مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۶، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۱، صفحه ۶۰-۵۱

روشی جدید برای استحصال توان بهینه از توربین های بادی: مدل زمانی- مکانی برای مزرعه بادی با استراتژی نروفازی

سید وهاب شجاع الدینی[۱]، آرمین پارسیان نژاد[۲]، مجتبی فرزانه[۳]

[۱] استادیار مهندسی برق، پژوهشکده برق و کامپیوتر، سازمان پژوهش های علمی وصنعتی ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، دانشگاه حکیم سبزواری

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشگاه حکیم سبزواری

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۱/۸/۱، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۱/۹/۲۰)

چکیده: در این مقاله روشی جدید برای حصول بهینه برق از توربین های مزارع برق بادی ارایه می شود. در روش پیشنهادی با استفاده از تلفیق سابقه زمانی پارامترهای باد با اطلاعات مکانی آن، مدلی مبتنی بر استنتاج فازی برای مزرعه بادی تشکیل شده و به روز می شود. با استفاده از مدل فوق، می توان پارامترهای باد دریافت شده توسط هر توربین در مزرعه بادی را به دست آورد. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، دو نوع متداول از شرایط وزشی باد با تغییرات کند و تند شبیه‌سازی می شود. نتایج حاکی از آن هستند که روش پیشنهادی می تواند در حالت وزش باد با تغییرات کند خطای تخمین باد و میزان یکنواختی برق حاصله را به ترتیب ۵/۳ درصد و ۰/۵۲ ولت نسبت به روش های موجود بهبود بخشد. این بهبودها در شرایط وزش باد تند به ترتیب۱۷/۱ درصد و ۱۲/۷ ولت به دست می آیند. بر این اساس ملاحظه می شود که مدل پیشنهادی این مقاله خصوصاً در شرایط وزش بادهای با توربولانس بالا می‌تواند پارامترهای تنظیم دقیق تری برای توربین ها به دست آورده و در نتیجه برق یکنواخت تری را به شبکه تزریق نماید.

کلمات کلیدی: مزرعه برق بادی، تخمین، توان بهینه، مدلسازی فازی، آنتروپی.

A Novel Method for Optimum Electrical Energy Harvesting from Wind Turbines: A Space-Time Model for Wind Farm by Neuro-Fuzzy Strategy

Seyed Vahab Shojaedini, Armin Parsian'nejad, Mojtaba Farzaneh

Abstract - In this paper, a novel method is introduced for optimum energy harvest from wind farms. In the proposed method, wind farm is modeled by fuzzy-logic and the model is updated using a combination of wind parameters history and wind's spatial information. Utilizing this model, the parameters for the wind blowing through each turbine in the wind farm is estimated. To evaluate the performance of the proposed method two practical wind types are simulated. In the first scenario, the wind maintains low turbulence and its parameters change slowly while in the second scenario the wind demonstrates high turbulences and its parameters undergo sudden shifts. Simulation results for the proposed method are obtained in both scenarios. For the first scenario, the comparison reveals that the proposed method improves the accuracy of wind speed estimation and the monotonousness of the obtained electrical voltage by 5.3% and 0.52 volts respectively compared to existing methods. These improvements reach 17.1% and 12.7 volts in the presence of high turbulence winds in the second scenario. Based on these corroborating simulations, it is concluded that the proposed method provides a more accurate estimate of wind parameters for the wind blowing through the wind farm.

Keywords: Wind Farm, Estimation of Wind Parameters, Optimum Electrical Energy, Fuzzy Modeling, Entropy.

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر، توجه کشورهای صنعتی و در چند سال گذشته، کشورهای توسعه یافته به انرژی‌های نو بیش از پیش متمرکز شده است[۱] . یکی از منابع انرژی در طبیعت، باد است که انرژی نهفته در آن، حدوداً ۱۵ برابر کل انرژی فسیلی موجود در دنیا است[۲]. امروزه برای دریافت انرژی باد و تبدیل آن به برق، از مزارع بزرگ شامل توربین‌های بادی متعدد استفاده می‌شود[۳]. یکی از ویژگی‌های مهم این شیوه از تولید برق، وابستگی شدید آن به سرعت و جهت وزش باد به عنوان عامل تولید انرژی می‌باشد[۴].

توربین‌های بادی بخاطر رفتار هیجانی باد (شامل تغییر مداوم سرعت و جهت وزش باد و وجود گردبادهای بادی مختلف در یک مزرعه بادی) ، ولتاژ ثابتی را در طی مدت عملکرد خود به دست نمی‌دهند. این مشکل زمانی تشدید می شود که باد وزشی به مزرعه از نوع باد با توربولانس بالا باشد. در چنین شرایطی نیروگاه‌های بادی کیفیت شبکه توزیع رادچار افت کرده و مشکلات متعددی برای واحدهای دیسپچینگ بوجود می آورند[۶-۵].

داشتن یک تخمین درست از سرعت و جهت وزش باد برای توربین های مزرعه بادی اولاً باعث می‌شود که پارامترهای ژنراتورهای مولد برق چنان متناسب با سرعت و جهت وزش باد تنظیم شوند که همواره برق یکنواختی را به شبکه مصرف تزریق نمایند[۷]، ثانیاً باعث استحصال برق با حداکثر توان ممکن از باد وزیده شده می گردد[۹-۸] و ثالثا با اصلاح زاویه آئرودینامیکی پره‌ها و زاویه‌ی ناسل باعث ایجاد کمترین تنش مکانیکی بر روی ناسل، برج، جعبه‌دنده و پره‌ها شده و بدین ترتیب باعث افزایش عمر مفید توربین می گردد[۱۱-۱۰]. در سالیان اخیر برای داشتن چنین تخمین مناسبی تحقیقات بسیاری انجام و روش‌های مختلفی ارایه شده اند.

روش‌های پیش بینی باد وزشی با استفاده از اجرای تکنیک‌های مختلف آماری از قبیل حداقل سازی میانگین مجذور خطا بر روی دادگان مربوط به سرعت و جهت وزش باد در بازه‌های زمانی طولانی تلاش می کنند تا تخمینی از این پارامترها را برای هر لحظه از زمان ارایه دهند. متاسفانه به دلیل آن که پارامترهای باد را معمولاً نمی توان در بازه زمانی بزرگ یکنواخت فرض نمود، روش‌های مزبور در عمل توانایی پیش بینی دقیق پارامترهای فوق را از خود نشان نداده‌اند[۱۲]. در گونه پیشرفته‌تری از روش‌ها، از برازش مدل‌های تصادفی مانند فیلتر میان‌گیرخودبازگشتی بر روی دادگان سرعت و جهت وزش باد دریافتی توسط هر توربین استفاده می‌شود[۱۳]. علاوه بر تعیین درجه فیلتر که

یکی از مسائل چالش برانگیز در این روش‌ها می‌باشد، ماهیت غیرایستان پارامترهای باد عامل دیگری است که باعث عدم حصول فیلتر مناسب برای مدلسازی سرعت و جهت وزش باد دریافتی توسط هر توربین می گردد[۱۴].

