است، و این می‌تواند با استفاده از حداقل اطلاعات ممکن باشد. در این راستا، ویژگی‌هایی مانند تطبیق‌پذیری و سادگی در محاسبات نیز در نظر گرفته می‌شوند.(رحمانیان کوشککی،۱۳۹۲)

کنترل کننده فازی یکی از انواع کنترل کننده ها می باشد که نیازی به پارامترهای کنترل کننده ندارد و این ویژگی این امکان را به سیستم می دهد که در صورت تغییر شرایط به خوبی عمل کند و رفتار مطلوبی در مقابل میرایی نوسانات داشته باشد.(هاشمی و پورفر،۱۳۹۷)

کنترل کننده مدلغزشی که در کنترل بسیاری از سیستم های غیر خطی مورد استفاده قرار می گیرد. مزایای اصلی این کنترل‌گر عدم حساسیت آن به اغتشاشات خارجی و مقاومت در برابر عدم قطعیت‌های سیستم و پاسخ‌های دینامیکی سریع می‌باشد. (سلطانپور،۱۳۹۷)

کنترل کننده تطبیقی اساساً یک سیستم بازخورد-پویا است که در آن پارامترهای عملکردی به طور خودکار، خود را با شرایط جدید سازگار می کنند. این سیستم منطبق بر سیستم کنترل غیر خطی است که دارای پارامترهای قابل تنظیم و مکانیزم تعیین آنها است و برای سیستم هایی مناسب است که ضرایب نامعلوم یا متغیر با زمان دارند.(قرشی خلیل آبادی و معتکف ایمانی،۱۳۹۴)

کنترل کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل (MPC) از بهینه‌سازی عددی برای مدیریت ورودی‌ها و پاسخ‌های آینده دستگاه استفاده می‌کند. این روش با استفاده از مدل سیستم، ورودی‌های کنترلی و پاسخ‌های آینده را پیش‌بینی می‌کند و سپس در یک بازه زمانی معین، بهینه‌سازی می‌شود تا به یک شاخص عملکرد مشخصی برسد. با توجه به ویژگی‌های MPC و استفاده از تکنیک‌های محاسباتی برای بهبود عملکرد کنترلی، این روش به صورت گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شود. MPC بر پایه یک تئوری دقیق ساخته شده است و ویژگی‌های پایداری، بهینه‌بودن و مقاومت آن به خوبی درک شده است.(قنبرپور،۱۳۹۹)

پیشینه تحقیق

نتایج شبیه‌سازی‌ها در تحقیق زمانی و همکاران (۱۴۰۳) تحت عنوان کنترل بار فرکانس در یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای با مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروی الکتریکی با استفاده از کنترل‌کننده PID مرتبه کسری مبتنی بر شبکه عصبی موجک نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب کنترل‌کننده AWNNFOPID پیشنهادی بر اساس شاخص‌های عملکردی زمان نشست، زمان صعود، حداکثر فراجهش، حداکثر فروجهش، انتگرال زمانی قدر مطلق خطا و انتگرال قدر مطلق خطا در مقایسه با سایر کنترل‌کننده به کار رفته برای سیستم قدرت مورد مطالعه است. یافته‌های حاکی از تحقیق رنجبر (۱۴۰۲) با عنوان کنترل هوشمند بار-فرکانس در سیستم قدرت در حضور عدم قطعیت انرژی باد مبتنی بر الگوریتم نمونه‌برداری ابر مکعب لاتین و بهینه‌سازی ازدحام ذرات طرح پیشنهادی، روشی بر خط مبتنی بر سیگنال‌های اندازه‌گیری فازوری بوده به نحوی که در پنجره‌های زمانی مختلف، با ارزیابی دینامیک شبکه مبتنی بر طرح پیشنهادی ابر مکعب لاتین، پارامترهای کنترلی به روزرسانی می‌شوند. نتایج پژوهش نشان‌دهنده عملکرد مطلوب کنترل‌کننده پیشنهادی به منظور میراسازی نوسان‌های توان در شبکه در حضور عدم قطعیت منابع اینورتری با اینرسی پایین بوده و می‌تواند از بروز خاموشی‌های بزرگ در سیستم قدرت جلوگیری کند. در مقاله‌ای دیگر حمیدی و همکاران (۱۳۹۹) با عنوان بهبود پایداری دینامیکی شبکه‌های قدرت شامل مزارع بادی فراساحلی و مجهز به سیستم انتقال HVDC با استفاده از کنترل‌کننده عصبی تطبیقی دریافتند در روش پیشنهادی، با استفاده از مفاهیم کنترل‌پذیری و مشاهده‌پذیری و تجزیه مقادیر تکین، بهترین مسیر جهت طراحی کنترل‌کننده تکمیلی میراساز در بین سیگنال‌های ورودی-خروجی انتخاب می‌شود، سپس کنترل‌کننده پایدارساز مبتنی بر شبکه‌های عصبی طراحی شده و جهت بهبود پایداری فرکانس-ولتاژ، به کار گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده‌های کلاسیک عملکرد بهتری از نظر سرعت پاسخ، نشست و فراجهش داشته و نوسانات ولتاژ و فرکانس را به خوبی در حضور اغتشاشات میراسازی می‌نماید و موید کارایی سیستم کنترلی انتخاب شده است. نتایج تحقیق فرجامی و همکاران (۱۳۹۹) با عنوان طراحی کنترل‌کننده فازی PI برای کنترل زاویه گام در توربین بادی سرعت متغیر نشان داده‌اند که کنترل‌کننده فازی با توجه به معیار، عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل‌کننده و کنترل‌کننده کلاسیک داشته است و کنترل‌کننده فازی کنترل هموارتر و تثبیت مناسب‌تری بر روی سیگنال‌های توان خروجی و سرعت ژنراتور در ناحیه سوم

