بهبود پاسخ اینرسی توربین‌های بادی سرعت متغیر با استفاده از سیستم فازی TSK و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات (PSO)

امید الماسی نقاش[1] سید امیرحسین مدیرخازنی[2] مصطفی پرنیانی[3]

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، مشهد، ایران

o.almasi@ieee.org

۲- دانشکده مهندسی برق-دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات-تهران- ایران

amirhossein.modirkhazeni@gmail.com

۳- دانشیار-دانشکده مهندسی برق-دانشگاه صنعتی شریف-تهران- ایران

parniani@sharif.edu

چکیده: با افزایش نفوذ توربین‌های بادی سرعت متغیر در سیستم‌های قدرت، اینرسی معادل شبکه کاهش یافته و در نتیجه نوسانات فرکانس سیستم پس از بروز اغتشاش، افزایش می‌یابد. برای غلبه بر این مشکل، یک حلقه کنترل تکمیلی به مبدل الکترونیک قدرت توربین‌های بادی سرعت متغیر افزوده می‌شود تا اینرسی این نوع از توربین‌ها در شبکه به اشتراک گذاشته شود؛ اما میزان مناسب این مشارکت وابسته به میزان بار بوده و می‌بایست متناسب با بار تغییر کند. در این مقاله، یک سیستم فازی تاکاگی- سوگنو و کانگ (TSK) به منظور تعیین ضریب مشارکت توربین‌های بادی سرعت متغیر به گونه‌ای طراحی می‌شود که پس از بروز اغتشاش، این حداکثر اینرسی خود را برای جبران کاهش تولید در شبکه به اشتراک گذارده و درعین‌حال از حد مجاز کمینه سرعت خود عبور نکنند و موجب به وجود آمدن اغتشاشی دیگر در شبکه نشوند. در این روش، ابتدا با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، مقادیر بهینه ضریب مشارکت متناسب با بار به صورتی به دست می‌آید که قید حد مجاز کمینه سرعت رعایت شود. در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی تفاضلی، قواعد اولیه و سیستم فازی TSK اولیه از این پارامترهای بهینه استخراج می‌شوند و سپس روش حداقل مربعات بازگشتی برای تنظیم سیستم فازی TSK و تعیین پارامترهای بخش مؤخر آن بکار گرفته می‌شود. کارایی روش پیشنهادی، طی شبیه‌سازی‌هایی در بارهای مختلف نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: کنترل بار- فرکانس، توربین های بادی سرعت متغیر، پاسخ اینرسی، سیستم فازی TSK

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۱

نام نویسنده‌ی مسئول: امید الماسی نقاش

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران–خراسان رضوی- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، مشهد، ایران

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۱- مقدمه

از مهم‌ترین شاخص‌های پایداری سیستم‌های قدرت، تعادل بین تولید و مصرف می‌باشد. هنگامی که نیروگاهی با توان بالا از مدار خارج شود و یا بار با توان قابل ملاحظه‌ای وارد مدار گردد برای لحظاتی تعادل بین تولید و مصرف برهم می‌خورد و فرکانس سیستم قدرت دستخوش تغییراتی می‌شود. در این حالت سیستم قدرت در سه مرحله به بار پاسخ می‌دهد. مرحله اول، پاسخ اینرسی ژنراتورهای سنکرون می‌باشد که باعث بهبود دینامیک فرکانس سیستم در ثانیه‌های اولیه پس از اغتشاش بار می‌شود. در مرحله دوم، برای جلوگیری از کاهش فرکانس، توان ورودی به توربین توسط گاورنر افزایش می‌یابد و در نهایت با تغییر نقطه بار مرجع توسط حلقه کنترل تکمیلی، فرکانس در مقدار نامی خود تثبیت می‌شود [۱].

با گسترش استفاده از انرژی باد، توربین‌های بادی متصل به ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه [1] به طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شوند. این ژنراتورها به دلیل ویژگی که در کارکرد با سرعت های متغیر باد دارند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. با افزایش نفوذ این نوع از توربین ژنراتورها در سیستم قدرت و در نتیجه کاهش سهم ژنراتورهای سنکرون در شبکه، کنترل فرکانس سیستم قدرت با چالش بیشتری مواجه می‌شود. ژنراتورهای سنکرون به طور طبیعی به تغییرات بار سیستم پاسخ می‌دهند اما در توربین‌های بادی سرعت متغیر، به علت استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت، سرعت چرخش ژنراتور از شبکه جدا می‌گردد. لذا تغییرات فرکانس شبکه توسط روتور این ژنراتورها دیده نمی‌شود و این نیروگاه‌ها به طور عادی در کنترل فرکانس شبکه شرکت نمی‌کنند و در نتیجه پایداری فرکانسی سیستم به خطر می‌افتد [۲] و [۳].

تلاش‌های متعددی توسط محققین برای حل چالش‌های ناشی از کاربرد توربین‌های بادی سرعت متغیر صورت گرفته است. در [۲] و [۳] مقایسه‌ای بین پاسخ توربین‌های با DFIG و توربین‌های سرعت ثابت با ژنراتور القایی طی انحراف فرکانس سیستم قدرت انجام گرفته است.

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که ژنراتور سرعت ثابت می‌تواند اینرسی خود را همانند ماشین‌های سنکرون در شبکه به اشتراک گذارد؛ ولی این امر در مورد DFIG صدق نمی‌کند. بنابراین حلقه کنترل تکمیلی‌ای برای DFIG پیشنهاد شده است که می‌تواند توان حقیقی خروجی را طی اغتشاش فرکانس سیستم افزایش دهد. همچنین مشاهده می‌شود که در این حالت، انرژی جنبشی آزاد شده از توربین‌های بادی سرعت متغیر در مقایسه با انرژی جنبشی آزاد شده از طریق توربین‌های بادی سرعت ثابت بزرگتر است. با این حال این روش دارای محدودیت‌هایی است که از جمله آن می‌توان به تقریبی بودن تابع مشتق اشاره نمود [۴]. در مرجع [۵] مطالعه‌ای بر رفتار و قابلیت توربین‌های بادی سرعت متغیر برای تولید بیش از حد توان حقیقی در ثانیه‌های اولیه پس از اغتشاش بار انجام شده است. با بررسی این موضوع مشخص شده است که توربین‌های بادی سرعت متغیر می‌توانند به مدت ۱۰ ثانیه توان حاصل از اینرسی خود را در شبکه به اشتراک بگذارند.

به منظور مشارکت موثر توربین‌های بادی سرعت متغیر در تنظیم فرکانس شبکه، یک سیگنال کنترل تکمیلی به نام کنترل اینرسی در حلقه کنترل توان حقیقی توربین‌های بادی افزوده می‌شود. این حلقه در زمان انحراف فرکانس فعال‌شده و با تزریق توان بیشتری از توربین باد که ناشی از انرژی جنبشی ذخیره شده در جرم چرخان پره‌های خود می‌باشد، سعی در بهبود دینامیک فرکانس سیستم قدرت در ثانیه‌های اولیه پس از اغتشاش بار دارد. به طور کلی، کنترل اینرسی توربین‌های بادی را می‌توان به دو دسته تقسیم نمود. در اولین گروه، مقدار توان اضافی تأمین‌شده با مشتق فرکانس متناسب است [۲] و [۳]. در گروه دوم، استراتژی کنترل بر روی تنظیم فرکانس اولیه توربین‌های بادی اجرا می‌شود. در این حالت مقدار توان اضافی تأمین شده با اختلاف بین فرکانس نامی و اندازه‌گیری شده متناسب می‌باشد [۶]. در [۷] روش ترکیبی دو استراتژی کنترل برای تهیه پاسخ اینرسی توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گرفته است. سیگنال کنترل کمکی که با انحراف و مشتق انحراف فرکانس متناسب می‌باشد برای افزایش توان توربین بادی مورد استفاده قرارگرفته است. روش دیگری که برای کنترل فرکانس توربین‌های بادی سرعت متغیر به کار می‌رود روش De-loading می‌باشد. در این روش، تنظیم فرکانس توسط تغییر زاویه پره‌های توربین بادی انجام می‌گیرد. در این حالت، توربین بادی سرعت متغیر نزدیک به توان بیشینه خود کار کند. در لحظات اولیه پس از اغتشاش بار و با توجه به افت فرکانس سیستم، توربین‌های بادی با تغییر زاویه خود و در نتیجه جذب حداکثر توان از باد، می‌توانند توان بیشتری را به شبکه تزریق نمایند. در این روش توربین‌های بادی قابلیت تنظیم بلند مدت فرکانس را خواهند داشت [۸] و [۹].