در دسته ای از روش‌ها، از فیلترینگ کالمن به منظور تخمین سرعت و جهت وزش باد دریافتی توربین ها استفاده می‌شود. در این روش‌ها ابتدا دادگان مربوط به سرعت و جهت وزش باد دریافتی توسط هر توربین در مجموعه‌ای از لحظات متوالی جمع آوری شده و سپس به عنوان ورودی یک فیلتر کالمن استفاده می‌شود. فیلتر مزبور سرعت و جهت وزش باد دریافتی توسط توربین ها را در لحظات آتی پیش‌بینی می‌نماید[۱۵]. محدودیت اصلی این دسته از روش‌ها آن است که به دلیل غیرخطی و غیر گوسی بودن نحوه تغییرات وزش باد، عمدتاً فیلتر کالمن در بسیاری از لحظات نمی‌تواند پیش‌بینی دقیقی از سرعت و جهت باد دریافتی هر توربین ارایه دهدو بدین ترتیب اهداف سه گانه‌ای که پیشتر ذکر شدند، در این روش‌ها به شکل مطلوبی حاصل نمی‌شوند[۱۶].

در برخی از تحقیقات از روش‌هایی مانند داده کاوی و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز به منظور تخمین پارامترهای مزبور استفاده شده است که با محدودیت‌هایی نظیر حجم بالای دادگان آموزشی، حساسیت شدید به ساختار شبکه عصبی و همچنین مشکلات همگرایی روبه‌رو بوده‌اند[۱۷]. علاوه بر محدودیت‌هایی که به طور جداگانه برای هر دسته از روش‌های تخمین پارامترهای باد دریافتی توسط هر توربین برشمردیم، باید توجه داشت که در این روش‌ها تخمین پارامترهای باد دریافتی توسط یک توربین، فقط بر اساس سابقه زمانی اندازه گیری حسگرموجود روی آن انجام می گیرد. چنین اتکایی به سابقه زمانی اندازه‌گیری‌ها به همراه تاخیرناشی از سخت‌افزار و موتورهای کنترل زاویه یاو در تنظیم پارامترهای ژنراتورهای مولد برق، باعث می‌شوند که عملاً پارامترهای ژنراتورهای مولد برق در هر لحظه نسبت به سرعت و جهت وزش باد همان لحظه دارای خطای قابل توجهی باشند. این خطا خصوصاً در شرایط وزش بادهای با توربولانس بالا که در آنها پارامترهای باد تغییرات بیشتری دارند، شدیداً افزایش می‌یابد. بدین ترتیب تحقیقات متعددی نشان داده اند که در بسیاری از موارد استفاده از روش‌های تخمین پارامترهای باد مبتنی بر سابقه زمانی اندازه گیری ها، پارامترهای بهینه را برای ژنراتورهای مولد برق را به دست نداده و لذا در حصول سه هدفی که در ابتدا ذکر شدند، دارای محدودیت هستند[۱۸].

در این مقاله یک روش جدید به منظور تخمین پارامترهای باد دریافتی توسط هر توربین و تنظیم بهینه توربین بر اساس این پارامترها در مزارع تولید برق بادی ارائه می‌شود که بر تلفیق رشته مشاهدات زمانی با اندازه‌گیری مکانی سرعت و جهت باد استوار است. در روش پیشنهادی برای کل مزرعه یک مدل مبتنی بر منطق فازی تشکیل داده می‌شود. در این مدل علاوه بر سرعت و جهت باد دریافتی توسط توربین‌ها در لحظات متوالی، سرعت و جهت باد دریافتی توسط حسگرهایی که در اطراف مزرعه و قبل از توربین‌ها به موازات مسیر آن‌ها قرار داده شده‌اند، نیز دخالت داده می شوند. برای تشکیل مدل فوق از خوشه بندی توربین

Archive of SID
www.SID.ir

های مزرعه با استفاده از تابع آنتروپی فازی استفاده می شود که علاوه بر به روز شدن در بازه‌های زمانی متوالی، با تغییرات پارامترهای باد نیز سازگاری بیشتری داشته باشد. بدین ترتیب تخمینی که این مدل برای هر توربین به دست می‌دهد، علاوه بر سابقه زمانی مشاهدات توربین مزبور، بر سرعت و جهت بادی که به زودی به آن خواهد رسید نیز متکی می‌باشد. بر اساس چنین تلفیق فازی از ویژگی های زمانی- مکانی باد وزیده شده می‌توان پارامترهای تنظیم دقیق تری برای هر توربین نسبت به روش‌های موجود خصوصاً در شرایط وزش بادهای با توربولانس بالا که پارامترهای باد وضعیت متغیرتری دارند، به دست آورد. بدین ترتیب ولتاژ خروجی با استفاده از تنظیماتی از توربین بادی به دست می آید که نسبت به باد وزیده شده به آن دارای تطابق بیشتری هستند. بدین ترتیب خروجی‌های واقعی کاملاً متاثر از این پیش بینی بوده و برق با کیفیت تری از مزرعه بادی به دست می آید.

ساختار مقاله به صورت زیر است. در بخش ۲، اصول ریاضی و روش تشکیل مدل زمانی- مکانی مزرعه بادی مبتنی بر منطق فازی به منظور تخمین پارامترهای باد وزیده شده به توربین ها شرح داده می‌شود. در بخش۳، عملکرد روش پیشنهادی این مقاله آزموده می‌شود. برای این کار شبیه سازی در شرایط مختلف وزش باد انجام شده و نتایج عملکرد روش پیشنهادی در تخمین پارامترهای باد رسیده به هر توربین و کیفیت برق استحصالی از آن به دست می آید. در بخش۴، نتایج به دست آمده از شبیه سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفته و کارایی روش پیشنهادی با کارایی روش‌های موجود از جهات مختلف مقایسه می‌شود. بخش پایانی مقاله نیز به نتیجه گیری اختصاص دارد.

۲- روش پیشنهادی

فرض کنید که مطابق آنچه در شکل (۱) نشان داده شده است، در مزرعه بادی N توربین بادی هم سطح، فعال هستند که موقعیت های آنها در مختصات قطبی با رابطه (۱) توصیف می گردد:

$$X_i = [r_i, \theta_i]^T,\ i = 1,2,...,N \qquad (۱)$$

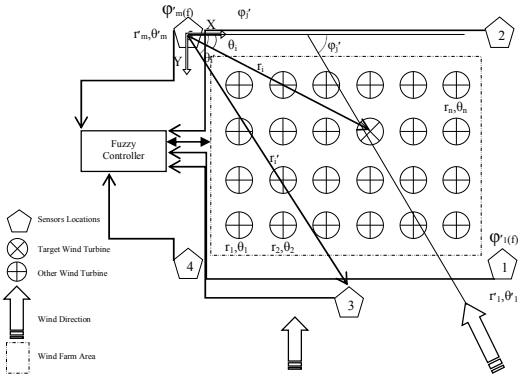
در رابطه فوق X_i نشان دهنده بردار موقعیت توربین i می باشد. مطابق همین شکل تعداد M حسگر مکانی نیز در موقعیت های بیان شده با رابطه (۲) مستقر هستند.

$$X'_i = [r'_i, \theta'_i]^T,\ i = 1,2,...,M \qquad (۲)$$

این حسگرها در هر لحظه یک بردار اندازه گیری $\omega'_j(t')$ را به صورت رابطه (۳) به دست می دهند.

$$\omega'_j(t') = [v'_j(t'), \phi'_j(t')]^T \qquad (۳)$$
$$j = 1,2,...,M,\quad 0 \le t' \le t$$

که اعضای $\omega'_j(t')$ سرعت و جهت باد اندازه‌گیری شده توسط حسگر جانبی j در زمان t' هستند.