عملکرد داشته است. شاهقلیان و همکاران (۱۳۹۳) در مقاله‌ای با عنوان تاثیر حضور توربین باد مجهز به مولد القایی تغذیه دوسویه در کنترل بسامد-بار سامانه قدرت با توربین آبی دریافتند که دستیابی به این نتیجه با تنظیم مطلوب کنترل‌کننده‌های سرعت مولد القایی تغذیه دوسویه در سطوح مختلف نفوذ باد امکان‌پذیر بوده و سبب بهبود تولید خودکار واحد آبی متناسب با انرژی آزاد شده از توربین بادی و متناسب با ضریب نفوذ تولید باد در پاسخ به اغتشاش وارد شده به سامانه می‌گردد. جهت بهینه نمودن کنترل‌کننده‌های توربین بادی متناسب با ضریب نفوذ تولید باد از روش انتگرال مجذور خطا جهت به حداقل رساندن خطای تغییرات بسامد سامانه استفاده گردیده است.

روش تحقیق

پژوهش حاضر با هدف **بررسی دستگاه های کنترل کننده سیستم های توربین بادی** طراحی شده است ؛ بنابراین بر حسب هدف در زمره تحقیقات کاربردی قرار می گیرد که جهت بررسی این رابطه از روش توصیفی بهره گرفته شده است..در این مقاله، ما با بهره گیری یک روش سیستماتیک اقدام به جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل مفاهیم با بهره گیری منابع و مراجع مختلف مانند مجلات علمی ، کنفرانس ها، و با استفاده از پایگاه های اطلاعاتی مانند...,magiran, sid, google scholar کرده ایم. همچنین اطلاعات مربوط به سیستم‌های کنترل کننده توربین بادی را جمع‌آوری و تحلیل کرده و ارزیابی‌های لازم را بر اساس ویژگی‌های مختلف این سیستم‌ها انجام داده‌ایم.