سیستم‌های فازی نوع تاکاگی-سوگنو و کانگ (TSK) ابزار مناسبی برای مدل‌سازی دانش فرد خبره به منظور کنترل و توصیف سیستم‌های غیرخطی که دارای دینامیک‌های نامعلوم‌اند می‌باشند [۱۰]. در این سیستم‌ها، بخش ***مقدم (اگر)*** قواعد ***اگر-آنگاه*** فازی، همانند سیستم‌های فازی معمولی (ممدانی) می‌باشند، اما بخش ***مؤخر (آنگاه)*** آن‌ها ترکیب خطی از متغیرهای ورودی می‌باشد. این تغییر سبب شده است که سیستم فازی TSK در مقایسه با سایر الگوریتم-های یادگیری توصیف قوی‌تری از یک سیستم پیچیده را ارائه نماید [۱۱].

پایگاه دانش یک سیستم فازی می‌تواند بر اساس دانش فرد خبره و یا زوج داده‌های ورودی-خروجی طراحی گردد؛ با این حال، پایگاه دانش طراحی شده بر مبنای دانش فرد خبره دارای صحت عملکرد ضعیف‌تری نسبت به پایگاه دانش بر مبنای زوج داده‌های ورودی-خروجی می‌باشد [۱۲]. به منظور استخراج قواعد فازی از زوج داده‌های

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]

ورودی-خروجی روش‌های مختلفی مثل شبکه‌های عصبی کوهنن [۱۳] و خوشه‌بندی فازی [۱۴] پیشنهاد شده‌اند. در این پژوهش از روش خوشه‌بندی تفاضلی بدین منظور استفاده شده است [۱۵].

در این مقاله به منظور بهبود دینامیک فرکانس سیستم قدرت، با افزودن حلقه‌های کنترل فرکانس تکمیلی بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت، اینرسی این نوع از توربین‌ها در شبکه به اشتراک گذاشته می‌شود و برای استفاده از حداکثر اینرسی توربین‌های بادی سرعت متغیر و همچنین جلوگیری از کاهش بیش از حد مجاز سرعت توربین و عدم خروج آن، یک سیستم فازی TSK طراحی می‌شود. سیستم فازی TSK ضریب مشارکت توربین‌های بادی را به گونه‌ای تعیین می‌کند که پس از بروز اغتشاش، توربین‌های بادی حداکثر اینرسی خود را برای جبران کاهش تولید در شبکه به اشتراک‌گذارند و در عین حال از حد مجاز کمینه سرعت خود عبور نکنند. الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO) برای تعیین زوج داده‌های ورودی-خروجی بهینه جهت ساخت سیستم فازی TSK مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم PSO ضریب مشارکت بهینه توربین‌های بادی را متناسب با بار به گونه‌ای جستجو و مشخص می‌کند که توربین‌های بادی بتوانند حداکثر اینرسی خود را بدون عبور از حداقل سرعت مجاز ارائه نمایند. پس از جمع‌آوری زوج داده‌های ورودی–خروجی با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی تفاضلی، سیستم فازی TSK اولیه از این پارامترهای بهینه استخراج می‌شوند. در مرحله آخر برای تنظیم سیستم فازی TSK از روش حداقل مربعات بازگشتی استفاده می‌شود.

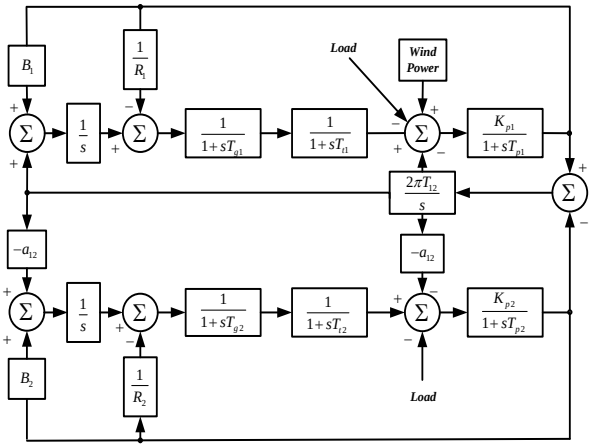
در ادامه‌ی این مقاله، در بخش دوم، یک سیستم دو ناحیه‌ای را به عنوان سیستم قدرت و مدل توربین بادی سرعت متغیر را به عنوان مدل مجموعه توربین‌های بادی برای مطالعات کنترل فرکانس ارائه می‌کنیم. در بخش سوم، روش کنترل اینرسی و به اشتراک‌گذاری آن شرح داده می‌شود. در بخش چهارم، ابتدا به طور مختصر سیستم فازی TSK و نحوه استخراج قواعد فازی برای ساخت یک سیستم TSK توضیح داده شده است و سپس روش پیشنهادی شرح داده می‌شود. شبیه‌سازی‌هایی به منظور اثبات کارایی روش پیشنهادی در بخش پنجم ارائه‌شده و در نهایت نتیجه‌گیری در بخش ششم بیان شده است.

۲- مدل‌های مطالعاتی کنترل فرکانس

در این قسمت یک سیستم دو ناحیه‌ای به عنوان سیستم قدرت و مدل توربین بادی سرعت متغیر به عنوان مدل مجموعه توربین‌های بادی برای مطالعات کنترل فرکانس ارائه می‌شود.

۲-۱- مدل دینامیکی سیستم قدرت چند ناحیه‌ای

اگر چه مدل‌های سیستم‌های قدرت عموماً غیرخطی می‌باشند، برای مطالعات کنترل بار-فرکانس سیستم قدرت مدل خطی شده‌ای در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱) شمای یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای را نشان می‌دهد که از همه دینامیک‌های الکتریکی آن صرف نظر شده و



شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم قدرت دو ناحیه‌ای به همراه توربین بادی سرعت متغیر

تنها دینامیک‌های کند سیستم شامل گاورنر و سرعت توربین در نظر گرفته شده‌اند [۱]. این سیستم دارای دو ناحیه مشابه حرارتی بوده و توان بادی به صورت یک بار منفی به ناحیه اول آن افزوده شده است.

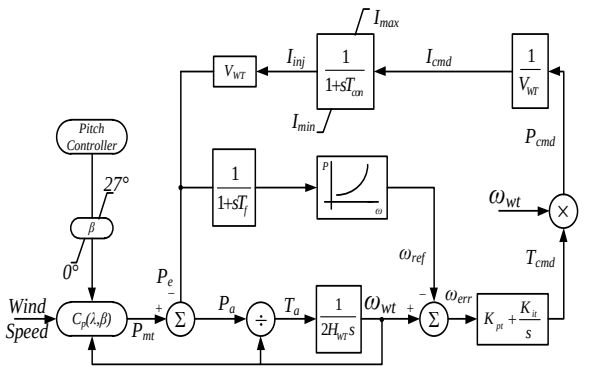
۲-۲- مدل دینامیکی توربین باد سرعت متغیر

در این مقاله، توربین بادی سرعت متغیر MW ۱/۵ شرکت جنرال الکتریک که در مراجع [۱۶-۱۹] به طور کامل توضیح داده شده‌اند، مورد استفاده قرارگرفته است. در مطالعات کنترل فرکانس، بحث بر روی حلقه‌های کنترل توان حقیقی متمرکز می‌شود، بنابراین مدل توربین بادی برای این مطالعات به صورت شکل (۲) ساده‌سازی می‌شود [۲۰] و [۲۱].

توان مکانیکی ایجاد شده تابعی از سرعت باد، سرعت روتور و زاویه گام می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

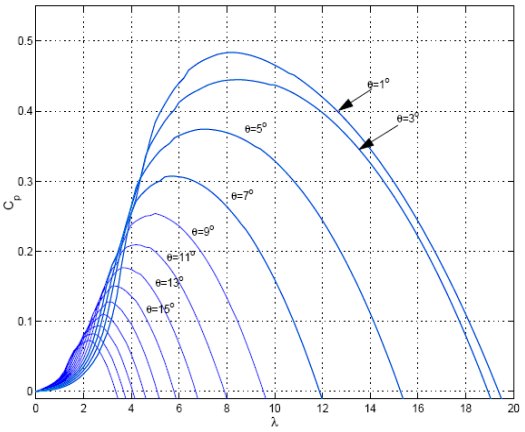
$$P_m = \frac{\rho}{2} A_r V_\omega^3 C_p(\lambda,\theta) \qquad (۱)$$

در این معادله، ρ چگالی هوا، V_ω سرعت باد و C_p ضریب توان تولیدی است که تابعی از λ و θ می‌باشد. λ نسبت سرعت نوک پره روتور به سرعت باد می‌باشد و θ نیز زاویه گام پره است. C_p مشخصه



شکل (۲): مدل ساده‌شده توربین ژنراتور بادی با DFIG همراه با کنترلرهای توان حقیقی و زاویه گام

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016



شکل (۳): منحنی‌های C_P توان باد

توربین باد بوده و معمولاً به صورت یک مجموعه از منحنی‌های C_p بر حسب λ تهیه می‌شود که θ در آن به صورت یک پارامتر است.