شکل ۱: جانمایی توربین ها و حسگرها در مزرعه بادی

میزان انرژی بادی که در هر مقطع زمانی به یک توربین می رسد تابعی است از جهت و سرعت باد رسیده به آن توربین در مقطع مزبور. با در نظر گرفتن $\Delta\phi'_{ij}(t)$ به عنوان اختلاف سمت توربین i ام و جهت وزش باد دریافتی توسط هر یک از حسگرهای مکانی پیشگفته و $\Delta v'_{ij}(t)$ به عنوان اختلاف سرعت آنها، بردار L بعدی $f_i(t)$ برای این توربین به صورت رابطه (۴) تعریف می گردد:

$$f_i(t) = [r_i, \Delta\phi'_{i1}(t)...\Delta\phi'_{ij}(t)...\Delta\phi'_{iM}(t),$$
$$\Delta v'_{i1}(t)...\Delta v'_{ij}(t)...\Delta v'_{iM}(t)] \qquad (۴)$$
$$i = 1,2,...,N,\ j = 1,2,...,M,\ 0 \le t \le T_0$$

بدین ترتیب در مقطع زمانی t یک فضای برداری $F(t)$ به صورت رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$F(t) = \{f_1(t), f_2(t),..., f_k(t),..., f_N(t) \mid f_k(t) \in R^L\} \qquad (۵)$$

با توجه به امکان تغییر پارامترهای باد در فواصل زمانی مختلف، فضای برداری $F(t)$ طی این بازه های زمانی، به خوشه هایی افراز می شود که ویژگی های باد دریافتی توربین های هر خوشه شبیه به هم بوده و با سایر خوشه ها دارای بیشینه تفاوت باشند. بر این اساس در یک مقطع زمانی مانند t، توربین ها براساس ویژگی های موثر در دریافت آنها که فضای $F(t)$ را تشکیل می‌دهند با منطق فازی خوشه بندی می شوند. اگر خوشه ها را مجموعه های فازی در نظر بگیریم، تابع آنتروپی فازی $E(t)$ را می توان برای کل مزرعه بادی به فرم رابطه (۶) تعریف کرد. این تابع عدم قطعیت در این موضوع که آیا توربین k که با بردار ویژگی $f_k(t)$ در فضای $F(t)$ معرفی می شود، به یک خوشه خاص تعلق دارد یا خیر را بیان کرده و می تواند مقادیری بین صفر تا $\frac{1}{N}$ را اختیار کند[۱۹].

Archive of SID
www.SID.ir

$$E(t) = \sum_{q=1}^{Q(t)} \sum_{k=1}^{N} p_{qk}(t).\log p_{qk}(t) \quad (۶)$$

در رابطه فوق $Q(t)$ تعداد خوشه های مزرعه بادی در مقطع زمانی t است و امکان تعلق هر عضو فضای $F(t)$ به خوشه ها نیز به صورت $p_{qk}(t)$ نشان داده شده که مطابق رابطه (۷) عضوی از ماتریس احتمال تعلق $P(t)$ است:

$$P(t) = \begin{bmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) \ldots & p_{1k}(t) \ldots & p_{1N}(t) \\ p_{21}(t) & p_{22}(t) \ldots & p_{2k}(t) \ldots & p_{2N}(t) \\ \vdots & & & \\ p_{q1}(t) & p_{q2}(t) \ldots & p_{qk}(t) \ldots & p_{qN}(t) \\ \vdots & & & \\ p_{Q(t)1}(t) & p_{Q(t)2}(t) \ldots & p_{Q(t)k}(t) \ldots & p_{Q(t)N}(t) \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که $1 < q < Q(t)$ و $1 < k < N$ هستند. اکنون تابع هدف فازی مبتنی بر ترکیب فاصله یابی و آنتروپی فازی به فرم رابطه (۸)تعریف می شود:

$$G(P(t), \mu(t), F(t)) = \sum_{q=1}^{Q(t)} \sum_{k=1}^{N} p_{qk}(t).\left\| f_k(t) - \mu_q(t) \right\|^2 + N.\sum_{q=1}^{Q(t)} \sum_{k=1}^{N} p_{qk}(t).\log p_{qk}(t) \quad (۸)$$

که $\mu_q(t)$ مرکز خوشه q و $\mu(t)$ بردار شامل مراکز خوشه ها در مقطع زمانی t هستند. جمله اول رابطه فوق، میانگین فواصل با وزندهی فازی بوده و جمله دوم نیز ضریب $N-$ از تابع آنتروپی فازی $E(t)$ است.

با می‌نیمم کردن تابع هدف تعیین شده برای این روش خواهیم داشت[۲۰]:

$$p_{qk}(t) = \left(\sum_{q'=1}^{Q(t)} \left[\frac{e^{\left\| f_k(t) - \mu_q(t) \right\|}}{e^{\left\| f_k(t) - \mu_{q'}(t) \right\|}} \right]^{1/Q(t)} \right)^{-1} \quad (۹)$$

اکنون می توان متوسط پراکندگی خوشه ها را به صورت رابطه(۱۰) بیان نمود:

$$S(Q(t)) = \frac{\sum_{q=1}^{Q(t)} \left\| \sigma_{\mu_q}(t) \right\|}{Q(t) \left\| \sigma_F(t) \right\|} \quad (۱۰)$$

که در رابطه اخیر، اعضای $\sigma_{\mu_q}(t)$ مطابق رابطه (۱۱) به دست می‌آیند:

$$\sigma^l_{\mu_q}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} p_{qk}(f^l_k(t) - \mu^l_q(t))^2 \quad (۱۱)$$

که در آن $\mu^l_q(t)$ عبارتست از l امین عضو بردار میانگین خوشه q در مقطع زمانی t و $1 < l < L$ که:

$$L = length(f_k(t)) \ , \ k = 1,2,...,N \quad (۱۲)$$

همچنین پارامتر $\sigma_F(t)$ وریانس فضای $F(t)$ بوده و $\left\| \sigma_F(t) \right\|$ به صورت رابطه (۱۳) به دست می آید:

$$\left\| \sigma_F(t) \right\| = (\sigma^T_F(t).\sigma_F(t))^{1/2} \quad (۱۳)$$

اکنون برای فضای برداری $F(t)$ که به خوشه های $1 < q < Q(t)$ افراز شده است، تابع فاصله را به صورت (۱۴) حاصل می کنیم:

$$D(Q(t)) = \frac{D_{\max}(t)}{D_{\min}(t)} \sum_{q=1}^{Q(t)} (\sum_{q'=1}^{Q(t)} \left\| \mu_q(t) - \mu_{q'}(t) \right\|)^{-1} \quad (۱۴)$$

که $D_{\max}(t)$ و $D_{\min}(t)$ با (۱۵) به دست می آیند:

$$D_{\max}(t) = \max(\left\| \mu_q(t) - \mu_{q'}(t) \right\|)$$
$$D_{\min}(t) = \min(\left\| \mu_q(t) - \mu_{q'}(t) \right\|) \quad (۱۵)$$
$$\forall q, q' \in \{1,2,3,....,Q(t)\}$$