یافته‌ها

ردیف	نویسنده/ نویسندگان	موضوع	سال انتشار	یافته‌ها
۱	امیری و مرادی	بهبود پایداری فرکانسی سیستم قدرت در حضور توربین بادی با استفاده از کنترل‌کننده آبشاری بهینه شده	۱۴۰۲	عضو PD در روش کنترل‌کننده آبشاری PD-FOPID به تغییرات فرکانس سیستم قدرت سریعتر پاسخ می‌دهد و همچنین عضو FOPID در برابر عدم قطعیت پارامترهای سیستم و اغتشاشات وارد بر آن عملکرد مطلوبی را دارا می‌باشد. این روش با چندین روش از جمله: کنترل هماهنگ سیستم کنترل فرکانس-بار و ذخیره‌ساز ابررسانا با استفاده از کنترل‌کننده مقاوم و غیره مقایسه شده است و نتایج نشان‌دهنده برتری عملکرد روش پیشنهادی در برابر سایر روش‌ها ذکر شده است. این روش در برابر اغتشاشات بار، اغتشاشات ناشی از توربین بادی و نیز عدم قطعیت مربوط به پارامترهای سیستم مقاوم است.
۲	قدیمی و کرمی	بهبود پایداری سیستم‌های قدرت متصل به مزارع بادی ترکیبی با استفاده از STATCOM و شبکه‌های عصبی	۱۴۰۲	یک مزرعه بادی ترکیبی شامل هم ژنراتورهای القایی SCIG و هم ژنراتورهای القایی DFIGاست و در آن از مزایای هر دو نوع ژنراتور القایی استفاده می‌شود. در این نوع نیروگاه‌های بادی، توان راکتیو تزریقی مبدل‌های DFIG برای جبران توان راکتیو موردنیاز ژنراتورهای SCIG مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از یک STATCOM هم برای جبران‌سازی سیستم و

				میرانمودن نوسانات متغیرهای سیستم استفاده شد. و لازم است در کنار آن از یک کنترل‌کننده تکمیلی هم در ساختار STATCOM استفاده شود. نتایج نشان داد که برای عملکرد موفقیت‌آمیز کنترل‌کننده تکمیلی لازم است با تغییر شرایط کاری سیستم ضرایب این کنترل‌کننده با کمک یکی از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری مانند PSO تعیین شود.
۳	رضایی، فریور و منصوری	کنترل تحمل‌پذیر عیب در توربین‌های بادی با استفاده از کنترل‌کننده مدل لغزشی فازی	۱۴۰۱	یافته‌ها حاکی از آن است که در سیستم کنترل ترکیبی طراحی شده، کنترل مدل لغزشی موجب افزایش مقاوم بودن و سیستم فازی موجب تطبیق‌پذیری کنترل‌کننده شده است. این نحوه ترکیب و بهره‌مندی از مزایای کنترل کننده‌های کلاسیک و هوشمند سبب افزایش تحمل پذیری سیستم توربین بادی در برابر رخداد عیب عملگر می‌شود. همچنین نتایج حاصل نشان داد که میزان توان تولیدی ژن راتور و ولتاژ خروجی ورودی مرجع مطلوب متناظر را به خوبی ردیابی می‌کنند و سیستم عملکرد خوبی دارد و در برابر عیب مقاوم است. بررسی شاخص‌های خطا، کارایی کنترل‌کننده طراحی شده را تایید می‌کند. کنترل ترکیبی پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده کلاسیک مدل لغزشی عملکردی مقاوم‌تر دارد و همچنین، قابلیت کاهش اثر نامطلوب پدیده وزوز را دارد.
۴	درویش فالحی	طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر کنترلر منطق فازی نوع II جهت کاهش نوسانات ولتاژ لینک DC توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم	۱۴۰۱	در این مقاله یک سیستم قدرت شامل ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم که لینک DC آن به یک سیستم ذخیره‌ساز چرخ طیار کوپل با ماشین القایی قفس سنجابی است مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. هدف به کارگیری از FESS کاهش نوسانات ظاهر شده در توان تزریقی به شبکه و تنظیم شارش توان است که از طریق ارسال/دریافت توان از FESS به هنگام بیشبود/کمبود توان شبکه صورت می‌پذیرد. بدین منظور جهت کنترل مؤلفه‌های dg در سیستم کنترلی جریان استاتور PMSG از کنترل‌کننده منطق فازی نو II بهره برده شده است. هدف استفاده از کنترل‌کننده منطق فازی نوع II بهبود عملکرد PMSG و کنترل ولتاژ لینک DC است که متعاقباً با دو کنترل‌کننده PI و منطق فازی نوع I مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در نهایت نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که کنترل‌کننده منطق فازی نوع II دقت بالایی در کاهش نوسانات ولتاژ لینک DC را دارد.
۵	طاهری، اروجلو و ابراهیمی	طراحی کنترل‌کننده میراساز در نیروگاه‌های بادی فراساحلی برای بهبود پایداری سیستم قدرت با استفاده از کنترل‌کننده‌های PID مرتبه کسری مبتنی بر الگوریتم بازار سهام	۱۴۰۱	در این مقاله مدل‌سازی دینامیکی یک سیستم قدرت شامل مزرعه بادی فراساحلی مجهز به VSCHVDC انجام شده است. با استخراج معادلات دینامیکی اثرگذاری هر یک از ورودی‌های سیستم شامل اندیس و زاویه مدولاسیون مبدل‌های VSCHVDC، PSS و توان تولیدی نیروگاه بادی بر مودهای نوسانی سیستم قدرت از طریق اندازه‌گیری میزان کنترل‌پذیری مودها، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ورودی