منحنی‌های C_P بر حسب λ برای یک نمونه توربین باد جنرال الکتریک در شکل (۳) نشان داده شده است [۱۷]. برازش منحنی انجام شده برای به دست آوردن نمایش ریاضی منحنی‌های C_p به صورت رابطه (۲) می‌باشد [۱۷]:

$$C_p(\lambda,\theta)=\sum_{i=0}^{4}\sum_{j=0}^{4}\alpha_{i,j}\theta^i\lambda^j \qquad (۲)$$

برازش منحنی یک تقریب خوب برای مقادیر $۲<\lambda<۱۳$ می‌باشد. مقادیر λ خارج از این بازه، سرعت‌های باد خیلی بالا و پایین را نشان می‌دهد که خارج از محدوده کارکرد توربین است. با توجه به منحنی‌های C_p شکل (۳) در توربین‌های بادی سرعت متغیر، سرعت توربین بسته به میزان سرعت باد به گونه‌ای کنترل می‌شود که حداکثر توان ممکن توسط توربین تولید شده و به عبارت دیگر، به ازای θ معین نقطه کار روی اوج این منحنی قرار گیرد.

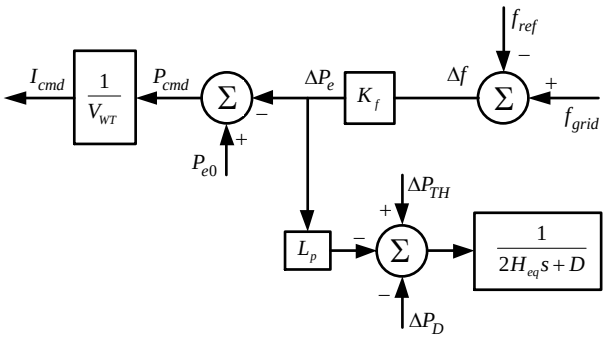
از آن جا که اندازه‌گیری توان الکتریکی ساده‌تر و دقیق‌تر از اندازه‌گیری سرعت باد است، در عمل برای ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT[2]) سرعت مرجع توربین بر حسب توان اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. سرعت مرجع به طور نرمال ۱/۲ pu می‌باشد؛ اما برای سطوح توان زیر ۷۵٪ کاهش می‌یابد. سرعت مرجع برای دنبال کردن بیشینه توان از باد برای سطوح زیر ۰/۷۵ توان نامی توسط رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۳ و ۱۷] :

$$\omega_{ref} = -0.67P^2 + 1.42P + 0.51 \qquad (۳)$$

که در این رابطه P توان الکتریکی اندازه‌گیری شده است. برای سطوح توان بیشتر از نامی، سرعت روتور توسط گام پره کنترل خواهد شد [۱۷].

۳- روش کنترل اینرسی

با آن که توربین‌های بادی سرعت متغیر دارای مقدار قابل توجهی انرژی جنبشی ذخیره شده در جرم چرخان خود می‌باشند اما به علت



شکل (۴): حلقه کنترل تکمیلی توربین باد

ثابت نگه‌داشتن لغزش توسط ادوات الکترونیک قدرت، تغییرات فرکانس شبکه توسط روتور این توربین‌ها دیده نمی‌شوند و در نتیجه نمی‌توانند اینرسی خود را آزاد کرده و انرژی حاصل از آن را در شبکه به اشتراک بگذارند.

به این ترتیب با افزایش نفوذ توربین‌های بادی سرعت متغیر در شبکه، اینرسی معادل سیستم کاهش یافته و قابلیت تنظیم فرکانس شبکه تضعیف می‌شود و احتمال ناپایداری و حتی فروپاشی شبکه پس از افت فرکانس افزایش می‌یابد. برای حل این مشکل روش کنترل اینرسی در بسیاری از مقالات پیشنهاد شده است. در این روش سیگنال کمکی اضافی بر روی کنترل توربین باد قرار می‌گیرد تا به مجرد آشکار شدن یک انحراف فرکانس در شبکه، یک توان اضافی به صورت تابعی از انحراف فرکانس شبکه به سیستم قدرت وارد کند [۲۲] و [۲۳]. شکل (۴) شمایی از این طرح را نشان می‌دهد.

در این شکل L_P، میزان نفوذ توان توربین‌های بادی در شبکه می‌باشد، در نتیجه اگر L_p درصد تولید برق شبکه از توربین‌های بادی باشد، به همین میزان کاهش در اینرسی سیستم بدون مشارکت نیروگاه‌های بادی وجود خواهد داشت. همچنین K_f ضریب مشارکت توربین بادی در کنترل فرکانس شبکه می‌باشد. با توجه به شکل (۴)، با افزایش مقدار K_f توان خروجی توربین باد نیز افزایش می‌یابد و این موجب بهبود دینامیک فرکانس سیستم قدرت می‌شود؛ اما افزایش K_f موجب کاهش هر چه بیشتر سرعت توربین نیز می‌شود و این احتمال وجود خواهد داشت که توربین باد پس از عبور از سرعت کمینه خود از مدار خارج شود که این خود موجب ایجاد اغتشاشی دیگر در شبکه شده و امکان خروج سایر توربین‌های بادی را نیز فراهم می‌کند؛ بنابراین در روش کنترل اینرسی برای تعیین مقدار K_f باید بین بهبود نسبی فرکانس و جلوگیری از ناپایداری مصالحه‌ای صورت پذیرد. اینرسی معادل شبکه بدون مشارکت توربین‌های بادی سرعت متغیر در کنترل فرکانس شبکه به صورت زیر نشان داده می‌شود [۲۳]:

$$H_{eq,Lp}=H_{eq}(1-L_p) \qquad (۴)$$

همچنین اینرسی اصلاح‌شده معادل شبکه در حضور L_P % توان باد که در کنترل فرکانس سیستم مشارکت می‌کنند به صورت رابطه (۵) می‌باشد:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]

$$H_{eq,Lp} = H_{eq}(1-L_p) + H_{wt}L_p \quad (۵)$$

و دروپ معادل واحدهای تولیدی در هر دو حالت به صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$R_{Lp} = R/(1-L_p) \quad (۶)$$

۴- روش پیشنهادی

به منظور بهبود عملکرد توربین‌های بادی در کنترل فرکانس شبکه و همچنین حداکثر استفاده از انرژی جنبشی ذخیره شده در جرم چرخان آن، روشی مبتنی بر منطق فازی پیشنهاد شده است.

در این روش ابتدا با استفاده از الگوریتم PSO ضریب مشارکت بهینه توربین‌های بادی متناسب با بار را به گونه‌ای جستجو می‌کنیم تا توربین‌های بادی سرعت متغیر بتوانند حداکثر اینرسی خود را بدون عبور از حداقل سرعت مجاز ارائه نمایند. سپس با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی تفاضلی، سیستم فازی TSK اولیه از این پارامترهای بهینه استخراج می‌گردد و در مرحله آخر برای تنظیم سیستم فازی TSK از روش حداقل مربعات بازگشتی استفاده می‌شود.

۴-۱- الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات

الگوریتم PSO یکی از روش‌های محاسبات تکاملی است. این روش با استفاده از انبوهی از ذرات جواب بهینه کلی را در فضای جستجو پیدا می‌کند [۲۴و ۲۵]. هر ذره نماینده یک جواب منتخب برای تابع هدف است و هر ذره دارای بردار موقعیت و سرعت مختص به خود می‌باشد. فرض می‌شود هر ذره دارای D بعد در فضای جستجو باشد.

i-امین ذره در یک فضای D بعدی به صورت $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})$ نمایش داده می‌شود. در هر تکرار بهترین موقعیت هر ذره که بهترین مقدار در تابع هدف را تاکنون داشته است با عنوان p_{bi} و به صورت $p_{bi} = (p_{bi1}, \dots, p_{bid}, \dots, p_{biD})$ ذخیره می‌شود.

بهترین موقعیت کل داده‌ها که بهترین موقعیت در بین همه‌ی P_{bi} ذرات می‌باشد با P_{gb} نمادگذاری می‌شود. سرعت برای هر ذره به صورت $v_i = (v_{i1}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$ نمایش داده می‌شود. در هر تکرار، سرعت و موقعیت هر ذره به سمت P_{bi} و P_{gb} بر اساس رابطه‌های زیر تغییر می‌یابد.

$$v_{id} = wv_{id} + c_1 r_1 (p_{bid} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gb} - x_{id}) \quad (۷)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (۸)$$

که در این رابطه w ، ضریب اینرسی نامیده می‌شود و مقدارش در فاصله [0,1] می‌باشد. برای افزایش قدرت جستجوگری PSO، سرعت اینرسی w به صورت خطی در طول تکرار الگوریتم کاهش می‌یابد.

$$w(iter) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{Iter_{\max}} \times iter \quad (۹)$$

که در این رابطه $iter_{max}$ بیش‌ترین تکرار الگوریتم می‌باشد. C_1 و C_2 ضرایب نامنفی موسوم به شتاب می‌باشند، r_1 و r_2 به صورت تصادفی در بازه [۱و۰] تولید می‌شوند. $v_{id} \in [-v_{max}, v_{max}]$ و v_{max} بیش‌ترین مقدار سرعت می‌باشد [۲۶].