برای تشکیل یا حفظ بهترین خوشه های توربینی در هر مقطع زمانی به گونه ای که دارای بیشینه فشردگی[1] در هر خوشه و بیشینه جدایی[2] بین خوشه ها باشند، از ترکیب دو معیار معرفی شده در روابط (۱۰) و(۱۴)استفاده شده و تابع تصمیم $\Lambda(Q(t))$ مطابق رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$\Lambda(Q(t)) = \beta.S(Q(t)) + D(Q(t)) \quad (۱۶)$$

در رابطه فوق β ضریب تنظیمی است که می تواند وزن هر یک معیارهای فشردگی و جدایی را در تابع تصمیم مشخص نماید. بر این اساس $Q(t)$ مطابق رابطه (۱۷) مشخص می شود:

$$\xi(t) = \left[\Lambda(Q_{\min}(t)),...,\Lambda(Q'(t)),...,\Lambda(Q_{\max}(t))\right]$$
$$Q(t) = Q'(t) \mid \Lambda(Q'(t)) = \min(\xi(t)) \quad (۱۷)$$

بنابر محاسبات فوق، توربین های مزرعه بادی در مقطع زمانی t به $Q(t)$ خوشه فازی افراز می‌شوند که به صورت مجموعه (۱۸) نشان داده می شوند:

[1] Compactness
[2] Separation

Archive of SID
www.SID.ir

$$C(t)=\{c_1(t),c_2(t),...,c_q(t),...,c_{Q(t)}(t)\} \quad (۱۸)$$

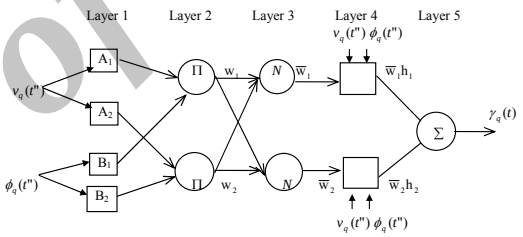
که $c_q(t)$ عبارتست از q امین خوشه توربینی دارای $I_q(t)$ توربین عضو آن که در این مقطع زمانی حاصل شده است. اعضای این افراز از $F(t)$ با رابطه (۱۹) نشان داده می شوند:

$$F_q^{'}(t)=\left\{f_{q1}^{'}(t),...,\ f_{qi}^{'}(t),...,\ f_{qI}^{'}(t)\right\}$$
$$f_{qi}^{'}(t)=\ f_k(t)\in F(t)\mid\ f_k(t)\in c_q(t) \quad (۱۹)$$

اکنون می توان مدل نروفازی مربوط به $c_q(t)$ را به ترتیبی که در ادامه می آید، به گونه ای به روز نمود تا بهترین تخمین از زاویه ناسل $\gamma_q(t)$ (عمود بر جهت تخمین زده شده برای باد) به دست آید.

بر اساس مدل تاکاگی- سوگنو[۲۱] که در شکل (۲) نشان داده شده است، با داشتن رشته مشاهدات سرعت و جهت باد درزمانهای متوالی t'' قوانین حاکم بر ساختار فوق عبارتند از:

$$If\ v_q(t'')\ is\ A_1\ and\ \phi_q(t'')\ is\ B_1 \Rightarrow h_1=\lambda_1 x+\psi_1 y+\tau_1$$
$$If\ v_q(t'')\ is\ A_2\ and\ \phi_q(t'')\ is\ B_2 \Rightarrow h_2=\lambda_2 x+\psi_2 y+\tau_2 \quad (۲۰)$$



شکل ۲: مدل نروفازی هر خوشه از مزرعه بادی

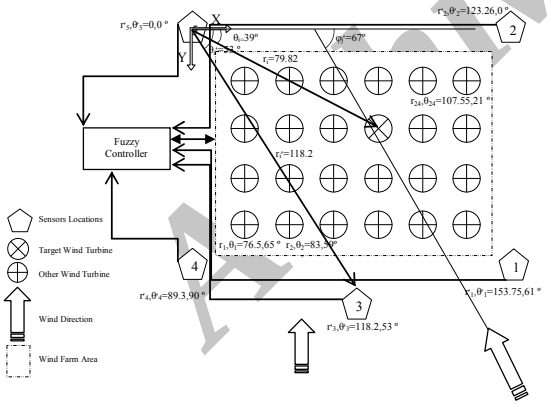
که A_1، A_2، B_1 و B_2 قواعد فازی حاکم بر مدل فازی فوق هستند. ژانگ نشان داد[۲۲] که در ساختار نروفازی فوق می توان با به دست آوردن خروجی هر لایه و ارایه آن به لایه مابعد، خروجی نهایی را برای لحظه آتی t از روی رشته مشاهدات لحظات متوالی t'' به فرم رابطه (۲۱) حاصل نمود:

$$\gamma_q(t)=\overline{w_1}v_q(t'')\lambda_1+\overline{w_1}\phi_q(t'')\psi_1+\overline{w_1}\tau_1+$$
$$\overline{w_2}v_q(t'')\lambda_2+\overline{w_2}\phi_q(t'')\psi_2+\overline{w_2}\tau_2 \quad (۹)$$

در رابطه اخیر، پارامترهای نروفازی به دو دسته پیش فرض و پارامترهای مربوط به توابع عضویت فازی تقسیم می شوند که دسته اول شامل $O_1=(\lambda_1,\lambda_2,\psi_1,\psi_2,\tau_1,\tau_2)$ بوده و ماهیت خطی دارند و دسته دوم $O_2=(\overline{w_1},\overline{w_2})$ پارامترهای قوانین فازی بوده و دارای ماهیت غیرخطی هستند. برای تخمین این پارامترها مطابق الگوریتم یادگیری هایبریدی ارایه شده توسط سان و همکارانش[۲۳] پارامترهای O_1 با استفاده از روش کمینه مربعات خطا و پارامترهای O_2 نیز توسط روش تندترین شیب تخمین زده می شوند.

۳- آزمون

به منظور آزمودن کارایی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی برای یک مزرعه بادی شامل ۲۴ عدد توربین (N)انجام پذیرفت. در این شبیه‌سازی جانمایی حسگرهای مزرعه را با فواصل و ترتیب مساوی حسگرها در نظر گرفتیم (کلی ترین حالت ممکن) که با این توپولوژی تعدادی مختلفی از سنسورهای متساوی الفاصله آزموده شدند که عدد ۵ (M) به عنوان تعداد بهینه حاصل و اعمال شد. جانمایی مزرعه بادی به همراه حسگرها و توربین‌های شبیه‌سازی شده در شکل(۳) نشان داده شده است. در ادامه، سناریوهای مختلفی از وزش باد تولید گردیدند. شبیه‌سازی این سناریوها به کمک نرم‌افزار استانداردWind-Pro انجام شد که در بسیاری از تحقیقات معتبر مربوط به توربین‌های بادی به نتایج این نرم‌افزار استناد گردیده است[۲۴]. برای تطابق شبیه‌سازی‌ها با آنچه در عمل رخ می‌دهد، دادگان در دو سناریوی مختلف تولید گردیدند. اولین سناریو، به شرایطی تعلق داشت که سرعت باد دارای تغییرات کمتری است (باد نجیب با سرعت بین۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه وتوربولانس پایین ۲۰٪) و نوع دوم آزمون‌ها به شرایطی می‌پرداخت که سرعت باد در آن دارای تغییرات شدیدی محسوب می‌شود (باد مغتشش با سرعت بین ۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه و توربولانس بالای ۷۰٪). جدول(۱) مشخصات توربین ها و ژنراتورها را در فرآیند آزمون این تحقیق نشان می‌دهد.



