

معادل سازی دینامیکی بادها و ژنراتورها در مزرعه بادی بر اساس رگرسیون عصبی و خوشه بندی

امین ساکی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ ایمان پورفر^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول- دزفول- ایران- aminsaki941@jsu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول- دزفول- ایران- pourfar@jsu.ac.ir

چکیده: با افزایش وسعت مزرعه بادی، تنوع سرعت باد و تعداد ژنراتورها، برای کاهش پیچیدگی محاسبات و زمان شبیه سازی به معادل سازی بادها و ژنراتورها پرداخته می شود. در این مقاله، سرعت های باد ورودی توربین ها در یک بازه مشخص در نظر گرفته می شوند و با پیشنهاد رگرسیون عصبی و ایجاد ساختار آن، نشان داده می شود که سرعت های باد ورودی در این مطالعه چه قدر بر توان خروجی مؤثرند و چه اهمیتی برای فضای ویژگی خوشه بندی دارند. این در حالی است که به طور معمول به دلیل پیچیدگی رابطه دینامیکی بین توان خروجی و سرعت باد، روش های سنتی رگرسیون گیری نیز پیچیده تر می شوند. پس از اتمام رگرسیون گیری، رابطه ای برای محاسبه درایه های ماتریس فضای ویژگی پیشنهاد می گردد و سپس به ارائه و اعمال خوشه بندی فازی بر روی فضای ویژگی مذکور مبادرت می گردد. در نتیجه سرعت های باد خوشه بندی و سپس در هر خوشه معادل سازی می شوند. از ویژگی های خوشه بندی فازی آن است که به راحتی در نقطه بهینه محلی اسیر نمی شود. سپس بر اساس روابطی خاص، پارامترهای معادل برای ژنراتور معادل در هر خوشه محاسبه می گردد. در این مقاله رگرسیون قوی و درعین حال نتایج معادل سازی بسیار نزدیک به مدل دقیق برای بادها و ژنراتورهای معادل اخذ می گردد.

واژه های کلیدی: روش مدل سازی معادل، مشخصه توان اکتیو خروجی، روش نمایش چندماشینی، الگوریتم خوشه بندی، رگرسیون عصبی.

Dynamic Equivalent Modeling of Winds and Generators in Wind Farms based on Neural Regression and Clustering

A. saki¹, Graduate student; I. pourfar², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran, Email: aminsaki941@jsu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran, Email: pourfar@jsu.ac.ir

Abstract: As the size of wind farms and therefore the wind speed variety and number of generators is increased, it is of interest to work with equivalent models for wind and generators to avoid complexity in calculation and time consuming simulations. In this paper, an interval of wind inputs will be considered and with the suggestion of the neural regression and with the creation of its structure, it will be shown that how much the input winds affect the output power and its importance for feature space in the clustering, too. Normally, due to the complexity of dynamic relationship between output power and wind speed traditional regression methods become more complex. After finishing regression, with suggestion of a formula to calculate the entries of the feature space matrix, fuzzy clustering algorithm will be proposed and applied on the feature space. In each cluster the equivalent model for the wind is determined as well as the aggregated parameters are calculated based on specific formulas. The fuzzy clustering is not fallen easily in to local optimums. Strong regression as well as very closeness between equivalent and detailed models are shown as the benefits of using the proposed approach in this paper.

Keywords: Equivalent modeling method, active power output characteristics, multi-machine representation method, clustering algorithms, neural regression.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۴ و ۱۳۹۶/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۱

نام نویسنده مسئول: ایمان پورفر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - دزفول - رو به روی پایگاه چهارم شکاری - دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

بهربرداری سرعت باد در مزرعه بادی می‌باشد. در [۸، ۹]، یک روش محاسبه برای توان اکتیو هر توربین بادی تحت سرعت باد مربوطه اعمال گردیده است که بر اساس رابطه سرعت-توان می‌باشد. در مراجع ذکرشده در بالا بین توان خروجی واقعی توربین بادی و توان محاسبه‌شده، انحراف چشمگیری وجود دارد.

در [۱۰]، یک روش برای معادل‌سازی دینامیکی مزارع بادی با مقیاس‌های مختلف ارائه شده است که در آن هر ردیف یا هر ستون از توربین‌های بادی را به‌عنوان یک واحد معادل در نظر می‌گیرد. کاربرد این روش معادل‌سازی می‌بایست دو پیش‌شرط داشته باشد: (۱) مزرعه آرایشی مستطیلی داشته باشد. (۲) توربین‌های بادی شرایط بهره‌برداری یکسانی داشته باشند؛ اما در مرجع اخیر شرایط باد در همه توربین‌ها یکسان فرض شده است. همچنین در مرجع [۱۱] به ارائه یک شیوه برای دسته‌بندی رویدادهای افزایشی یا کاهش (WPRES) باد پرداخته شده که مبتنی بر SVM^۲ بوده و هدف آن پیش‌بینی رویدادهای مذکور می‌باشد.

در مرجع [۱۲] به مطالعه آماری و یافتن یک نوع رابطه خویشاوندی بین رویدادهای افزایشی یا کاهش سرعت باد مبادرت گردیده و با استفاده از یک تکنیک برنامه‌ریزی دینامیکی بازگشتی به شناسایی کلیه رویدادهای افزایشی یا کاهش پرداخته شده که البته روش ارائه‌شده بسیار پیچیده است. همچنین در بحث مشارکت واحدها و برنامه‌ریزی تصادفی سناریوهای باد، بار و تولید، به گروه‌بندی و کاهش سناریوهای مشابه تولیدشده در ساختار مونت‌کارلو^۲ پرداخته می‌شود و دسته‌بندی در آن مبتنی بر خوشه‌بندی است [۱۳]. هرچند مرجع [۱۳]، مقاله‌ای کاربردی در زمینه پیش‌بینی است ولی روش خوشه‌بندی به‌کار گرفته‌شده در آن قابل‌استفاده و مفید در بحث معادل‌سازی مبتنی بر الگوریتم خوشه‌بندی نیز می‌باشد. ضمن این‌که روش خوشه‌بندی برخی از مشکلات SVM را هم ندارد. خاطرنشان می‌شود که به‌طور خاص دسته‌بندی بادها در معادل‌سازی، پیش‌بینی و شبیه‌سازی حائز اهمیت است.