توقف الگوریتم تکاملی بر مبنای دستیابی به تعداد تکراری معین مشخص می‌شود. در این پژوهش حداکثر تکرار ۵۰ انتخاب شده است.

در ضمیمه (پ) فرآیند الگوریتم PSO استاندارد نشان داده شده است. در یافتن بهترین ضریب مشارکت توربین‌های بادی متناسب با بار توسط PSO، هر ذره دارای یک بعد می‌باشد. بعد از آخرین تکرار، بهترین موقعیت کل ذرات جواب بهینه را که شامل بهترین K_f می‌باشد را نشان می‌دهد.

۴-۲- سیستم فازی TSK

سیستم‌های فازی TSK تقریب گرهای عمومی هستند، بدین معنا که توانایی تقریب زدن هر نوع تابع یا سیستم را تا هر دقت دلخواه دارا می‌باشند [۲۷و ۲۸]. به طور کلی این نوع از سیستم‌های فازی دارای بخش زمان بر غیرفازی کننده نیستند. در حقیقت می‌توان سیستم فازی TSK را یک میانگین وزنی از مقادیر بخش‌های ***آنگاه*** قواعد توصیف نمود.

هر قاعده فازی در یک سیستم فازی TSK به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$R_i : IF\ x\ is\ A_i\ THEN\ y_i = a_i^T x + b_i \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (۱۰)$$

که در این رابطه $x \in R^n$ و $y_i \in R$ متغیرهای ورودی و خروجی i-امین قاعده فازی می‌باشند. M نماینده تعداد قواعد می‌باشد. A_i متغیر فازی بخش اگر در بازه $[0,1] \in R^n$ می‌باشد. بخش اگر در سیستم‌های فازی به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$A_i(x) = \prod_{j=1}^{n} \mu_{ij}(x_j) \quad (۱۱)$$

برای k-امین ورودی x_k، خروجی کلی سیستم، $y(k)$ ،به وسیله مجموع مشارکت قاعده‌های مستقل به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$u_{ki} = \frac{A_i(x_k)}{\sum_{i'=1}^{M} A_{i'}(x_k)} \quad (۱۲)$$

که در این رابطه u_{ki} نرمالیزه شده عبارت مقدم قاعده‌ی i-ام می‌باشد و به صورت زیر فرموله می‌گردد.

$$y(k) = \sum_{i=1}^{M} u_{ki} y_i(k) \quad (۱۳)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

پایگاه دانش، قلب یک سیستم فازی TSK است و انتخاب مناسب تعداد قواعد و متغیرهای فازی نیازمند دانشی اولیه در مورد مسئله می‌باشد. این مسئله معمولاً توسط افراد خبره در طراحی پایگاه دانش به روش‌های کلاسیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب تعداد زیاد قواعد سبب پیچیده‌تر شدن سیستم فازی می‌شود که ممکن است برای مسئله ضروری نباشد و مدل به دست آمده حافظه‌ی زیادی را اشغال نماید و علاوه بر این دارای سرعت پردازش پایینی باشد. در مقابل انتخاب کم قواعد ممکن است سیستم فازی ضعیفی را به وجود آورد که هدف مورد نظر را تأمین نکند [۲۸]. علاوه بر این، پایگاه دانش طراحی شده بر مبنای دانش فرد خبره معمولاً دارای صحت عملکرد ضعیف‌تری نسبت به پایگاه دانش طراحی شده بر مبنای زوج داده‌های ورودی-خروجی می‌باشد. این کاهش صحت عملکرد بدین دلیل است که فرد خبره فقط توانایی فرموله کردن دانش خودآگاه بشری خود را به صورت مجموعه‌ای از قواعد ***اگر-آنگاه*** فازی دارد و توانایی فرموله نمودن دانش ناخودآگاه خود را ندارد. لذا روش‌های مختلفی برای فرموله کردن دانش ناخودآگاه توسط محققان ارائه شده است[۲۹-۳۰].

مبنای این روش‌ها بدین صورت است که به فرد خبره در هنگام کار به صورت یک جعبه سیاه نگریسته می‌شود و ورودی و خروجی‌های آن گردآوری می‌شوند. یعنی دانش خودآگاه و ناخودآگاه، در مجموعه-ای از زوج‌های ورودی-خروجی نهفته‌اند. در نتیجه با ساخت سیستم فازی از روی زوج‌های ورودی و خروجی به خوبی هر دوی این دانش‌ها بکار گرفته می‌شوند. در این پژوهش به همین دلیل در ساخت سیستم فازی از روش خوشه‌بندی تفاضلی برای ساخت سیستم فازی اولیه استفاده می‌شود. خوشه‌بندی تفاضلی در حقیقت ترکیبی از فضای ورودی– خروجی را نمایش می‌دهد .به عبارت دقیق‌تر هر داده $z_i = (x_i, y_i)$ برداری است شامل زوج داده‌های ورودی-خروجی. خوشه‌ها متناسب با جرم داده‌ها در فضای ورودی و خروجی پراکنده می‌شوند. هر مرکز خوشه C_i یک قانون اولیه به فرم (۱۰) می‌باشد که رفتار ورودی- خروجی سیستم را بیان می‌کند. با در نظر گرفتن یک بردار ورودی X، در جهت تحقق‌پذیری قاعده i-ام متناسب با مرکز خوشه‌ای که در آن دسته‌بندی می‌شود به دست می‌آید.

$$\mu_i = e^{-a} \left\| X - C_i \right\|_2 \qquad (۱۴)$$

که در این رابطه C_i مرکز خوشهi-ام و a یک عدد ثابت است که متناظر با شعاع همسایگی الگوریتم خوشه‌بندی تفاضلی محاسبه می-شود.

$$a = 4 / r_a^2 \qquad (۱۵)$$

که در این رابطه r_a شعاع همسایگی می‌باشد در نهایت خروجی سیستم فازی TSK طبق رابطه (۱۲) به دست می‌آید. بخش ***مؤخر*** یک سیستم فازی TSK بر طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$y_i = a_i^T x + b_i \ , \ i = 1, 2, \ldots, M \qquad (۱۶)$$

که در این رابطه M تعداد قواعد و a_i^T و b_i ضرایبی هستند که برای عملکرد بهینه سیستم فازی می‌بایست تنظیم شوند. مدل اولیه به دست آمده بهینه نیست، زیرا بخش ***مقدم*** قواعد فقط از روی بخش-بندی فضای ورودی-خروجی به دست آمده و در نتیجه مدل نمی‌تواند به خوبی رابطه بین ورودی و خروجی را نشان دهد.

در این پژوهش با در نظر گرفتن معیار خطای مجموع حداقل مربعات (MSE)، از روش حداقل مربعات بازگشتی (RLS) به علت سرعت بیشتر و حجم حافظه مورد نیاز کمتر نسبت به روش‌های گرادیان نزولی و حداقل مربعات دسته‌ای برای بهینه‌سازی سیستم فازی TSK بهره گرفته شده است[۲۸]. برای مطالعه بیشتر روش خوشه‌بندی تفاضلی و ساخت سیستم فازی با استفاده از این روش به مراجع [۳۲-۳۶] مراجعه نمایید.

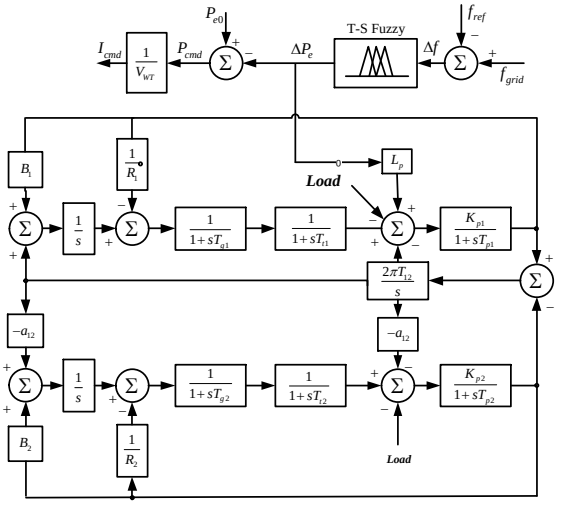
پارامترهای مورد نیاز برای استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی تفاضلی در ضمیمه (ج) گردآوری شده است. خطای مجموع حداقل مربعات نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$MSE = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{K} (y_i - y_d)^2 \qquad (۱۷)$$

که در این رابطه y خروجی سیستم فازی TSK، y_d خروجی مطلوب و K تعداد کل داده‌ها می‌باشد.