شکل ۳: ساختار مکانی مزرعه بادی در شبیه سازی ها

پس از شبیه‌سازی مزرعه بادی در سناریوهای فوق، روش پیشنهادی این مقاله با استفاده از بسته نرم‌افزاری Matlab2009 پیاده‌سازی و آزموده شد. به منظور ارزیابی بهتر روش پیشنهادی این مقاله، یکی از روش‌های جدید که بر اساس کنترل توربین بادی برای حصول بیشترین انرژی برپایه شبکه‌های عصبی[۲۵] عمل می کند نیز پیاده سازی شد.

[3]. **M**aximum **W**ind **E**nergy **C**apture

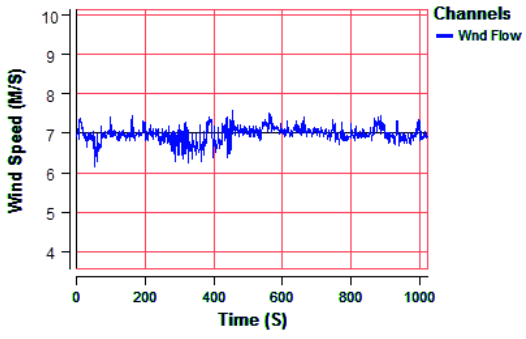
Archive of SID
www.SID.ir

در ادامه این مقاله روش فوق را به اختصار MWEC می‌نامیم. در تمام آزمون های این مقاله، روش فوق به موازات روش پیشنهادی بر روی نتایج شبیه سازی Wind-Pro آزمایش شد. سرانجام نتایج هر دو روش با سناریوی اصلی شبیه‌سازی مقایسه و شاخص های عملکرد هر یک حاصل گردید.

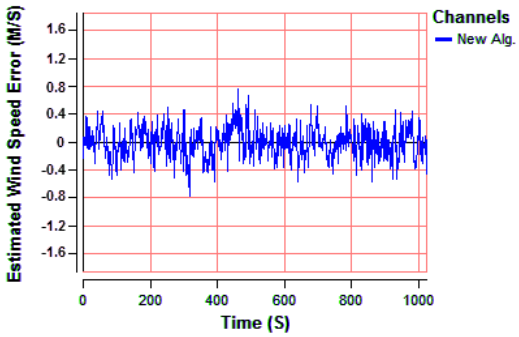
جدول ۱: مشخصات شبیه‌سازی شامل مشخصات مزرعه بادی، توربین ها، باد و پارامترهای ژنراتور

ردیف	ویژگی	مقدار
۱	تعداد توربین	۲۴
۲	نوع ژنراتور	DFIG
۳	تغییرات سرعت باد (m/s)	۲۵-۳ ، ۴۰-۰
۴	مقاومت استاتور(P.u)	۰/۰۱
۵	ثابت اینرسی روتور(P.u)	۳
۶	میزان تغییرزاویه گام (درجه)	۵-۲
۷	اندوکتانس استاتور(P.u)	۰/۱
۸	مقاومت روتور(P.u)	۰/۰۱
۹	اندوکتانس روتور(P.u)	۰/۰۸
۱۰	اندوکتانس مغناطیس کنندگی	۳
۱۱	شعاع روتور(m)	۳۵
۱۲	محدوده زاویه گام(درجه)	۵۰-۰

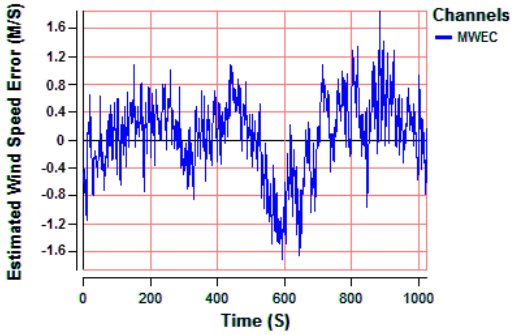
در شکل (۴) نتایج یکی از شبیه‌سازی‌های سناریوی اول آمده است. در این شکل منحنی سرعت باد شبیه‌سازی شده در یکی از آزمایش‌ها (شکل۴-الف) به همراه نتایج روش پیشنهادی و MWEC (شکلهای ۴-ب و ۴-ج) نشان داده شده‌اند. چنان که ملاحظه می شود، قدر مطلق خطای تخمین روش پیشنهادی و روش MWEC نسبت به منحنی سرعت باد در شبیه‌سازی اصلی تا حداکثر ۰/۸ متر برثانیه و ۱/۷ متر برثانیه بالغ می شود که حاکی از تطابق بیشتر نتایج حاصل از روش این مقاله با شبیه‌سازی اصلی است.



(الف)



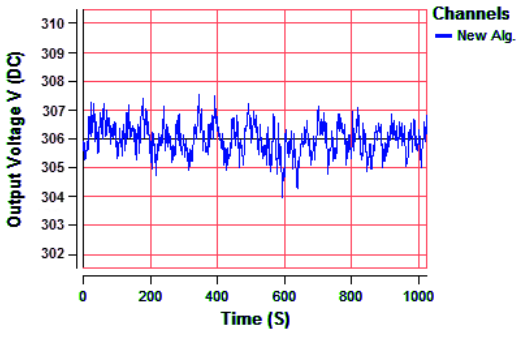
(ب)



(ج)

شکل ۴: نتایج یکی از شبیه‌سازی‌های سناریوی اول:
الف- بادشبیه‌سازی شده، ب- خطای تخمین روش پیشنهادی و ج- خطای تخمین روش MWEC

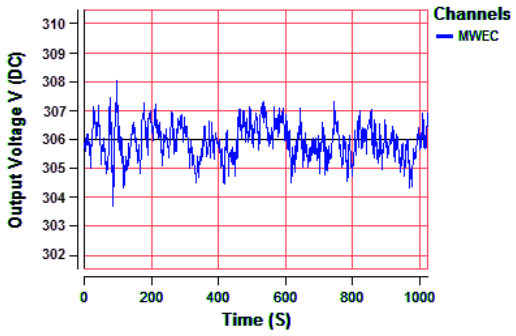
در شکل (۵-الف) ولتاژ به دست آمده با اعمال روش پیشنهادی و متناظر با آن در (۵-ب) ، همین خروجی در شرایط اعمال MWEC در سناریوی اول ملاحظه می‌شوند. اگر بیشینه تلرانس برق استحصالی در هر روش را به عنوان نمایه ای از میزان یکنواختی برق تولید شده از آن روش در نظر بگیریم، اندازه این پارامتر برای خروجی روش پیشنهادی (شکل ۵-الف) برابر با ۲/۰۴ ولت و برای خروجی روش MWEC(شکل ۵-ب) برابر با ۲/۲ ولت به دست آمده اند که حاکی از آن است که روش پیشنهادی این مقاله ولتاژ یکنواخت تری را از مزرعه بادی استحصال می‌نماید. این بهبود با نتیجه‌ای که در مجموعه شکل‌های (۴) از تخمین بهتر پارامترهای باد توسط روش پیشنهادی دیدیم، توجیه پذیر می باشد.