مدل ارائه‌شده در [۱۴]، با تمرکز بر شرایط گذرا، ابعاد سیستم را با کاهش مرتبه سیستم کاهش می‌دهد و دقت را در شرایط خطا تا حدودی حفظ می‌کند، اما پیچیدگی مدل به‌قدری زیاد است که برای کاربردهای عملی قابل‌استفاده نیست و ضمن این‌که زمان شبیه‌سازی نیز به‌نحو مطلوبی کاهش نمی‌یابد. به‌علاوه در روش مذکور به‌طور معمول ورودی‌های سرعت باد برای همه توربین-ژنراتورها یکسان فرض می‌شوند و کارایی و نیز چگونگی کاربرد این روش برای مزارع بادی نامنظم که در آن، هر توربین دارای سرعت باد متفاوتی با توربین‌های دیگر است، مورد‌بحث و اثبات قرار نگرفته است همچنین در [۱۵]، روش ارائه‌شده برای معادل‌سازی مزرعه بادی مبتنی بر روش‌های آماری بوده و بر حالت ماندگار متمرکز است و حالت دینامیکی ژنراتور را نادیده می‌گیرد.

مقاله‌ای نظیر [۱۶] که به بررسی رفتار یک نوع توربین خاص در مزرعه می‌پردازد برای مطالعه دقیق‌تر می‌بایست رفتار مابقی سیستم

افزایش نیاز روزافزون به انرژی‌های نو از مدت‌ها پیش موردتوجه قرار گرفته و به دنبال آن، مطالعه روی مزارع بادی به موضوع جالبی در بسیاری از تحقیقات تبدیل شده است. مهم‌ترین تجهیزاتی که در مزارع بادی به کار می‌رود، ژنراتور القایی دوسوتغذیه است. با افزایش تعداد ژنراتورها در یک مزرعه، مسائلی از قبیل معادل‌سازی دینامیکی، گروه‌بندی مناطق نصب و آرایش توربین‌های بادی، شناسایی ورودی‌های هم‌ریخت باد در رویدادهای افزایشی و یا کاهش سرعت باد، پیش‌بینی الگوهای مشابه منطقه‌ای باد و نیز کاهش سناریوهای باد در بهره‌برداری‌های سیستمی و ... بروز می‌یابند که البته به‌طور خاص از اطلاعات ناشی از دسته‌بندی سرعت‌های باد در معادل‌سازی دینامیکی، پیش‌بینی و شبیه‌سازی در مزارع بادی استفاده می‌شود. در مقاله پیش رو، از خوشه‌بندی باد جهت معادل‌سازی سرعت بادها و ژنراتورهای یک مزرعه بادی استفاده می‌شود؛ بنابراین این مقاله یک مقاله معادل‌سازی بوده و طبق رویه مقالاتی که در زمینه معادل‌سازی هستند، ورودی‌های باد برای سیستم شبیه‌سازی تعریف می‌شوند [۶-۱۱]. در مقاله پیش رو، سرعت بادهای ورودی، متغیر در نظر گرفته شده است.

بعضی مقالات به‌دنبال مطالعه تأثیر سرعت باد بر روی قابلیت اطمینان بهره‌برداری‌های شبکه قدرت هستند، چراکه سرعت توربین بادی با محدودیت‌هایی مواجه است [۳]. مثلاً ممکن است کاهش یا افزایش سرعت باد تا حد سرعت‌های قطع توربین پیش رود.

در معادل‌سازی به‌دنبال کاهش پیچیدگی و زمان مدل‌سازی هستند، به‌طوری که با معادل‌سازی سیستم بتوانند با دقت خوبی مشخصه خروجی توان اکتیو را در مدل دقیق- و نه مدل معادل- تقریب بزنند [۶-۱۱]. به‌رحال ضرورت‌های مذکور انگیزه‌ای برای ارائه مقاله پیش روست. مراجع ذکرشده در بالا، مقالاتی در زمینه معادل‌سازی مزرعه بادی هستند و همه آن‌ها به‌جز [۳، ۴] که بیشتر جنبه مروری دارند، به‌جای الگوریتم دسته‌بندی از تحلیل‌های ساده شهودی برای دسته‌بندی ورودی‌های مشابه باد استفاده می‌کنند و گروه‌های مشابه، یا از قبل معلوم و به‌عنوان یک پیش‌فرض می‌باشند و یا معیار آن‌ها به‌گونه‌ای است که اگر اختلاف سرعت‌های باد ورودی توربین‌ها از یک مقدار ثابتی کمتر بود، در یک دسته قرار گیرند. این در حالی است که معیاری جهت تعیین آن مقدار ثابت ارائه نمی‌دهند. در صورت افزایش تنوع در سرعت باد، دیگر این تحلیل‌ها معتبر نیستند. برای معادل‌سازی سرعت باد ممکن است از میانگین‌گیری سرعت باد در توربین‌های بادی استفاده شود [۴-۱۱]. در بسیاری کارهای مشابه نیز همین رویه در پیش گرفته شده است و در مراجع [۳، ۴] که مقالاتی مروری‌اند، بررسی کاملی روی این مقالات انجام شده است. ضمن آن‌که در [۴] به بررسی جامعی در خصوص بحث معادل‌سازی دینامیکی مزرعه بادی، پرداخته شده است. در [۷]، با انتخاب سرعت باد ورودی V_{eq} ، یک مدل معادل برای مزرعه بادی با در نظر گرفتن میانگین سرعت باد، پیشنهاد شده است که بر اساس داده‌های