۳-۴- کنترل اینرسی توربین بادی سرعت متغیر با استفاده از سیستم فازی TSK

در این روش به منظور بهبود دینامیک فرکانس سیستم قدرت و همچنین مشارکت حداکثری اینرسی توربین‌های بادی سرعت متغیر در کنترل فرکانس شبکه، همانند روش کنترل اینرسی، سیگنال کمکی اضافی بر روی کنترل توربین‌های بادی سرعت متغیر قرار می‌گیرد؛ با این تفاوت که ضریب مشارکت توربین‌های بادی با استفاده از سیستم



شکل (۵): دینامیک فرکانس سیستم دو ناحیه‌ای همراه با مشارکت فازی توربین های بادی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]

جدول (۱): مقادیر بهینه پارامتر K_f

Load	Optimal K_f
0.1	20.0000
0.2	11.8112
0.3	5.9381
0.4	3.9856
0.5	3.0021

فازی TSK تعیین می‌گردد. شکل (۵) شمایی از این طرح را نشان می دهد که در آن توربین‌های بادی سرعت متغیر به صورت یک بار منفی به ناحیه اول یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای افزوده شده است.

به مجرد آشکار شدن یک انحراف فرکانس در شبکه، یک توان اضافی به صورت تابعی از انحراف فرکانس شبکه و همچنین ضریبی از میزان مشارکت بهینه توربین‌های بادی به سیستم قدرت وارد می‌شود به گونه‌ای که توربین‌های بادی حداکثر اینرسی خود را در شبکه به اولیه پس از اغتشاش بار شوند. قواعد اولیه سیستم فازی TSK از زوج داده‌های ورودی-خروجی که توسط الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بهینه‌سازی شده‌اند، به دست می‌آیند.

بدین منظور با استفاده از الگوریتم PSO ضریب مشارکت بهینه توربین‌های بادی به ازای بارهای مختلف به گونه‌ای تعیین می‌شود که توربین‌های بادی سرعت متغیر بتوانند حداکثر اینرسی خود را بدون عبور از حداقل سرعت مجاز ارائه نمایند. حداقل سرعت مجاز در این نوع از توربین‌ها pu ۰/۸۵در نظر گرفته شده است.

یافتن بهترین مقدار K_f به صورت یک مسئله کمینه سازی تعریف می‌شود. تابع هدف مسئله مذکور، به صورت مجموع وزن‌دار میانگین مربعات خطای سرعت توربین باد و زمان نشست فرکانس سیستم قدرت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$ObjFcn = \alpha_1.E_1 + \alpha_2.E_2 \qquad (۱۸)$$

$$E_1 = MSE(0.85 - w_t) \qquad (۱۹)$$

$$E_2 = \text{Settling Time } of \ \ frequency \qquad (۲۰)$$

که در این رابطه α_1 و α_2 ضرایب میزان اهمیت دو بخش تابع هدف می‌باشند که به منظور حفظ حداقل سرعت توربین باد و عبور نکردن آن از حد مجاز مقادیر $\alpha_1 =$ ۰/۸ و $\alpha_2 =$ ۰/۲ انتخاب شده‌اند. محدوده جستجو برای مقدار بهینه پارامتر K_f در بازه [0, 20] صورت گرفته است. جدول (۱) مقادیر بهینه ضرایب مشترک توربین‌های بادی را به ازای بارهای مختلف که توسط الگوریتم PSO جستجو شده‌اند را نشان می‌دهد.

اکنون با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی تفاضلی سیستم فازی TSK اولیه از زوج داده‌های بهینه جدول (۱) ساخته می‌شود و در مرحله آخر، روش حداقل مربعات بازگشتی برای تنظیم سیستم فازی TSK بکار گرفته می‌شود. قواعد فازی به دست آمده به صورت زیر می‌باشند:

IF *Load* is *Low* **THEN** $y_1 = -9.684 \times Load + 7.844$

IF *Load* is *Medium* **THEN** $y_2 = -13.5 \times Load + 10.08$

IF *Load* is *High* **THEN** $y_3 = 0.002 \times Load + 24.15$

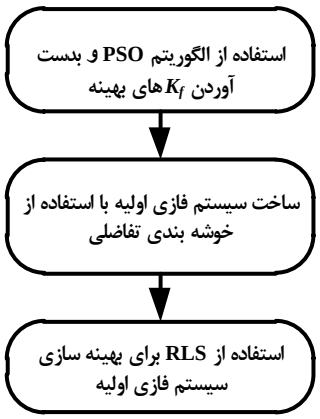
و در نهایت K_f بهینه با استفاده از قواعد فازی فوق و رابطه (۱۳) به دست می‌آید. فرآیند روش پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است.

شکل (۷) توابع عضویت استخراج شده توسط روش خوشه‌بندی تفاضلی را نشان می‌دهد و همچنین رابطه بین میزان بار و ضریب مشارکت بهینه توربین‌های بادی را که توسط سیستم فازی TSK حاصل شده است را می‌توان در شکل (۸) مشاهده نمود.

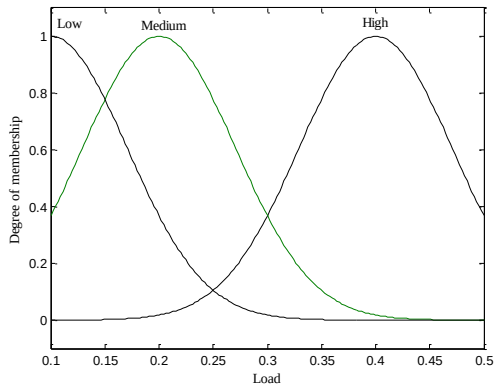
۵- شبیه‌سازی

در این قسمت به بررسی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی موارد مطالعاتی بخش‌های گذشته پرداخته می‌شود. سیستم مورد مطالعه شکل (۱) مبنای شبیه‌سازی‌های این بخش می‌باشد که در آن توربین‌های بادی به صورت یک مزرعه باد و به عنوان یک بار منفی به ناحیه اول افزوده شده‌اند.

شکل (۹) نمودار فرکانس ناحیه اول را بدون مشارکت توربین‌های بادی و به ازای تأثیرات متفاوت توان باد در شبکه نشان می‌دهد. با افزودن pu ۰/۱ اغتشاش بار به ناحیه اول، تعادل بین تولید و مصرف بر هم خورده و موجب افت فرکانس در هر دو ناحیه می‌گردد. همان



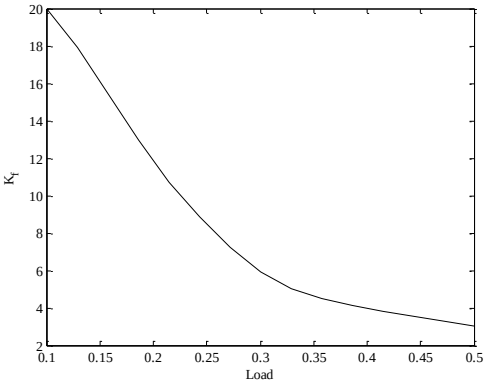
شکل(۶): فرآیند روش پیشنهادی



شکل (۷): توابع عضویت توصیف‌کننده بار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

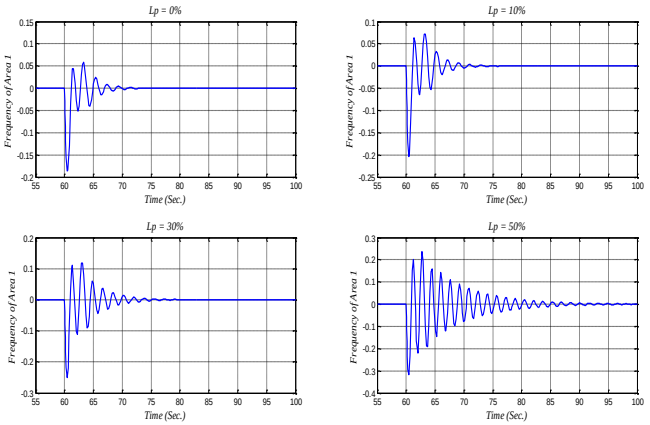


شکل (۸): رابطه به دست آمده بین بار و ضریب مشارکت بهینه توربین‌های بادی در سیستم فازی TSK

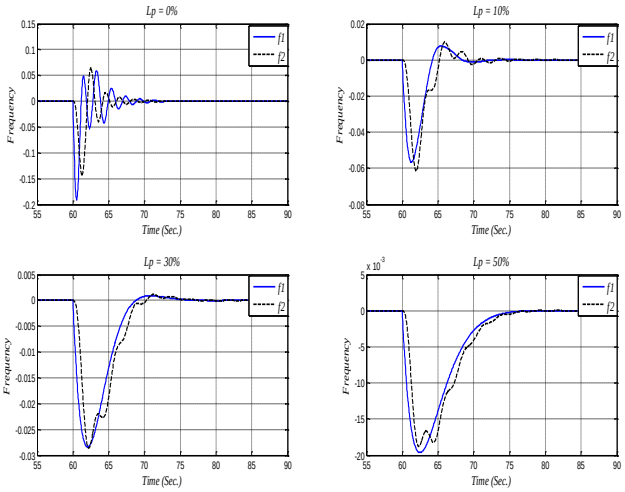
طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تأثیر توان باد، اینرسی معادل شبکه ناشی از عدم مشارکت توربین‌های بادی، کاهش یافته و دینامیک فرکانس سیستم قدرت بدتر می‌شود که این خود موجب کاهش پایداری فرکانسی سیستم خواهد شد.