		بهینه‌شده		اندیس مدولاسیون اینورتر در VSCHVDC بیشترین کنترل‌پذیری را بر روی مودهای نوسانی دارد. علاوه بر این خروجی زاویه بار روتور در ژنراتور سنکرون در نیز بیشترین مشاهده‌پذیری برای مودهای نوسانی را نتیجه داد. بنابراین استفاده از کنترل‌کننده پایدارساز نه تنها بهبود حاشیه پایداری دینامیکی سیستم قدرت را نتیجه می‌دهد بلکه نمایه ولتاژ را نیز تقویت می‌کند.
۶	طاهری، اکبری، عسکری، احمد تاجیک، اروجلوف کاظمی و قاسمی	طراحی کنترل‌کننده تکمیلی میراساز در سیستم‌های VSC HVDC برای بهبود تبدیل انرژی توربین‌های بادی و پایداری سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک-خفاش	۱۴۰۱	از آنجا که نیروگاه بادی بر سیلان مولفه‌های توان اکتیو-راکتیو موثر است؛ از این رو برای بهبود پروفیل ولتاژ و پایداری دینامیک شبکه قدرت، استفاده از کنترل‌کننده‌های تکمیلی پایدارساز در مبدل یک‌سوکننده پیشنهاد می‌گردد. در استراتژی کنترلی پیشنهادی از کنترل‌کننده‌های PID مرتبه کسی استفاده خواهد شد که ضرایب آن‌ها با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک-خفاش تنظیم می‌شوند. در این الگوریتم به دلیل اجتناب از همگرایی سریع خفاش‌ها به اکسترمم‌های محلی و توسعه بهینه فضای جستجو، از دو عملگر جهش دینامیکی مبتنی بر احتمالات و ترکیب الگوریتم ژنتیک استفاده خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تحت استراتژی کنترلی پیشنهادی پایداری سیستم و پروفیل ولتاژ در شبکه به طور قابل توجهی بهبود می‌یابند.
۷	فلاحتی علی آبادی و طاهر	کنترل فرکانس بار با استفاده از کنترل‌کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده	۱۳۹۹	در این مقاله به منظور کنترل فرکانس بار از کنترل‌کننده Fuzzy- PID با توابع عضویت بهینه شده استفاده شد. در ابتدا قوانین فازی برای بخش فازی این کنترل‌کننده به گونه‌ای تعیین شدند تا خطای کنترل ناحیه‌ای به ازای تغییرات با کاهش یابد. سپس با استفاده از بهینه‌سازی و با به کارگیری الگوریتم رقابت استعماری پارامترهای این کنترل‌کننده به منظور کنترل فرکانس بار سیستم بهینه گشتند و نتایج شبیه‌سازی‌ها عملکرد بهتر کنترل‌کننده پیشنهادی در برابر کنترل‌کننده FOPID را نشان دادند.
۸	عزیزی، حسامی نقش‌بندی و باتمانی	کنترل غیرخطی بهینه مقاوم یک توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه	۱۳۹۵	در این مقاله روش غیرخطی و زیر بهینه SDRE به منظور بهبود عملکرد سیستم غیرخطی توربین بادی مجهز به ژنراتور DFIG به کار گرفته شده است. روش پیشنهادی با دو هدف بهبود حاشیه پایداری سیستم و ردیابی همزمان سیگنال‌های مطلوب گشتاور الکترومغناطیسی و توان راکتیو استاتور استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای کنترل‌کننده طراحی شده تاییدی بر عملکرد مطلوب سیستم در حضور کنترل‌کننده پیشنهادی برای نقاط کار مختلف سیستم است. همچنین نتایج نشان از افزایش قابل توجه حاشیه پایداری سیستم کنترل‌شده به روش خطی و زیر بهینه است و این روش در دو حالت تنظیم‌کننده و ردیاب در حضور عدم قطعیت در پارامترهای آن، تاییدی بر ویژگی مقاوم بودن ذاتی این کنترل‌کننده در حضور