توجه شود که C_p تابعی از زاویه گام β و نسبت سرعت نوک پره λ است که با تنظیم آن‌ها و در نتیجه تنظیم C_p ، ماکزیمم انرژی باد به دست می‌آید. هنگامی که سرعت باد ورودی از سرعت نرمال باد (NWS) بیشتر شد، کنترل زاویه لبه جهت کاهش توان مکانیکی تا حد نامی تجهیز عمل می‌کند، که مت D به بعد به این منظور نشان داده شده است. قسمت C تا D هم به منظور هموار کردن نوساناتی که حوالی NWS رخ می‌دهد، معرفی شده است [۳، ۱۷]. به طور کلی، DFIG یک ژنراتور القایی با رتور سیم‌پیچی شده می‌باشد و برای مدل‌سازی دینامیکی آن از سیستم مختصاتی $d-q$ استفاده می‌شود. معادلات پایه ولتاژ، شار پیوندی و گشتاور الکترومغناطیسی مربوطه به ترتیب به صورت (۲)، (۳) و (۴) می‌باشند [۴، ۱۷].

(۱) معادله ولتاژ

$$\begin{aligned} U_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \psi_{qs} \omega_e \\ U_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \psi_{ds} \omega_e \\ U_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \psi_{qr} \omega_s \\ U_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \psi_{dr} \omega_s \end{aligned} \quad (2)$$

(۲) معادله شار پیوندی

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \psi_{qs} &= L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \psi_{dr} &= L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \psi_{qr} &= L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{aligned} \quad (3)$$

(۳) معادله گشتاور الکترومغناطیسی

$$T_e = \frac{3}{2} N_p L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (4)$$

که در آن‌ها U_{ds} ، U_{qs} ، U_{dr} و U_{qr} به ترتیب، ولتاژهای استاتور و رتور برای محور d و q هستند. I_{qs} ، I_{ds} ، I_{qr} و I_{dr} به ترتیب جریان‌های استاتور و رتور برای محورهای d و q هستند. ψ_{qs} ، ψ_{ds} ، ψ_{qr} و ψ_{dr} به ترتیب، شار استاتور و رتور برای محورهای d و q هستند. R_s و R_r به ترتیب، مقاومت‌های رتور و استاتور هستند. ω_s و ω_e به ترتیب، سرعت‌های زاویه‌ای چرخشی و لغزش هستند. L_s و L_r به ترتیب، اندوکتانس خودی استاتور و رتور هستند. L_m اندوکتانس متقابل استاتور و رتور است. N_p ، تعداد جفت قطب‌ها است [۴، ۱۷].

۳- بررسی رگرسیون بین سرعت باد و توان خروجی با استفاده از شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی (NNs) ابزار مناسبی برای رگرسیون‌گیری هستند [۱۸] و با استفاده از این شیوه می‌توان میزان همبستگی بین سرعت باد و توان خروجی مزرعه را بررسی و این موضوع را فهمید که توصیف و دسته‌بندی سرعت باد چه قدر در آنالیز مشخصه خروجی مزرعه مؤثر است، هرچه این رابطه قوی‌تر باشد، تأثیر دسته‌بندی و معادلسازی

بادی متصل به آن را به نحوی مدل کنند تا رفتار کلی مزرعه بادی مورد بررسی قرار گیرد، در حالی که اغلب چنین کاری انجام نمی‌شود، بنابراین روش پیشنهادشده در این مقاله به منظور مدل کردن کل مزرعه به یک مزرعه معادل، می‌تواند نقش مهمی در مطالعات مذکور داشته باشد. به طور خلاصه کارهای انجام شده در مراجع را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: (۱) معادلسازی فقط به روش تک‌ماشینی (۲) معادلسازی چند ماشینی بدون لحاظ یک روش علمی و الگوریتمی (۳) معادلسازی بر اساس یک الگوریتم ضعیف که به راحتی در دام مینیمم محلی اسیر می‌شود نظیر SVM.

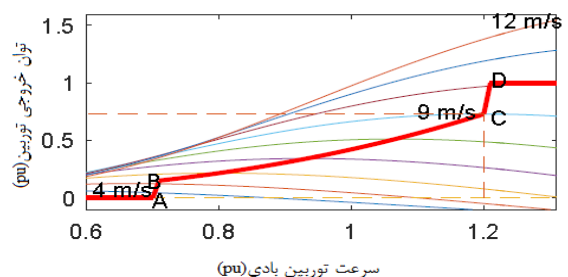
در این مقاله پس از بررسی تأثیر سرعت باد بر توان خروجی که مبتنی بر شبکه عصبی انجام می‌شود، معادلسازی دینامیکی مزرعه بادی مبتنی بر مواردی از قبیل اطلاعات سرعت باد، ایجاد یک فضای ویژگی پیشنهادی و نیز به کارگیری الگوریتم خوشه‌بندی فازی انجام می‌گیرد که ویژگی الگوریتم مذکور این است که به راحتی در نقطه بهینه محلی اسیر نمی‌شود و بدین ترتیب ایراد الگوریتم‌هایی نظیر SVM نیز مرتفع می‌گردد. در ضمن بیان می‌دارد که طرح شبکه عصبی و استفاده از آن به عنوان ابزار رگرسیون‌گیری، برای بررسی اهمیت سرعت باد در توان خروجی و در نتیجه در فضای ویژگی بوده است که این مورد در هیچ‌کدام از کارهای موجود در مراجع قبلی، اعتبار سنجی نشده است و به عنوان یک کار جدید دیگر، برای اولین بار در این مقاله انجام پذیرفته است.