(الف)

Archive of SID

www.SID.ir

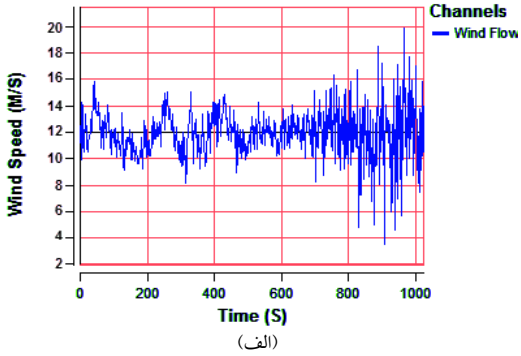


(ب)

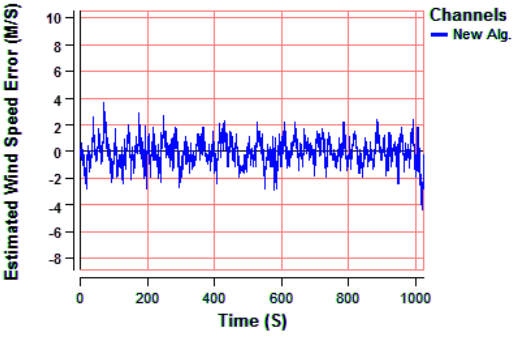
شکل ۵: ولتاژ استحصالی در سناریوی اول با اعمال
الف- روش پیشنهادی و ب- روش MWEC

شکل(۶) نتیجه آزمون روی یکی از نمونه‌های آزمایشی در سناریوی دوم را نشان می‌دهد. در این شکل، (۶-الف) سرعت باد شبیه‌سازی شده، (۶-ب) خطای تخمین حاصل از الگوریتم این مقاله و (۶-ج) خطای تخمین حاصل از MWEC را نشان می دهند. این شکل ها نشان می دهند که قدر مطلق خطای تخمین روش پیشنهادی و روش MWEC نسبت به شبیه‌سازی اصلی در این سناریو حداکثر به ۴ و ۹ متربرثانیه می رسند.

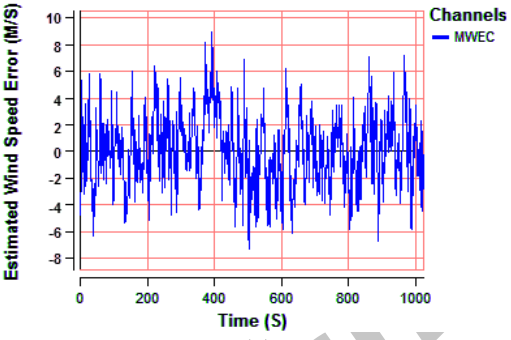
این مقادیرکماکان حاکی از برتری روش پیشنهادی نسبت به MWEC در تخمین سرعت باد وزشی می‌باشند. به همین ترتیب شکل (۷-الف) ولتاژ به دست آمده با اعمال روش پیشنهادی این مقاله و شکل (۷-ب) همین خروجی را در شرایط اعمال MWEC در سناریوی دوم نشان می دهند. مقایسه این شکل ها نیز با استفاده از معیار بیشینه تلرانس برق استحصال شده نشان می‌دهد که اندازه معیار فوق برای روش پیشنهادی۳ ولت و برای خروجی روشMWEC مقدار ۱۶/۰۷ ولت به دست آمده اند که از عملکرد بهتر روش پیشنهادی حکایت دارند.



(الف)

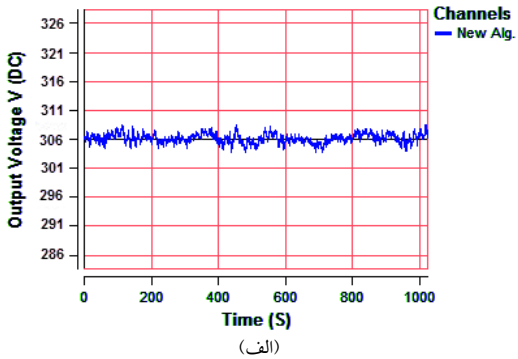


(ب)

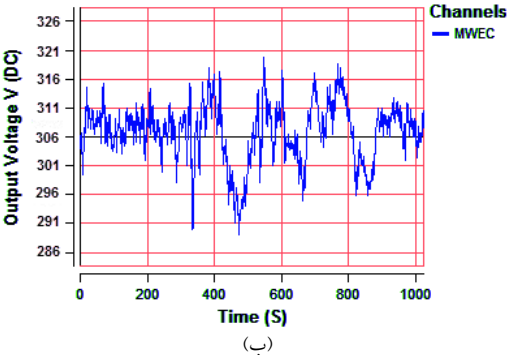


(ج)

شکل ۶: نتایج یکی از شبیه‌سازی‌های سناریوی دوم:
الف- باد شبیه‌سازی شده، ب- خطای تخمین روش پیشنهادی و ج- خطای تخمین روش MWEC



(الف)



(ب)

شکل ۷: ولتاژ استحصالی در سناریوی دوم با اعمال
الف- روش پیشنهادی و ب- روش MWEC

Archive of SID

www.SID.ir

۴- تفسیر

دو گونه از شرایط وزشی باد در مزرعه بادی با تغییرات کند (باد نجیب) و تند (باد نانجیب) طی دو سناریوی متفاوت شبیه‌سازی شدند. همچنین الگوریتم‌های پیشنهادی این مقاله و MWEC نیز در هر دو شبیه‌سازی آزموده شده و مقایسه گردیدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که روش پیشنهادی این مقاله و الگوریتمMWEC در دو وضعیت فوق، عملکردهای کاملاً متفاوتی از خود نشان می‌دهند. مقایسه عملکرد این دو روش با استفاده از دو معیار عملی انجام پذیرفت. اولین معیار، خطای تخمین پارامترهای باد توسط هر الگوریتم نسبت به شبیه‌سازی اصلی و معیار دوم نیز یکنواختی برق تولیدی در مزرعه بادی با به‌کارگیری هر یک از الگوریتم‌ها بودند. نتایج نشان داده شده در شکل(۸) که با گام زمانی ۲۰ ثانیه ای نشان داده شده اند، از برتری روش پیشنهادی این مقاله نسبت به روش MWEC در شرایط وزش باد نجیب و با هردو معیار مقایسه فوق، حکایت دارند. در این شکل ابتدا مشخصات باد دریافتی توسط حسگرهای اطراف نیروگاه نشان داده شده و سپس خطای تخمین سرعت باد توسط الگوریتم‌های مورد بررسی ارایه گردیده‌اند. سرانجام میزان یکنواختی برق خروجی نیز برای دو الگوریتم به دست آمده‌اند. در این سناریو متوسط خطای