شکل (۱۰) نمودار فرکانس نواحی ۱ و ۲ سیستم قدرت را همراه با مشارکت توربین‌های بادی و به ازای تأثیرات متفاوتی از توان باد در شبکه نشان می‌دهد. کنترل اینرسی به کار گرفته‌شده در توربین‌های بادی، با ضریب مشارکت ثابت $K_f = ۶$ می‌باشد که باعث افزایش اینرسی معادل شبکه شده و در نتیجه، دینامیک فرکانس سیستم قدرت نسبت به حالت بدون مشارکت توربین‌های بادی، بهبود می‌یابد.

شکل (۱۱) نمودار دینامیک فرکانس ناحیه اول را در دو حالت مشارکت و عدم مشارکت توربین‌های بادی در کنترل فرکانس شبکه و به ازای مقادیر متفاوتی از توان بار رانشان می‌دهد. میزان نفوذ توان باد در شبکه L_P=۰/۱pu در نظر گرفته شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد، با افزایش بار میزان افت فرکانس به علت کاهش اینرسی معادل شبکه- ناشی از عدم مشارکت توربین‌های بادی در کنترل فرکانس سیستم قدرت- افزایش می‌یابد که با استفاده از حلقه کنترل اینرسی با ضریب مشارکت ثابت، می‌توان دینامیک و افت فرکانس سیستم قدرت را بهبود بخشید. توان تزریق شده به شبکه در ثانیه‌های اولیه پس از اغتشاش بار، از انرژی جنبشی ذخیره‌شده در جرم چرخان



شکل (۹): دینامیک فرکانس ناحیه اول بدون مشارکت توربین‌های بادی



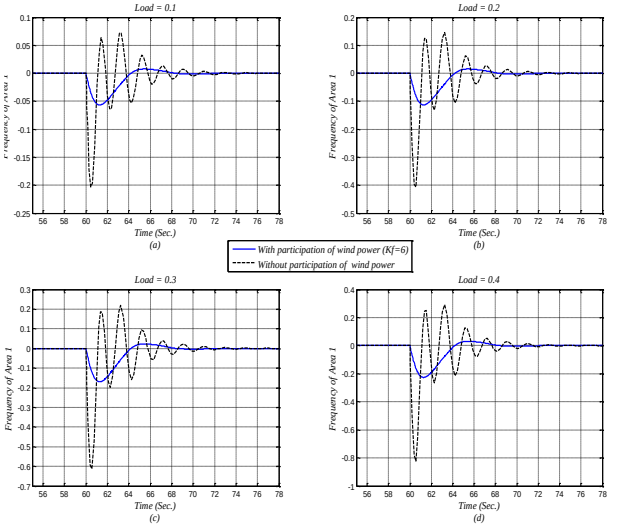
شکل (۱۰): دینامیک فرکانس سیستم دو ناحیه‌ای همراه با مشارکت توربین‌های بادی با ضریب کنترل اینرسی ثابت

توربین‌های بادی به دست می‌آید که با توجه به شکل (۴) برابر است با:

$$\Delta P_e = k_f \Delta f \qquad (۲۱)$$

بنابراین انتظار می‌رود با افزایش بار و در نتیجه افزایش انحراف فرکانس در شبکه، سرعت توربین‌های بادی نیز از نقطه بهینه خود دور شده و کاهش یابند؛ اما باید توجه داشت که این میزان نباید از حداقل سرعت توربین باد عبور نماید که در این صورت توربین باد از مدار خارج شده و موجب ایجاد اغتشاشی دیگر در شبکه می‌شود و امکان خروج سایر توربین‌های بادی را نیز فراهم می‌آورد.

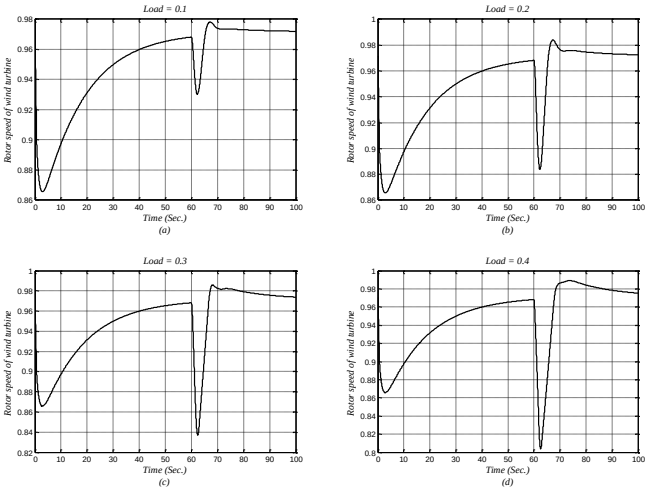
شکل (۱۲) به بررسی این موضوع می‌پردازد. چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش بار، سرعت توربین باد به علت آزادسازی اینرسی خود و تزریق توان ناشی از آن به شبکه، کاهش می‌یابد. اگر حداقل سرعت توربین باد ۰/۸۵ pu در نظر گرفته شود، به ازاء افزایش بار به میزان ۰/۳pu، سرعت توربین از مقدار کمینه خود عبور کرده و موجب خروج



شکل(۱۱): دینامیک فرکانس ناحیه اول به ازای بارهای مختلف، الف : بدون مشارکت توربین‌های بادی سرعت متغیر ب: با مشارکت آن‌ها و با ضریب کنترل اینرسی ثابت

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

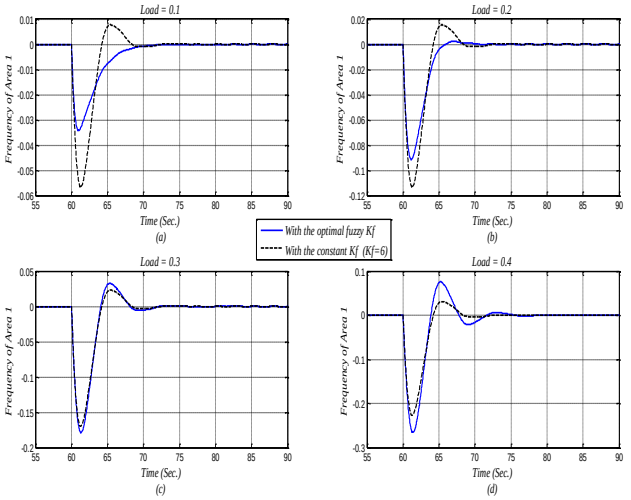
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]



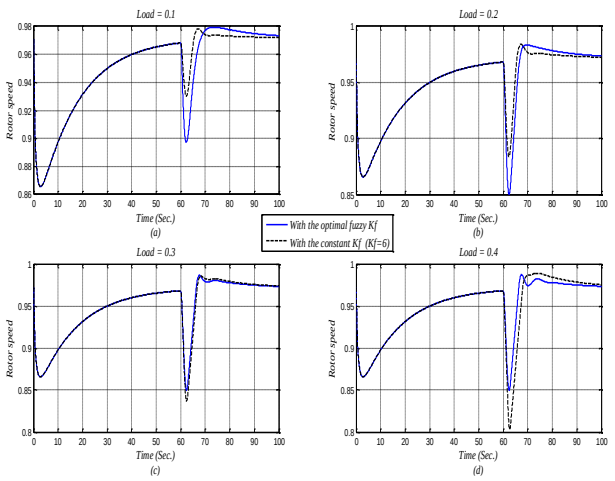
شکل (۱۲): دینامیک سرعت توربین باد با ضریب مشارکت ثابت توربین‌های بادی و به ازای بارهای مختلف

توربین باد از شبکه می‌شود؛ بنابراین در شکل‌های (۱۱-c) و (۱۱-d) استفاده از حلقه کنترل اینرسی با ضریب مشارکت ثابت در کنترل توربین باد در حقیقت موجب بدتر شدن دینامیک فرکانس سیستم قدرت می‌شود. همچنین با توجه به شکل‌های (۱۲-a) و (۱۲-b) مشاهده می‌گردد که توربین‌های بادی سرعت متغیر در برابر اغتشاش بارهای کمتر از pu ۰/۲ از حداکثر اینرسی خود استفاده نمی‌کنند، درحالی‌که می‌توانند با آزادسازی بیشتر اینرسی خود و در نتیجه رسیدن به کمینه سرعت خود، سهم بیشتری را در بهبود دینامیک فرکانس سیستم قدرت بر عهده گیرند.