۲- مدل دینامیکی DFIG

در توربین بادی با DFIG، با اتکا به قابلیت سرعت متغیر توربین، امکان استفاده از استراتژی‌های کنترلی مختلفی در سرعت‌های مختلف باد وجود دارد. رابطه‌ای که توان خروجی ژنراتور بادی را به سرعت باد مربوط می‌سازد به صورت (۱) است [۳، ۱۷].

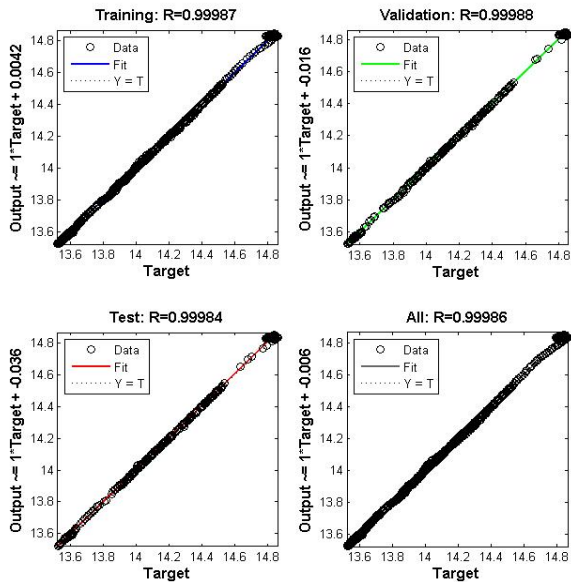
$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A_r v^3 \quad (1)$$

که P_m تابع پیچیده‌ای از سرعت نوک پره، ضریب توان $C_p(\beta, \lambda)$ ، سرعت باد (V_m) و غلظت هوا (ρ) است. طبق شکل ۱، زمانی که سرعت باد از حد نرمال پایین‌تر است، در ژنراتور القایی دوسو تغذیه از استراتژی‌های ردیابی بهینه OPTS^۵ به منظور اخذ ماکزیمم انرژی باد استفاده می‌شود که توسط قسمت B تا C نشان داده شده است.



شکل ۱: مشخصه توان - سرعت توربین بادی

همبستگی قوی را نشان می‌دهد. بدین ترتیب تأثیر قوی سرعت باد ورودی در توان خروجی و نیز اهمیت آن برای فضای ویژگی در الگوریتم خوشه‌بندی، نشان داده شده و برای مطالعه پیش رو در این مقاله مورد تأیید قرار می‌گیرد.



شکل ۳: ترسیم وضعیت رگرسیون

۴- خوشه‌بندی و معادلسازی بادها در یک بازه مشخص

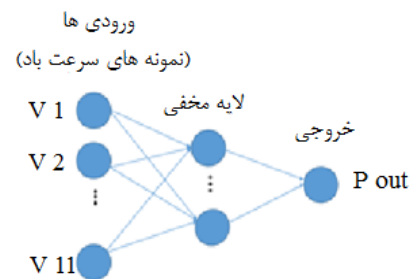
۴-۱- خوشه‌بندی

با توجه به شکل ۱ و مرجع [۳]، مطالعات دینامیکی را متناسب با قسمت‌های AB، BC و CD به سه بخش دینامیکی معطوف می‌کنند. از هر قسمت منحنی، یک نقطه را به نمایندگی از بازه اطراف خود انتخاب و برای معادلسازی سرعت باد در یک گروه از توربین‌های بادی به کار می‌گیرند. برخلاف مقالات گذشته، در مقاله پیش رو، تنها یک نقطه به‌عنوان نماینده یک بازه لحاظ نمی‌شود. روش استفاده‌شده در این مقاله اولاً مبتنی بر الگوریتم خوشه‌بندی فازی (fcm)^{۱۵} بوده و ثانیاً با پیشنهاد و استفاده از رابطه پیشنهادشده (۵)، درایه‌های ماتریس متقارن M در (۶) به‌دست می‌آیند. این ماتریس همان ماتریس فضای ویژگی پیشنهادی می‌باشد که بر اساس آن فرآیند خوشه‌بندی ادامه می‌یابد. به‌این ترتیب همان‌طور که از ظاهر رابطه (۵) برمی‌آید، معیار پیشنهادی خوشه‌بندی همان فاصله اقلیدسی تک‌تک نمونه‌های یک بازه به‌صورت برداری از نمونه‌ها می‌باشد. پس الگوریتم خوشه‌بندی مبتنی بر خوشه‌بندی در یک بازه و بر اساس شباهت و نزدیکی نمونه‌های سرعت‌های ورودی باد از هم و نیز از خودشان می‌باشد.

$$a_{i,j} = \|(v_i - v_j)\|_2 \quad i,j = 1, \dots, n \quad (5)$$

که $a_{i,j}$ درایه سطر i ام و ستون j ام، v_i و v_j بردارهای نمونه‌های سرعت باد در یک بازه و مربوط به i امین و j امین توربین بادی هستند.