روش پیشنهادی در تخمین سرعت باد ۱/۵ درصد بوده است. به همین ترتیب متوسط خطای روش MWEC نیز مقداری معادل ۶/۸ درصد را نشان داده است. مقادیر فوق به طور معنی داری حاکی از تخمین دقیق تر روش این مقاله می‌باشد. معیار تلرانس برق استحصالی نیزبرای روش پیشنهادی ۱/۴۹ ولت و برای روشMWEC نیز ۲/۰۱ ولت به دست آمدند. این مقادیر نیز نشان می دهند که در سناریوی فوق، روش پیشنهادی برق یکنواخت تری را به شبکه تزریق نموده است. شکل (۹) نیز نتایج را با گام زمانی ۲۰ ثانیه نشان می دهد و حاکی از آن است که روش پیشنهادی این مقاله در سناریوی دوم شبیه‌سازی با هردو معیار فوق، برتر از MWEC عمل نموده است. نتایج نشان می‌دهند در این سناریو، متوسط خطای روش پیشنهادی در تخمین سرعت باد ۵/۳ درصد بوده است در حالی که همین پارامتر برای روشMWEC برابر با ۲۲/۴ درصد به دست آمده است. معیاریکنواختی برق تولیدی نیز برای دو روش فوق به ترتیب ۲/۳ ولت و ۱۵/۰۳ ولت به دست آمده اند که کماکان استحصال برق یکنواخت‌تر با استفاده از روش این مقاله را تایید می نمایند. سرانجام مقایسه دو شکل اخیر نشان می‌دهند که اگرچه روش پیشنهادی این مقاله در هر دو شرایط وزش باد های نجیب و نانجیب توانسته است نتایج بهتری را نسبت به MWEC به دست دهد و لیکن بهبود ایجاد شده توسط روش پیشنهادی در سناریوی دوم چشمگیرتر بوده است. به گونه‌ای که برتری روش پیشنهادی نسبت به MWEC با معیارهای خطای تخمین باد و یکنواختی برق استحصالی در سناریوی اول به ترتیب ۵/۳ درصد و ۰/۵۲Volts بوده است در حالی که این مقادیر در سناریوی دوم به ترتیب ۱۷/۱ درصد و ۱۲/۷Volts به دست آمده اند. این مقادیر نشان می‌دهند که اثر بهبود دهنده روش این مقاله به هنگام بروز تغییرات شدیدتر در وزش باد موثرتر از شرایطی است که باد وزشی تغییرات اندکی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

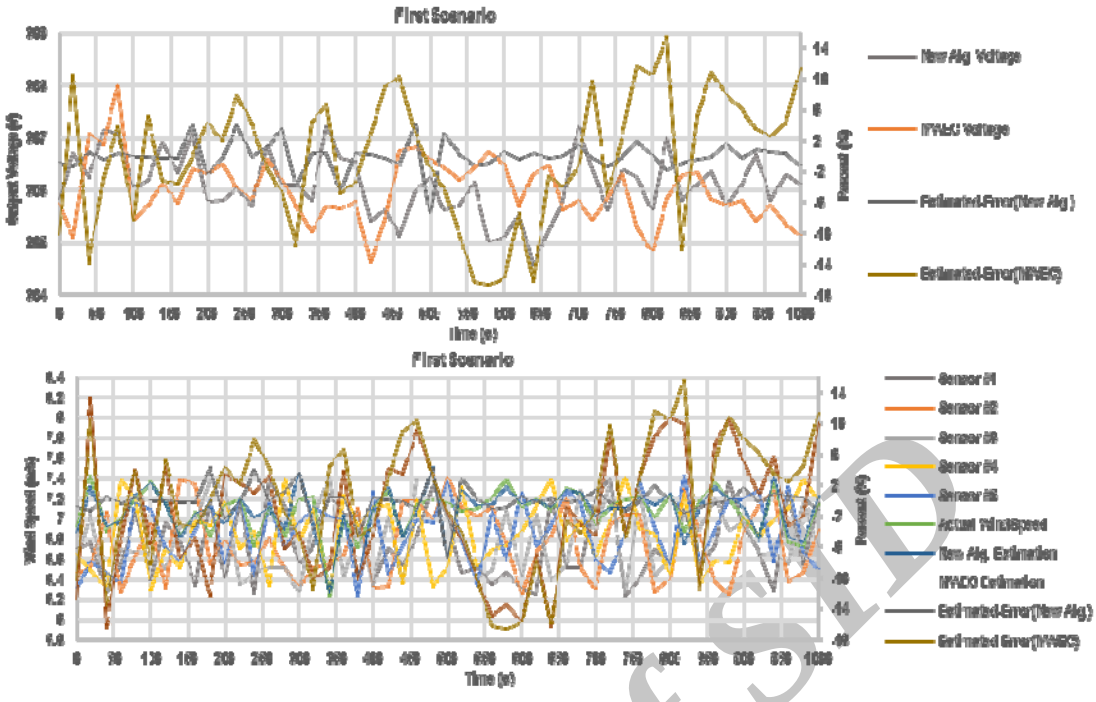
در این مقاله روشی نوین به منظور استحصال بهینه برق از توربین های واقع در مزارع برق بادی مبتنی بر مدلسازی مزرعه و توربین های آن با استفاده از تئوری فازی ارائه شد. برای تشکیل مدل فوق علاوه بر سابقه زمانی پارامترهای باد از اطلاعات مکانی آن نیز استفاده می شود. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی دو نوع متداول از شرایط وزشی باد در مزارع با تغییرات کند و تند شبیه‌سازی شدند. به منظور مقایسه نیز الگوریتم پیشنهادی این مقاله و یکی از جدیدترین روش های موجود موسوم به MWEC در هر دو سناریو آزموده شدند.

سرانجام مقایسه عملکرد روش های فوق نیز با استفاده از پارامترخطای تخمین باد و یکنواختی برق تولیدی در مزرعه بادی انجام پذیرفت. نتایج حاکی از برتری روش پیشنهادی بودند به گونه ای که در سناریوی اول روش پیشنهادی این مقاله توانست خطای تخمین باد را ۵/۳ درصد و یکنواختی برق حاصله را ۰/۵۲ولت نسبت به روشMWEC بهبود بخشد. اگرچه در نوع دوم وزش باد توربولانس بالای وزش موجب می شود تا تخمین پارامترها با بازده کمتری نسبت به سناریوی قبلی انجام شود، اما ملاحظه شد که در این گونه از وزش باد عملکرد الگوریتم پیشنهادی این مقاله نسبت به MWEC برتری قابل ملاحظه تری یافته است.