به منظور حل این مشکل، چنانچه در بخش قبل پیشنهاد شد، ضریب مشارکت توربین‌های بادی توسط قواعد فازی و متناسب با بار، به گونه‌ای تغییر می‌یابد که پس از بروز اغتشاش، توربین‌های بادی سرعت متغیر حداکثر اینرسی خود را برای جبران کاهش تولید در شبکه به اشتراک‌گذارند در حالی که از حد مجاز کمینه سرعت خود عبور نکنند. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نتایج این موضوع را به خوبی نشان



شکل (۱۳): دینامیک فرکانس ناحیه اول همراه با مشارکت توربین‌های سرعت متغیر و به ازای بارهای مختلف، الف) با ضریب مشارکت بهینه فازی ب) با ضریب مشارکت ثابت

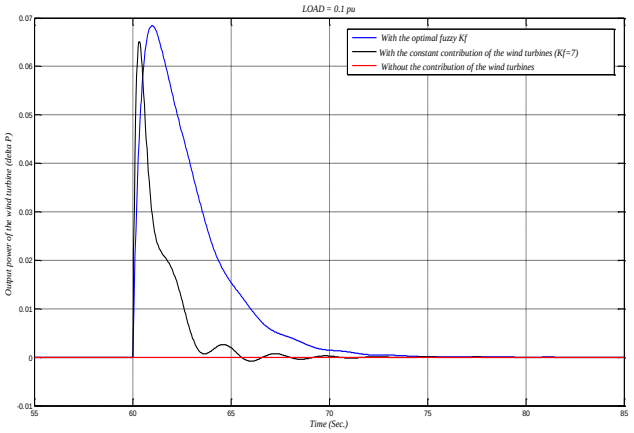


شکل (۱۴): دینامیک سرعت توربین‌های بادی سرعت متغیر به ازاء بارهای مختلف، با ضریب مشارکت بهینه فازی و با ضریب مشارکت ثابت

می‌دهند.

همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش بار و ایجاد انحراف فرکانس در سیستم، سرعت توربین‌های بادی به علت استفاده از ضریب مشارکت بهینه و متناسب با بار تا حد کمینه خود کاهش می‌یابد که این به معنای آزادسازی بیشتر اینرسی و نیز توان تزریق‌شده ناشی از آن به شبکه می‌باشد. به همین دلیل، افت فرکانس سیستم در شکل-های (۱۳-a) و (۱۳-b) نسبت به حالت استفاده از ضریب مشارکت ثابت، بهبود بیشتری می‌یابد. همچنین سرعت توربین در شکل‌های (۱۴-c) و (۱۴- d) نیز نسبت به حالت قبل در نقطه کمینه خود تثبیت شده است که این خود موجب عدم خروج توربین‌های بادی از شبکه می‌شود.

شکل (۱۵) توان خروجی توربین های بادی را در سه حالت عدم وجود کنترل اینرسی بر روی توربین های بادی و کنترل اینرسی با ضریب مشارکت ثابت و فازی را نشان می دهد.



شکل (۱۵): دینامیک توان خروجی توربین های بادی سرعت متغیر الف) با حلقه کنترل اینرسی فازی ب) با حلقه کنترل اینرسی ج) بدون حلقه کنترل اینرسی

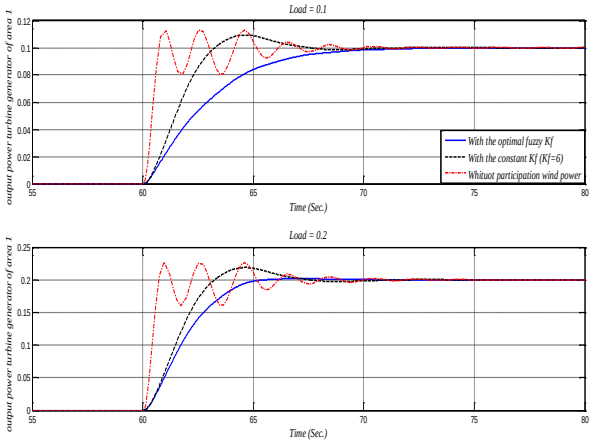
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

چنان که مشاهده می گردد، در حالت استفاده از ضریب مشارکت فازی، به علت افت سرعت توربین تا حداکثر مقدارمجاز خود و آزاد شدن حداکثر اینرسی توربین بادی، توان خروجی نسبت به حالت کنترل اینرسی با ضریب مشارکت ثابت، افزایش بیشتری می یابد.

همچنین در حالت عدم وجود کنترل اینرسی، به علت وجود مبدل‌های الکترونیک قدرت تغییرات فرکانس شبکه توسط روتور دیده نمی‌شود و لذا افزایش توانی ناشی از آزاد سازی اینرسی در توربین های بادی مشاهده نمی گردد.

توربین‌های بادی سرعت متغیر به علت داشتن مبدل‌های الکترونیک قدرت، دارای دینامیک سریع‌تری نسبت به نیروگاه‌های بخار می‌باشند، بنابراین در ثانیه‌های اولیه پس از اغتشاش بار، سهم بیشتری را در تزریق توان حقیقی به شبکه بر عهده می‌گیرند. این امر موجب عدم افزایش قابل‌توجه توان اکتیو ژنراتورهای سنکرون نسبت به قبل می شود. شکل (۱۶) به بررسی این موضوع می‌پردازد و نمودار توان اکتیو خروجی توربین بخار ناحیه یک را به ازای بارهای مختلف نشان می‌دهد



شکل (۱۶): مقایسه توان خروجی توربین ژنراتورهای ناحیه یک به ازای بارهای مختلف و در حالت‌های: الف) با مشارکت توربین‌های بادی و با k_f ثابت ب) با مشارکت توربین‌های بادی و با k_f فازی ج) بدون مشارکت توربین‌های باد

چنانکه مشاهده می‌شود، توان خروجی توربین‌های بخار در حالتی که توربین‌های بادی با ضریب مشارکت بهینه در شبکه فعالیت می‌کنند نسبت به عدم مشارکت توربین‌های بادی و همچنین مشارکت آن‌ها با ضریب ثابت، به آرامی و با دینامیک بهتری افزایش می‌یابد. یادآوری این نکته ضروری می‌باشد که حمایت توربین‌های بادی سرعت متغیر تنها در دوره گذرا بوده و صفر نمودن خطای حالت ماندگار فرکانس بر عهده کنترل ثانویه نیروگاه‌های بخار می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر توربین‌های بادی سرعت متغیر در کنترل فرکانس سیستم قدرت بررسی شد و به منظور بهبود دینامیک فرکانس سیستم قدرت، حلقه‌های کنترل فرکانس تکمیلی بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت آن افزوده شد تا بتوان اینرسی این نوع از توربین‌ها را در شبکه به اشتراک گذاشت.

به منظور استفاده از ظرفیت کامل توربین‌های بادی در ثانیه‌های اولیه پس از اغتشاش بار، ضریب مشارکت توربین‌های بادی سرعت متغیر به گونه‌ای طراحی شد که پس از بروز اغتشاش، توربین‌های بادی حداکثر اینرسی خود را برای جبران کاهش تولید در شبکه به اشتراک گذارند درحالی‌که از حد مجاز کمینه سرعت خود عبور نکنند و موجب به وجود آمدن اغتشاشی دیگر در شبکه نشوند.

برای تعیین میزان بهینه ضریب مشارکت توربین‌های بادی که به میزان بار وابسته می‌باشد از الگوریتم PSO استفاده شده و سپس یک سیستم فازی TSK با استفاده از این ضرایب بهینه ساخته شد. شبیه-سازی‌هایی برای آزمایش حلقه کنترل اینرسی با استفاده از سیستم فازی TSK تحت شرایط مختلف انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها به خوبی کارایی و توانایی سیستم فازی TSK ساخته شده در تعیین مقدار مناسب ضریب اشتراک‌گذاری اینرسی را نشان می‌دهد.