سرعت‌های باد بر مشخصه خروجی ناشی از معادلسازی‌های دینامیکی و همچنین کارهای مربوط به پیش‌بینی مشهودتر است. توجه شود که در کارهای قبلی، ارزیابی شدت تأثیر سرعت باد در خروجی و در نتیجه تأثیر معادلسازی‌های سرعت باد در توان خروجی مزرعه بادی لحاظ نشده است [۴-۱]، در صورتی که این همبستگی بین سرعت باد و توان خروجی در مطالعات مذکور قوی نبوده باشد، نتیجه مطالعات مربوط به معادلسازی سرعت باد و مزارع بادی نیاز به اعتبارسنجی^۸ دارد، چراکه اهمیت معادلسازی در جایی است که نتوان از تأثیر سرعت باد در خروجی صرف‌نظر کرد و در این صورت است که می‌توان روش معادلسازی پیشنهادی را مورد ارزیابی قرارداد. همچنین اگر این رگرسیون قوی نباشد، چگونه می‌توان سرعت باد را در فضای ویژگی^۹ خوشه‌بندی انتخاب کرد؟! به‌رحال در حالت معمول به‌دلیل پیچیدگی رابطه دینامیکی بین توان خروجی و سرعت باد، روش‌های سنتی رگرسیون‌گیری نیز پیچیده‌تر می‌شوند. لذا در مقاله پیش رو از ساختار عصبی شکل ۲ با ۱۱ ورودی، ۹ نرون در لایه مخفی و ۱ خروجی استفاده شده است که ورودی‌ها، همان نمونه‌های سرعت‌های باد در ۱۱ توربین و خروجی شبکه عصبی، توان خروجی مزرعه است. لازم به‌ذکر است که شکل سرعت‌های باد و توان خروجی در بخش‌های بعدی نشان داده شده است. انتخاب تعداد نرون‌های لایه مخفی در شبکه عصبی برحسب نوع موضوع مورد مطالعه خود نوعی چالش است و معمولاً نحوه تعیین تعداد نرون‌های لایه مخفی به این صورت انجام می‌شود که هر بار تعدادی نرون در لایه مخفی در نظر می‌گیرند و کارایی^{۱۰} شبکه را ارزیابی می‌کنند، هر تعدادی که کارایی بهتری ارائه داد، به‌عنوان تعداد نرون‌های لایه مخفی لحاظ می‌گردد و روش دیگری در این زمینه وجود ندارد [۱۹]. در این مقاله نیز از همین رویه پیروی شده است. توابع فعالیت در لایه مخفی و خروجی به ترتیب تنسیگ^{۱۱} و پیورلین^{۱۲} می‌باشند. از الگوریتم لونیبرگ-مارکوئر^{۱۳} برای آموزش شبکه عصبی استفاده شده است و کارایی شبکه با خطای مربع میانگین «MSE»^{۱۴} مشخص می‌شود. تقسیم داده‌ها برای فاز آموزش، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۷۰٪، ۱۵٪ و ۱۵٪ می‌باشد. بهترین کارایی شبکه $4/0 \cdot 10^5 \times 10^{-5}$ به‌دست آمد.



شکل ۲: ساختار عصبی مورد استفاده

میزان رگرسیون به‌دست‌آمده همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، برابر 0.99986 و فاقد پراکندگی در داده‌ها است که یک

اخذ شده توسط روابط (۵) و (۶) آماده‌سازی می‌شوند. داده‌ها، به صورت جداول ۱ و ۲ آماده‌شده‌اند؛ که به دلیل محدودیت فضای نوشتاری و همچنین رعایت خوانایی، اعداد داخل جدول با یک رقم نمایش داده شده‌اند و جداول مذکور در دو بخش ترسیم گردیده‌اند. دقت شود که $a_{i,j}$ همان فاصله بردار نمونه‌های i امین باد ورودی نسبت به j امین باد ورودی می‌باشد. سرعت‌های ورودی باد برای یک بازه زمانی ۳/۴ ثانیه‌ای در شکل ۵ ترسیم شده‌اند.

جدول ۱: قسمت اول ماتریس متقارن ۱۱×۱۱ برای داده‌های آماده‌شده

$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	$a_{i,4}$	$a_{i,5}$	$a_{i,6}$
۰	۲۶/۸	۲۰/۲	۱۲۱/۷	۸۷/۴	۸۱/۲
۲۶/۸	۰	۱۲/۲	۱۴۶/۶	۱۱۳/۷	۱۰۱/۹
۲۰/۲	۱۲/۲	۰	۱۴۰/۳	۱۰۶/۶	۹۷/۱
۱۲۱/۷	۱۴۶/۶	۱۴۰/۳	۰	۴۳/۶	۵۴/۹
۸۷/۴	۱۱۳/۷	۱۰۶/۶	۴۳/۶	۰	۵۱/۹
۸۱/۲	۱۰۱/۹	۹۷/۱	۵۴/۹	۵۱/۹	۰
۸۱/۲	۱۰۷	۱۰۰/۱	۵۲/۸	۱۶/۶	۵۶/۴
۶۷/۷	۹۳/۷	۸۵/۲	۸۱/۴	۳۹/۲	۷۵/۶
۳۳/۸	۱۳/۵	۱۹/۴	۱۵۰/۴	۱۱۹/۶	۱۰۴/۵
۵۸/۶	۸۳/۹	۷۷/۴	۶۳/۱	۳۴	۳۴/۸
۸۶/۴	۱۰۷/۴	۱۰۳/۱	۵۰	۵۰/۱	۱۰/۵

جدول ۲: قسمت دوم ماتریس متقارن ۱۱×۱۱ برای داده‌های آماده‌شده

$a_{i,7}$	$a_{i,8}$	$a_{i,9}$	$a_{i,10}$	$a_{i,11}$
۸۱/۲	۶۷/۷	۳۳/۸	۵۸/۶	۸۶/۴
۱۰۷	۹۳/۷	۱۳/۵	۸۳/۹	۱۰۷/۴
۱۰۰/۱	۸۵/۲	۱۹/۴	۷۷/۴	۱۰۳/۱
۵۲/۸	۸۱/۴	۱۵۰/۴	۶۳/۱	۵۰
۱۶/۶	۳۹/۲	۱۱۹/۶	۳۴	۵۰/۱
۵۶/۴	۷۵/۶	۱۰۴/۵	۳۴/۸	۱۰/۵
۰	۲۹/۷	۱۱۲/۹	۳۲/۱	۵۷
۲۹/۷	۰	۱۰۰/۴	۴۲/۵	۷۷/۲
۱۱۲/۹	۱۰۰/۴	۰	۸۸/۴	۱۱۰/۵
۳۲/۱	۴۲/۵	۸۸/۴	۰	۳۷/۷
۵۷	۷۷/۲	۱۱۰/۵	۳۷/۷	۰

۴-۵- نتایج خوشه‌بندی

مطابق آنچه در بالا بیان شد، با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی، نتایج جدول ۳ به دست آمده‌اند.