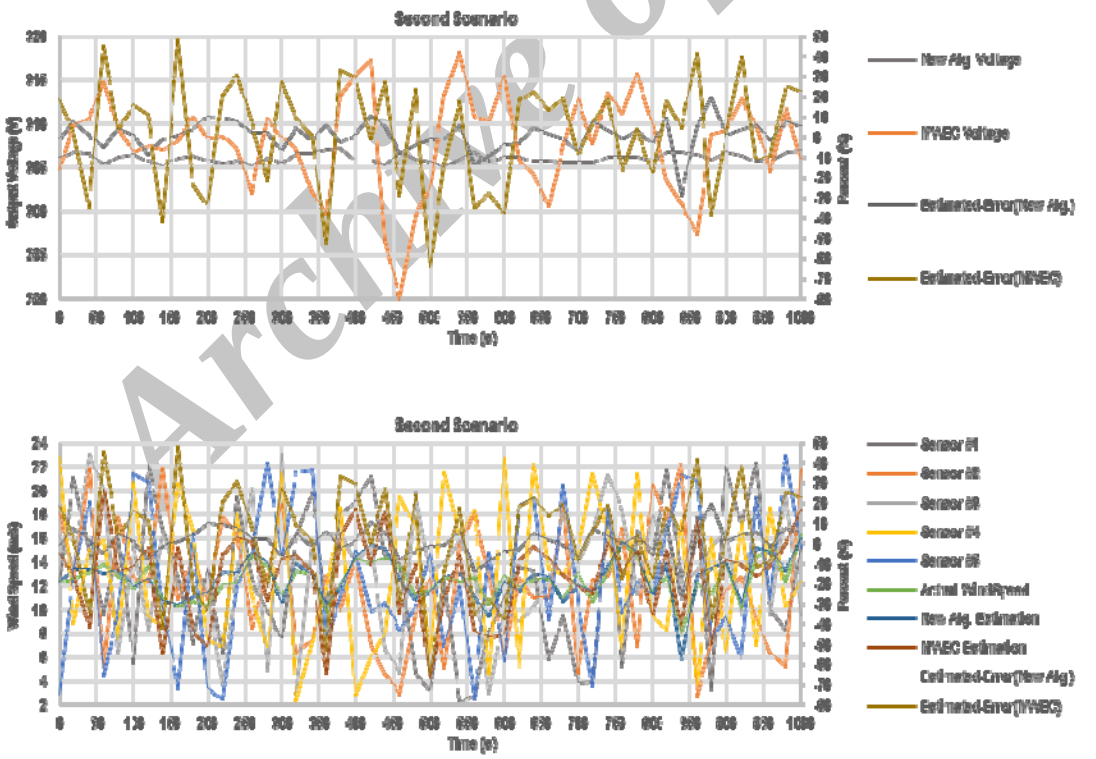
این بهبود به گونه ای است که نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با دو معیار خطای تخمین باد و یکنواختی برق تولیدی به ترتیب ۱۷/۱ درصد و ۱۲/۷ ولت بهبود را نسبت به MWEC نشان داده است که ۱۱/۸ درصد و ۱۲/۱۸ ولت برتری را نسبت به بهبودهای حاصل در مقایسات سناریوی اول را نشان می دهند. بر این اساس نتایج فوق، حاکی از آن هستند که مدل پیشنهادی این مقاله مبتنی بر مدلسازی فازی مزرعه بادی با استفاده از تلفیق زمانی- مکانی می‌تواند پارامترهای تنظیم دقیق تری برای توربین ها نسبت به روش‌های موجود خصوصاً در شرایط وزش بادهای با توربولانس بالا که پارامترهای بادی متغیرتری دارند، به دست آورد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۸: مقایسه تفصیلی عملکرد روشهای پیشنهادی وMWEC در سناریوی اول



شکل ۹: مقایسه تفصیلی عملکرد روشهای پیشنهادی وMWEC در سناریوی دوم

Archive of SID

www.SID.ir

مراجع

[1] R.Everett, R.Boyle, S.Peake, and J.Ramage, Energy Systems and Sustainability: Power for a Sustainable Future, Oxford University Press, 2012.

[2] Small Wind World Report, World Wind Energy Association. Available: http://www.wwindea.org, March 2012.

[3] G.Slootweg, H.Polinder, and W.Kling, "Dynamic modeling of a wind turbine with doubly fed induction generator," Proceedings IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver., Canada, pp. 1-6, 2001.

[4] G.Wilkins, Technology Transfer for Renewable Energy, CRC Press, 2012.

[5] E.Muljadi, C.Butterfield, B.Parsons, and A.Ellis, "Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 29-36, 2007

[6] J.Carrasco, L.Franquelo, J.Bialasiewicz, E.Galván, R.Guisado, M.Prats, J.León, and N.Moreno-Alfonso, "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-16.

[7] M.Hand, and J.Balas, "Systematic approach for PID controller design for pitch-regulated, variable- speed Wind Turbines," 17thASME Wind Energy Symposium Proceedings, Nevada., USA, pp. 89–94, 1998.

[8] B.Beltran, T.Ahmed-Ali, and M.Benbouzid, "Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems," IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 551-558, 2008.

[9] G.Tapia, and P.Flores, "Application of a control algorithm for wind speed prediction and active power generation," Renewable Energy, vol. 30, pp. 523-536, 2005.

[10] M.Hansen, Aerodynamics of Wind Turbines, Earthscan, 2012.

[11] R.Mayes, D.Rixen, D. Griffith, D.De Klerk, S.Chauhan, N.Voormeeren, and M.Allen, Topics in Experimental Dynamics Sub-structuring and Wind Turbine Dynamics, Springer, 2012.

[12] S.Watson, L.Landberg, and J.Halliday, "Application of wind speed forecasting to the integration of wind energy in to a large scale power system," IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, vol. 141, no. 4, pp. 357-362, 1994.

[13] J.Torres, A.Garcia, M.Blas, and A.Francisco, "Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre," Solar Energy, vol. 79, no. 1, pp. 65-77, 2005.

[14] L.Soder, "Simulation of wind speed forecast errors for operation planning of multi-area power systems," Proceedings of 8th International conference on probabilistic methods applied to power systems, Iowa., USA, pp. 723-728, 2004.

[15] P.Louka, G.Galanis, and N.Siebert, "Improvements in wind speed forecasts for wind power prediction purposes using kalman filtering," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, no. 12, pp. 2348-62, 2008.

[16] P.Zhao, J.Wang, J.Xia, Y.Dai, Y.Sheng, and J.Yue, "Performance evaluation and accuracy enhancement of a day-ahead wind power forecasting system in China," Journal of Renewable Energy, vol. 43, pp. 234-241, 2012.

[17] J.S.Thongam, P.Bouchard, H.Ezzaidi, and M.Ouhrouche, "Artificial neural network-based maximum power point tracking control for variable speed wind energy conversion systems," 18th IEEE International Conference on Control Applications, Saint Petersburg., Russia, pp. 1667-71, 2009.

[18] G.Guangdian, and D.Zhijie, "Wind pattern recognition in neural fuzzy wind turbine control system," The Industrial Fuzzy and Intelligent Systems Conference and the NASA Joint Technology, San Antonio., USA, pp. 381-385, 1994.

[19] S.Al-Sharhan, "Fuzzy entropy: a brief survey," 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Melbourne., Australia, pp. 1135-39, 2001.

[20] S.Xuan, W.Xiaoye, W.Zhou, W., and X.Ying, "A new fuzzy clustering algorithm based on entropy weighting," Journal of Computational Information Systems, vol. 6, no. 10, pp. 3319-26, 2010.

[21] M.Brown, and C.Harris, Neuro-Fuzzy Adaptive Modeling and Control, Prentice Hall, New York, 1994.

[22] J.Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-based fuzzy inference system," IEEE Transactions on systems, Manufacturing and Cybernetics, vol. 23, no. 3, pp 665-685, 1993.

[23] C.Sun, and J.Jang, "Neuro-Fuzzy modeling and control," Proceedings of IEEE, vol. 83, no. 2, pp.378–406, 1995.

[24] M.Lackner, and C.Elkinton, "An Analytical Framework for Offshore Wind Farm Layout Optimization," Wind Engineering, vol. 31, no. 1, pp.17–31, 2007.

[25] Y.Ren, and G.Bao, "Control strategy of maximum wind energy capture of direct-drive wind turbine generator based on neural-network," Proceedings of Power and Energy Engineering Conference, Chengdu., China, pp. 28-31, 2010.

Archive of SID

www.SID.ir