				نامعینی در پارامترهای سیستم است.
۹	قریشی خلیل آبادی و معتکف ایمانی	کنترلگر مقاوم و تطبیقی دستگاه آزمون پره توربین بادی	۱۳۹۴	دستگاه آزمون پره توربین بادی، توانایی انجام آزمون‌های استاتیکی و خستگی مطابق با استانداردهای آزمون پره را دارد. با انجام آزمون‌های حلقه باز، مشاهده شد که بهره حلقه باز دستگاه علاوه بر فرکانس، تابعی از دامنه نوسانات نیرو نیز است. سیستم نامی دستگاه با کمک مدل‌سازی فیزیکی و استفاده از روش شناسایی ARMAX محاسبه و با کمک داده‌های آزمون‌های حلقه باز، تابع وزنی عدم قطعیت ضرب‌شونده تعیین شد. همچنین کنترلگر مقاوم با روش حساسیت مخروط طراحی شد که برای ارتقای کارایی از تابع پیشخور استفاده گردید. این کنترلگر، توانایی ردیابی مناسب به ازای سیستم نامی را داشته، ولی به علت عدم قطعیت بالا در محدوده فرکانس کاری دستگاه، فقط توانایی ردیابی نیروی میانگین را داشت. نتایج پیاده‌سازی این کنترلگر نشان دهنده کارایی آن در انجام آزمون خستگی با بارگذاری بلوکی است.

بحث و نتیجه‌گیری

مسئله تامین انرژی یکی از مهم‌ترین مسائل در دنیای امروزی می‌باشد. اما محدودیت‌هایی در زمینه منابع سوخت‌های فسیلی، فاجعه آلودگی زیست‌محیطی ناشی از سوختن مواد فسیلی، گرم شدن هوا و بروز پدیده اثر گلخانه‌ای و بسیاری از عوامل دیگر باعث روی آوردن جامعه امروزی به انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. استفاده از انرژی باد نخستین بار در قالب توربین‌های چرخان برای به حرکت درآوردن آسیاب‌های بادی صورت گرفت و نخستین توربین‌های بادی با ظرفیت مگاوات در ورمونت به بهره‌برداری رسید. سیستم تبدیل انرژی بادی با دریافت انرژی باد توسط توربین‌ها آن را از طریق ژنراتورها به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و توربین‌های بادی به دو دسته دوربین‌های ساحلی و فراساحلی تقسیم می‌شوند. دستگاه‌های کنترل سیستم‌های بادی با هدف کمینه کردن هزینه‌های عملیاتی در کنار ماکزیمم کردن توان تولید طراحی شده می‌باشد. این دستگاه‌ها شامل دو نوع کنترل توربین و مولد می‌باشند و همچین از روش‌های مختلفی برای این امر استفاده شده است. سیستم‌های کنترل‌کننده کلاسیک یکی از کنترل‌کننده‌های متداول معمولاً در مبدل‌های بادی کوچک کاربرد دارند. این کنترل‌کننده‌ها دارای ساختاری ساده، پایداری مناسب و قابل اطمینان بالا هستند و بر اساس مدل دقیق ریاضی سیستم طراحی می‌شوند. کنترل‌های هوشمند دارای ویژگی‌هایی مانند تطبیق پذیری و سادگی در محاسبات می‌باشد که با افزایش نیاز انسان به سیستم‌های کنترل پیچیده‌تر ظهور یافتند. از دیگر مدل‌های کنترل‌کننده‌ها می‌توان به کنترل‌کننده‌های فازی، مدل لغزشی، تطبیقی و غیره اشاره کرد. بررسی یافته‌های تحقیقات انجام گرفته در این حوزه نشان می‌دهد که از روش‌های کنترل‌کننده از جمله آبشاری، ژنراتورهای القایی، سیستم کنترل ترکیبی، کنترل‌کننده‌های تکمیلی پایدارساز و غیره می‌توان برای بهبود عملکرد سیستم‌های بادی، به حداقل رساندن خطاهای تغییرات بسامد، بهینه‌سازی توان و کاهش هزینه‌ها بهره برد.