جدول ۳: نتایج خوشه‌بندی

گروه ۱	۴	۵	
گروه ۲	۱	۲	۶
گروه ۳	۳	۱۰	
گروه ۴	۷	۸	
گروه ۵	۹	۱۱	

n تعداد توربین‌های بادی است که در اینجا تعدادشان ۱۱ عدد است. با توجه به تعداد توربین‌ها بعد ماتریس 11×11 می‌باشد.

توجه شود که با استفاده از رابطه (۵)، درایه‌های ماتریس متقارن M به صورت زیر به دست می‌آیند:

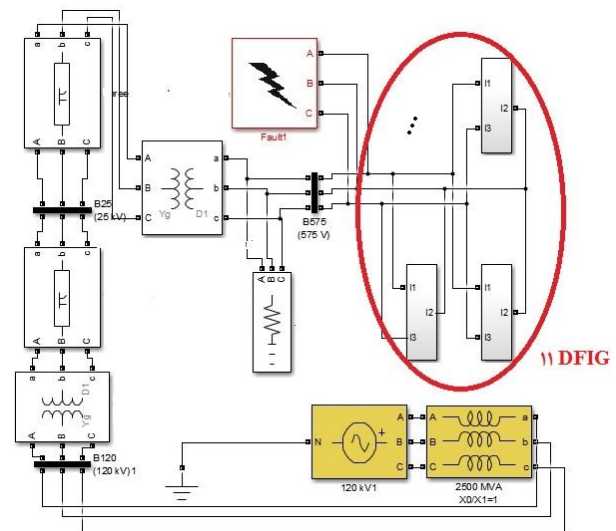
$$M = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i,1} & \dots & a_{i,j} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (6)$$

۴-۲- معادل‌سازی

پس از خوشه‌بندی، می‌بایست سرعت‌های باد در هر خوشه به یک سرعت معادل تبدیل شوند که مطابق [۴-۱، ۷] یکی از روش‌های معمول، استفاده از میانگین سرعت باد است. در این مقاله نیز برای این بخش، همین رویه دنبال می‌گردد.

۴-۳- سیستم شبیه‌سازی شده

ابزار مورد استفاده جهت شبیه‌سازی، MATLAB/Simulink می‌باشد. شکل کلی سیستم شبیه‌سازی شده، در شکل ۴ نشان داده شده است که در آن ژنراتور القایی دو سو تغذیه به شبکه متصل شده‌اند و پارامترهای آن‌ها در پیوست آمده‌اند. محیط مورد استفاده جهت شبیه‌سازی همانند اکثر مراجع، MATLAB/Simulink می‌باشد و در نظر گرفتن این تعداد ژنراتور و یا کمتر از آن، در مراجع مرسوم بوده و مورد استناد می‌باشد [۲۰]. کلیت سیستم دینامیکی مورد مطالعه، نظیر سیستم مورد مطالعه در مراجع [۲۰ و ۲۱] می‌باشد.



شکل ۴: سیستم شبیه‌سازی شده

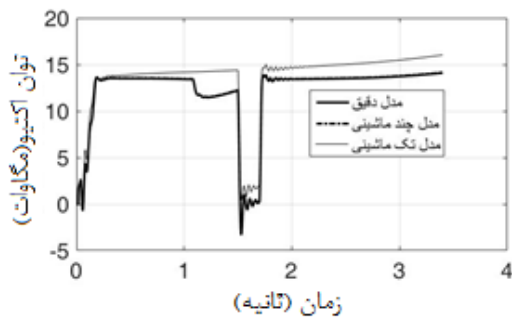
۴-۴- آماده‌سازی داده‌ها

از سیستم شبیه‌سازی شده در شکل ۴ برای اخذ نمونه‌های خروجی و سرعت‌های ورودی مختلف باد، استفاده شده است. نمونه‌های

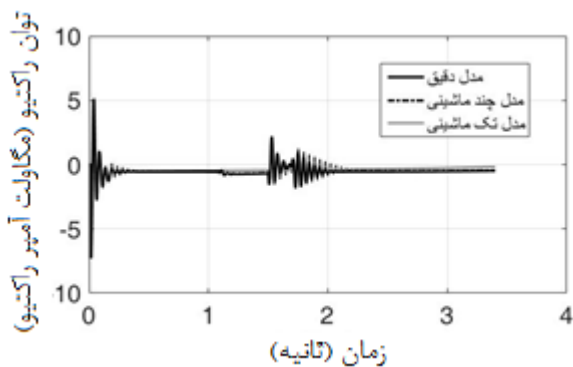
که k تعداد توربین‌ها در یک خوشه خاص است. S و P به ترتیب ظرفیت و توان اکتیو هستند. X_r و X_s به ترتیب راکتانس‌های استاتور و روتور هستند. X_m راکتانس مغناطیس‌کنندگی و R_s و r_r به ترتیب مقاومت‌های استاتور و روتور هستند. H ثابت زمانی اینرسی و برابر $H_t + H_g$ می‌باشد، $C_{DC\ bus-i}$ ظرفیت مربوط به خازن باس DC و K ضریب سختی است. که H_t ، ثابت؛ کهی اینرسی توربین و H_g ، ثابت زمانی اینرسی روتور ژنراتور است.