ضمیمه الف:

پارامتر های سیستم قدرت

Area 1	*Area 2*
K_{p1}=120	K_{p2}= 120
T_{p1}= 20	T_{p2}= 25
T_{t1}= 0.2	T_{t2}= 0.3
T_{g1}= 0.06	T_{g2}= 0.08
R_1= 2.4	R_2= 2.5
B_1= 0.425	B_2= 0.425
T_{tie}= 0.04	

ضمیمه ب:

پارامتر های توربین باد

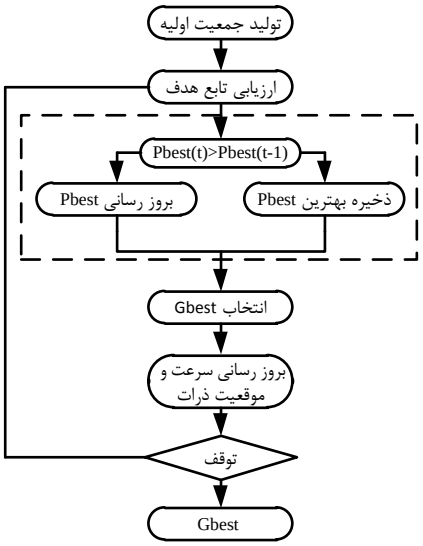
$1/2\,\rho A_r = 0.00159$	$K_b = 56.6$
$K_{pp} = 150$	$T_p(\text{second}) = 0.01$
$K_{pc} = 3.0$	$T_{pc} = 0.05$
$K_{ic} = 30.0$	$K_{ptrq} = 3.0$
$K_{itrq} = 0.6$	$K_{ip} = 25$

ضرایب ماتریس c_p

α_{00} = – 4:1909e – 1	α_{01} = 2:1808e – 1	α_{02} = – 1:2406e – 2	α_{03} = – 1:3365e – 4	α_{04} = 1:1524e – 5
α_{10} = – 6:7606e – 2	α_{11} = 6:0405e – 2	α_{12} = – 1:3934e – 2	α_{13} = 1:0683e – 3	α_{14} = – 2:3895e – 5
α_{20} = 1:5727e – 2	α_{21} = – 1:0996e – 2	α_{22} = 2:1495e – 3	α_{23} = – 1:4855e – 4	α_{24} = 2:7937e – 6
α_{30} = – 8:6018e – 4	α_{31} = 5:7051e – 4	α_{32} = – 1:0479e – 4	α_{33} = 5:9924e – 6	α_{34} = – 8:9194e – 8
α_{40} = 1:4787e – 5	α_{41} = – 9:4839e – 6	α_{42} = 1:6167e – 6	α_{43} = – 7:1535e – 8	α_{44} = 4:9686e – 10

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]

ضمیمه پ :



شکل(۱۵): فرآیند کاری الگوریتم PSO

ضمیمه ج:

پارامترهای بکار گرفته‌شده در خوشه‌بندی تفاضلی

Range of influence	1
Squash factor	2
Accept ratio	0.5
Reject ratio	0.15

مراجع

[1] Kunder, P., *Power system stability and control*, USA: McGraw-Hill, 1994.

[2] Ekanayake, J., Jenkins, N., "*Comparison of the response of doublyfed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency*", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 19. No. 4, pp.800–802, 2004.

[3] Lalor, G., Mullane, A., O'Malley, M., "*Frequency control and wind turbine technologies*", IEEE Trans. Power System, Vol. 20, No. 4, pp. 1905–1913, 2005.

[4] Gautam D., Goel L., Ayyanar R., Vittal V., Harbour, T. "*Control Strategy to Mitigate the Impact of Reduced Inertia Due to Doubly Fed Induction Generators on Large Power Systems*", IEEE Trans. Power Sys., Vol. 26, No. 1, pp. 214–224, 2011.

[5] Tarnowski, G. C., Kjar, P. C., Sorensen, P. E., Ostergaard, J., "*Variable speed wind turbines capability for emporary over-production*", IEEE Conf. Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–7, 2009.

[6] Morren, J., Haan, S. W. H., Kling, W. L., Ferreira, J. A., "*Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control*", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 21, No. 1, pp. 433–434, 2006.

[7] Mauricio, J. M., Marano, A., Exposito, A. G., Martinez Ramos, J. L., "*Frequency regulation contribution through variable-speed wind energy conversion systems*", IEEE Trans Power Sys. Vol. 24, No. 1, pp.173–180, 2009.

[8] Almeida, R. G., Lopes, J. A. P., "*Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation*", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No. 3, pp. 944–950, 2007.

[9] Ramtharan, G., Ekanayake, J. B., Jenkins, N., "*Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines*", IET Renew. Power Gen., Vol. 1, No. 1, pp. 3–9, 2007.

[10] Takagi, T., Sugeno, M., "*Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*", IEEE Trans. Systems Man Cybernet., Vol. 15, pp. 116–132, 1985.

[11] Qi, R., Brdys, M. A., "*Stable indirect adaptive control based on discrete-time T–S fuzzy model*", Fuzzy Sets and Sys., Vol. 159, pp. 900–925, 2008.

[12] Guillaume, S., "*Designing fuzzy inference systems from data: An interpretability-oriented review*", IEEE Trans. Fuz. Sys., Vol. 9, No.3, pp. 426–443, 2001.

[13] Hung C., Huang, L., "*Extracting Rules from Optimal Clusters of Self-Organizing Maps*", Int. Conf. on Computer Modeling and Simulation, Vol. 1, pp. 382–386, 2010.

[14] Setnes, M., "*Supervised fuzzy clustering for rule extraction*", IEEE Trans. Fuz. Sys., Vol. 8, No. 4, pp. 416–424, 2000.

[15] Priyono, A., Ridwan, M., Alias, A. J., Rahmat, R. A., Hassan, A., Mohd Ali, M. A., "*Generation of fuzzy rules with subtractive clustering*", Jurnal Teknologi, Vol. 43, No.1, pp. 143–153, 2012.

[16] Miller, N. W., Sanchez–Gasca, J. J., Price, W. W., Delmerico, R. W., "*Dynamic modeling of GE1.5 and 3.6 MW wind turbine-generators for stability simulations*", in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, pp. 1977–1983, 2003.

[17] Miller, N. W., Price, W. W., Sanchez–Gasca, J. J., "*Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators*", *GE—Power System Energy Consulting*, Tech. Rep. version 3.0, 2003.

[18] Miller, N. W., Price, W. W., Sanchez-Gasca, J. J., "*Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators*", *GE—Power System Energy Consulting*, Tech. Rep. version 4.2, 2008.

[19] Miller, N. W., Price, W. W., Sanchez–Gasca, J. J., "*Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators*," *GE—Power System Energy Consulting*, Tech. Rep. version 4.5, 2010.

[20] Ullah, N. R., *Wind Power–Added Value for Network Operation*, PhD Thesis, Chalmers University of Technology Gotenborg, pp.1–211, 2008.

[21] Ullah, N. R., Thiringer, T., Karlsson, D., "*Temporary Primary Frequency Control Support by Variable Speed Wind Turbines Potential and Applications*", IEEE Trans. Power Sys., Vol. 23, No. 2, 2008.

[22] Gautam, D., Goel, L., Ayyanar, R., Vittal, V., Harbour, T., "*Control strategy to mitigate the impact of reduced inertia due to doubly fed induction generators on large power systems*" IEEE Trans. Power Syst., Vol. 26, No.1, pp. 214–24, 2011.

[23] Bhatt, P., Roy, R., Ghoshal, S. P., "*Dynamic participation of doubly fed induction generator in automatic generation control*", Renewable Energy, Vol. 36, pp. 1203–1213, 2011.

[24] Kennedy, J., Eberhart, R. C., *Swarm Intelligence*, USA: Academic Press, 2001.

[25] Wang, Y., Li, B., Weise, T., Wang, J., Yuan, B., Tian, Q., "*Self-adaptive learning based particle swarm optimization*", Information Sciences, Vol. 181, No. 20, pp. 4515–4538, 2011.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

[26] Moravej, Z., Jazaeri, M., Gholamzadeh, M., "*Optimal coordination of distance and over-current relays in series compensated systems based on MAPSO*", Energy conversion and management, Vol. 56, pp. 140–151, 2012.

[27] Buckley, J. J., "*Sugeno type controllers are universal controllers*", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 53, No. 3, pp. 299–303, 1993.

[28] Xin, W. L., *A Course in Fuzzy Systems and Control.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.

[29] Linkens, D. A., Chen, M. Y., "*Input selection and partition validation for fuzzy modeling using neural network*," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 107, pp. 299–308, 1999.

[30] Hullermeier, E., "*Fuzzy methods in machine learning and data mining: Status and prospects*", Fuzzy sets and Sys., Vol. 156, pp. 387–406, 2005.

[31] Guillaume, S., Charnomordic, B., "*Fuzzy inference systems: An integrated modeling environment for collaboration between expert knowledge and data using FisPro*", Expert Systems with Applications, Vol. 39, pp. 8744–8755, 2012.

[32] Linkens, D. A., Chen, M. Y., "*Input selection and partition validation for fuzzy modeling using neural network*", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 107, pp. 299–308, 1999.

[33] Fang, Z., Song, N., Wang, L., "*Design and Implementation of a Novel Fuzzy Controller with DSP for Rotary Inverted Pendulum*," IEEE Int. Conf. on Control and Decision, pp. 6122–6127, 2009.

[34] Chiu, S. "*Extracting fuzzy rules from data for function approximation and pattern classification*", Fuzzy Information Engineering: A Guided Tour of Application. D. Dubois, H. Prade and R. Yager(eds), John Wiley Sons, 1997.

[35] Ghassem Zadeh S., Hosseini S. H., and Gharehpetian G. B., "Modeling of Wind Energy Conversion System Including DFIG for Distributed Generation Studies" Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 7, no. 2, pp. 51-64, Fall and Winter 2010.

[36] M.Hozouri, A.Abaspour, M.Fotuhi-Firuzabad M.Moeini-Aghtaie, "Minimizing the wind power curtailment using a short term generation redispatch method" Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 13, no.1, spring 2016

زیرنویس‌ها

[1] Doubly Fed Induction Generator
[2] Maximum power point tracking

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.9.7]