منابع و مراجع

ایزانلو، محمد. (۱۳۹۷). کنترل مقاوم تطبیقی توربین های بادی فراساحلی شناور. پایان نامه کارشناسی ارش مهندسی برق گرایش کنترل، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندی برق.

ایزدفر، حمیدرضا و نیکزاد، رضا. (۱۳۹۵). طراحی کنترل کننده فازی عصبی بهینه برای توربین بادی سرعت ثابت. سیستم های هوشمند در مهندسی برق، ۷(۴)، ۱-۱۲.

حمیدی، عبدالخالق، بیضاء، جمال،عابدین زاده، طاهر و دقیق، علی. (۱۳۹۹). بهبود پایداری دینامیکی شبکه های قدرت شامل مزارع بادی فراساحلی و مجهز به سیستم انتقال HVDC با استفاده از کنترل‌کننده عصبی تطبیقی. *نشریه روش‌های هوشمند در صنعت برق*. ۴۲(۱۱)، ۷۹-۹۹.

داناپور سفید خوان، ناصر. (۱۳۹۷). خطوط انتقال ترکیب شده با توربین های بادی. طرح پژوهشی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

رحمانیان کوشککی ، احسان. (۱۳۹۲). استفاده از کنترل کننده هوشمند و ژنراتور سوئیچ رلوکتانسی در نیروگاه بادی برای دستیابی به حداکثر توان ،پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق و الکترونیک ، دانشگاه رازی، دانشکده فنی و مهندسی .

رضایی، پریسا، فریور، فائزه و منشوری، محمد. (۱۴۰۱). کنترل تحمل پذیر عیب در توربین های بادی با استفاده از کنترل کننده مدلغزشی فازی. مدل سازی در مهندسی، ۲۰(۷۱)، ۱۳۵-۱۵۰.

زمانی، عباسعلی،کارگر دهنوی، سید محمد و رئیسی، علیرضا. (۱۴۰۳). کنترل بار فرکانس در یک سیستم قدرت چند ناحیه ای با مشارکت منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروی الکتریکی با استفاده از کنترل کننده PID مرتبه کسری مبتنی بر شبکه عصبی موجک ، *فصلنامه روش های هوشمند در صنعت برق*، ۱۵(۵۸)، ۴۵-۶۶.

سلطانپور، محمد رضا. (۱۳۹۷). کنترل دسته ی خاصی از سیستم های مکانیکی فروتحریک با استفاده از کنترل مدلغزشی فازی با حجم محاسبات پایین و بدون لرزش. *مکانیک سازه ها و شاره ها*، ۸(۳)، ۱۰۷-۱۲۲.

سید موسوی، مصطفی. (۱۳۹۲). طراحی سیستم کنترل زاویه گام برای توربین بادی محور افقی،پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق و الکترونیک ، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک

شاهقلیان، غضنفر، خانی خسرو و معظمی، مجید.(۱۳۹۳) تأثیر حضور توربین باد مجهز به ژنراتور القایی تغذیه دوبل در کنترل فرکانس-بار سیستم قدرت با توربین آبی. *سد و نیروگاه برق آبی ایران*، ۱(۳)، ۳۸-۵۱.

شمس، سعید. (۱۳۹۸). کنترل توربین بادی به روش پیش بین،پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی دماوند.

طاهری، ناصر، اروجلو، حامد و ابراهیمی, فرامرز. (۱۴۰۱). طراحی کنترل کننده میراساز در نیروگاه های بادی فراساحلی برای بهبود پایداری سیستم قدرت با استفاده از کنترل کننده های PID مرتبه کسری مبتنی بر الگوریتم بازار سهام بهینه شده. *فصلنامه روش های هوشمند در صنعت برق*، ۱۳(۵۱)، ۸۹-۱۰۸.

طاهری، ناصر، اکبری، احسان،عسکری، نعمت الله، تاجیک، وزیر احمد، اروجلو، حامد، کاظمی، محمدعل و قاسمی, قربان. (۱۴۰۱). طراحی کنترل کننده تکمیلی میراساز در سیستم های VSC HVDC برای بهبود تبدیل انرژی توربین های بادی و پایداری سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک- خفاش. *نشریه کارافن*، ۱۹(۵۷)، ۳۵۷-۳۸۱.