۶- مشخصه توان اکتیو و راکتیو خروجی مزرعه بادی

مشخصه‌های خروجی توان اکتیو و راکتیو در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب ترسیم شده‌اند. علاوه بر سرعت‌های باد ورودی متفاوت، یک خطای سه فاز متقارن نیز در نظر گرفته شده است که در ثانیه ۱/۵ رخ می‌دهد و به مدت دوازده سیکل (۲۰۰ میلی ثانیه) ادامه می‌یابد.



(الف)

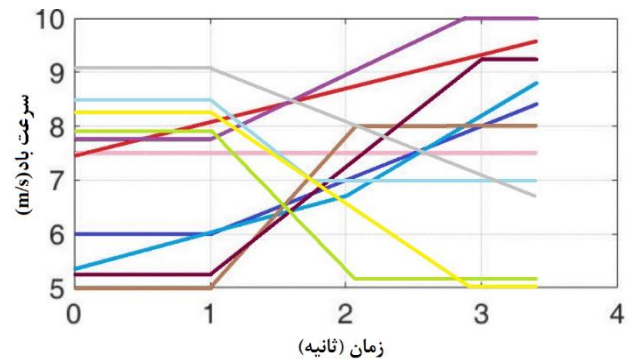


(ب)

شکل ۶: (الف) مقایسه خروجی توان اکتیو در مدل دقیق با دو مدل معادل‌سازی شده (ب) مقایسه خروجی توان راکتیو در مدل دقیق با دو مدل معادل‌سازی شده

همان‌طور که پیداست هر شکل شامل سه ترسیم است که عبارت‌اند از: (۱) مدل دقیق خروجی مزرعه که متأثر از ۱۱ ورودی باد در توربین‌ها می‌باشد. (۲) مدلی که خروجی آن متأثر است از این که فرض شود تمامی بادها در یک خوشه‌اند و با این فرض بادها معادل‌سازی شوند. (۳) مدلی که خروجی آن متأثر از خوشه‌بندی بادها انجام شده و

دقت شود که سرعت باد در بازه زمانی ۰ تا ۳/۴ (ثانیه) می‌باشد. الگوریتم خوشه‌بندی به کاررفته نیز در همین بازه، رویدادها را خوشه‌بندی می‌کند. تعداد خوشه‌ها می‌تواند بیشتر یا کمتر و یا شامل هر نوع رویدادی باشند که البته ملاک در خوشه‌بندی دستیابی به بهترین برازندگی^{۱۶} است. با تغییر تعداد خوشه‌ها می‌توان بهترین برازندگی را در خوشه‌بندی یافت.



شکل ۵: تمام ورودی‌های باد مزرعه بادی

۵- معادل‌سازی پارامترهای ژنراتورها

در قسمت قبل به معادل‌سازی سرعت‌های باد ورودی پرداخته و گفته شد که چون سرعت‌های باد متفاوت‌اند، بایستی از خوشه‌بندی برای گروه‌بندی توربین-ژنراتورها استفاده کرد تا توربین‌های بادی که وضعیت مشابهی دارند، در یک خوشه و توربین‌های مشابه دیگر و البته متفاوت با خوشه قبلی، در خوشه‌ای دیگر قرار بگیرند و همین‌طور الی آخر؛ و در نهایت، معادل‌سازی پارامترهای ژنراتورها انجام می‌شود. توجه شود که از اصطلاح «مدل چند ماشینی»^{۱۷} در برابر «مدل تک‌ماشینی»^{۱۸} استفاده شده است [۴]. برای معادل‌سازی پارامترهای ژنراتورهای یک خوشه به یک ژنراتور معادل، از روشی استفاده می‌شود که قبلاً به طریقی مشابه در مورد روش نمایش تک‌ماشینی استفاده شده است و روابط آن به صورت (۷) می‌باشند [۲۱، ۲۲].

$$\begin{aligned}
 S_{eq} &= \sum_{i=1}^k S_i & P_{eq} &= \sum_{i=1}^k P_i & R_{s_eq} &= \frac{R_s}{k} \\
 r_{req} &= \frac{R_r}{k} & X_{seq} &= \frac{X_s}{k} & X_{req} &= \frac{X_r}{k} \\
 X_{m_eq} &= \frac{X_m}{k} \\
 C_{DC\ bus_eq} &= \sum_{i=1}^k C_{DC\ bus-i} \\
 H_{t_eq} &= \frac{1}{S_{eq}} \sum_{i=1}^k H_{t_i} S_i \\
 H_{g_eq} &= \frac{1}{S_{eq}} \sum_{i=1}^k H_{g_i} S_i \\
 K_{eq} &= \frac{1}{S_{eq}} \sum_{i=1}^k K_i S_i
 \end{aligned} \tag{7}$$

ایجادشده به روش معادل‌سازی پیشنهادی، به‌نحو مطلوبی بر مدل دقیق منطبق‌اند. همچنین از مشاهده نتایج زمان‌های حل سیستم مشخص شد که زمان حل سیستم دینامیکی در روش معادل‌سازی پیشنهادی به‌وضوح کاهش می‌یابد که این موضوع از کاهش پیچیدگی محاسبات و پیرو آن از کاهش زمان محاسبات حکایت می‌کند. به‌این‌ترتیب هدف معادل‌سازی محقق می‌شود. همان‌طور که به‌وضوح در شکل‌ها نشان داده شد، اگر بادها و پارامترها به یک گروه معادل‌سازی شوند، مشخصه خروجی دارای خطا و انحراف از مدل دقیق می‌باشد.