عطاپور، رضا. (۱۳۹۰). شناسایی مدل دینامیکی توربین بادی در جهت طراحی کنترل کننده. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق با گرایش قدرت، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

فالحی، علی درویش. (۱۴۰۱). طراحی سیستم ذخیره ساز انرژی مبتنی بر کنترلر منطق فازی نوعII جهت کاهش نوسانات ولتاژ لینک DC توربین بادی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم. *نشریه تحقیقات نوین در سیستم های قدرت هوشمند*، ۱۱(۴)، ۲۳-۳۲.

فرجامی، فاطمه، محمدزاده، اردشیر، احمدیان، علی اکبر و شجاع، سجاد. (۱۳۹۹). طراحی کنترلکننده فازی PI^{λ} برای کنترل زاویه گام در توربین بادی سرعت متغیر. *نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران*، ۹(۱)، ۱-۱۵.

قادری، پدرام و محمدی زاده, امیرحسین. (۱۴۰۱). کنترل ارتعاش توربین بادی به کمک میراگر جرمی فعال مجهز به سیال مغناطیسی. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۴(۱۲)، ۴۴۸۳-۴۵۱۰.

قرشی، سید حسن و معتکف ایمانی، بهنام. (۱۳۹۴). کنترلگر مقاوم و تطبیقی دستگاه آزمون پره توربین بادی. *مکانیک سازه ها و شاره ها*، ۵(۳)، ۲۷-۳۸،

قنبرپور، کامیار. (۱۳۹۹). طراحی کنترل کننده‌ی تحمل‌پذیر خطا برای توربین‌های بادی با رویکرد کنترل پیش‌بین،پایان نامه دکتری مهندسی برق کنترل ، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی گروه برق .

کاظمی بوکی، سیروس. (۱۳۹۷). جایابی بهینه تولیدات بادی در شبکه های توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت های باد و بار. طرح پژوهشی کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی تابناک.

مزارع, محمود وتقی زاده, مصطفی. (۱۴۰۰). کنترل تحمل‌پذیر عیب فعال برای سیستم‌های توربین بادی با استفاده از مد لغزشی مبتنی بر رؤیتگر اغتشاش و تخمین تأخیر زمانی. *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر*، ۵۳(۸)، ۴۵۱۷-۴۵۳۴.

هاشمی، رضا و پورفر، ایمان. (۱۳۹۷). میراسازی نوسانات زیرسنکرون به کمک طراحی کنترل کننده فازی-عصبی برای مبدل . DFIG. *نشریه مهندسی برق دانشگاه تبریز*، ۴۸(۱) ، ۴۱۷-۴۳۰.

قدیمی، زهرا و کرمی، علی (۱۴۰۲). بهبود پایداری سیستم‌های قدرت متصل به مزارع بادی ترکیبی با استفاده از STATCOM و شبکه‌های عصبی. نشریه تحقیقات کاربردی در برق، *کامپیوتر و سیستم‌های انرژی*، ۱(۱)، ۵۵-۷۴.

رنجبر، سهیل (۱۴۰۲). کنترل هوشمند بار-فرکانس در سیستم قدرت در حضور عدم قطعیت انرژی باد مبتنی بر الگوریتم نمونه‌برداری ابر مکعب لاتین و بهینه‌سازی ازدحام ذرات. نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، ۱۳(۲)، ۸۴-۹۷.

امیری، فرهاد و مرادی، محمدحسن (۱۴۰۲). بهبود پایداری فرکانسی سیستم قدرت در حضور توربین بادی با استفاده از کنترل‌کننده آبشاری بهینه شده. نشریه سامانه‌های غیر خطی در مهندسی برق، ۱۰(۱)، ۱۱۷-۱۴۶.

عزیزی، آزاده، حسامی نقش‌بندی، علی و باتمانی، یزدان (۱۳۹۵). کنترل غیرخطی بهینه مقاوم یک توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه. مجله کنترل، ۱۰(۴)، ۶۹-۸۰.

فلاحتی علی آبادی، صابر و طاهر، سیدعباس (۱۳۹۹). کنترل فرکانس بار با استفاده از کنترل‌کننده Fuzzy-PID با توابع عضویت بهینه شده. مجله محاسبات نرم، ۹(۲)، ۳۴-۴۳.

Apata, O., & Oyedokun, D. (2020). An overview of control techniques for wind turbine systems. *Scientific African*, *10*, e00566.