پیوست‌ها

جدول پ-۱: پارامترهای روتور و استاتور

Nom. Power (MVA)	H(s)	L_m (pu)
۱/۶۶۶۷	۵/۰۴	۲/۹
$(pu)L_s$	$(pu)R_s$	$(pu)L_r$
$۵/۱۳ \times 10^{-۲}$	$۲/۱۱۸ \times 10^{-۲}$	$۴/۶۸ \times 10^{-۲}$
$(pu)R_r$		
۱۵×10^{-۴}		

جدول پ-۲: پارامترهای مبدل

Converter maximum power(pu)	Nominal DC bus voltage(V)	DC bus capacitor(F)
۵×10^{-۱}	۱۲۰۰	۶×10^{-۲}
Grid side coupling inductor(pu)	Grid side coupling resistance(pu)	
$۱/۵ \times 10^{-۱}$	$۱/۵ \times 10^{-۳}$	

جدول پ-۳: پارامترهای خط انتقال

R(ohm/km)	L(H/km)	C(F/km)
$۱/۱۵۳ \times 10^{-۱}$	$۱/۰۵ \times 10^{-۳}$	$۱/۱۳۳ \times 10^{-۸}$
Length(km)		
۱۰	۲۰	

جدول پ-۴: پارامترهای ترانس‌ها ($Yg\Delta$)

	P_n (MVA)	f_n (Hz)	R_1 (pu)	L_1 (pu)
T1	۴۷	۶۰	$۲/۶ \times 10^{-۳}$	۸×10^{-۲}
T2	۱۲	۶۰	۸×10^{-۴}	$۲/۵ \times 10^{-۲}$
	R_2 (pu)	L_2 (pu)	R_m (pu)	L_m (pu)
T1	$۲/۶ \times 10^{-۳}$	۸×10^{-۲}	۵۰۰	۵۰۰

سپس به معادل‌سازی پارامترها پرداخته می‌شود. نتایج و نمودارها نشان می‌دهند که مشخصه‌های خروجی در سیستم معادل ایجادشده به روش پیشنهادی شباهت و تطبیق بسیار خوبی بر مدل دقیق دارد و همچنین میزان خطا یا انحراف ناشی از معادل‌سازی سرعت‌های باد با فرض این‌که در یک خوشه باشند، در شکل‌ها به‌وضوح قابل‌مشاهده است.

۷- زمان‌های حل سیستم‌های دینامیکی

متناظر با تک‌تک سیستم‌های دینامیکی شبیه‌سازی‌شده در این مقاله، یک زمان حل به‌دست‌آمده که در جدول ۴ قابل‌مشاهده است. کاهش زمان حل، به‌منزله کاهش پیچیدگی محاسبات هم می‌باشد [۱، ۲]. نتایج به‌وضوح یک صرفه‌جویی ۳۸/۵۴ درصدی از زمان محاسبه را در روش معادل‌سازی پیشنهادی چندماشینی نشان می‌دهند. همچنین یک کاهش زمانی ۹۰ درصدی در روش تک‌ماشینی قابل‌مشاهده است ولی همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد نتایج شکل خروجی توان‌ها در مدل تک‌ماشینی معادل، دارای انحراف از مدل دقیق است و این نشان می‌دهد که هر مقداری نمی‌توان محاسبات را کاهش داد و درعین‌حال انتظار داشت که نتایج دقیقی حاصل شود.

جدول ۴: زمان محاسبات سیستم در مدل‌ها

مدل‌های دینامیکی	زمان حل سیستم
مدل دقیق	۰۲:۰۱.۹۱"
مدل چندماشینی معادل پیشنهادی	۰۱:۱۴.۹۲"
مدل تک‌ماشینی معادل	۰۰:۱۲.۱۵"

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، در ابتدا به بیان اهمیت موضوع گروه‌بندی و معادل‌سازی سرعت‌های ورودی باد و نیز معادل‌سازی پارامترهای ژنراتورها، پرداخته و بیان شد که در اینجا به‌طور خاص از اطلاعات ناشی از دسته‌بندی سرعت‌های ورودی باد در معادل‌سازی دینامیکی استفاده می‌شود. شبکه عصبی به‌عنوان یک ابزار برای رگرسیون‌گیری پیشنهاد و ساختار آن ایجاد گردید و از آن ابزار برای نشان‌دادن میزان همبستگی توان خروجی به سرعت‌های باد ورودی استفاده شد و به‌دنبال آن میزان تأثیر معادل‌سازی سرعت‌های باد بر توان خروجی و نیز اهمیت آن در فضای ویژگی، مورد تحقیق و تأیید قرار گرفت. در ادامه این بررسی‌ها، رابطه‌ای جهت محاسبه درایه‌های ماتریس فضای ویژگی پیشنهاد شد که در نتیجه با ارائه یک الگوریتم خوشه‌بندی، کار دسته‌بندی ادامه یافت. لازم به‌ذکر است که الگوریتم پیشنهادی برای خوشه‌بندی، الگوریتم خوشه‌بندی فازی است که به‌راحتی در نقطه بهینه محلی اسیر نمی‌شود. سپس معادل‌سازی سرعت‌های ورودی باد در هر خوشه در یک بازه زمانی مشخص انجام شد. همچنین پارامترهای ژنراتور معادل در هر خوشه مبتنی بر خوشه‌بندی و روابط ارائه‌شده، محاسبه شدند؛ و سپس به بررسی توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی پرداخته شد. در نهایت مشخص گردید که توان‌های خروجی سیستم معادل

- [13] Y. Feng and S. M. Ryan, "Scenario Reduction for Stochastic Unit Commitment with Wind Penetration," *IEEE conference and exposition, PES General meeting*, 2014.
- [14] Q. Zhu, M. Ding and P. Han, "Equivalent modeling of DFIG-based wind power plant considering crowbar protection," *Mathematical Problems in Engineering*, 2016.
- [15] H. Ye, W. Pei, Z. Qi, "Analytical modeling of inertial and droop responses from a wind farm for short-term frequency regulation in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3414–3423, 2016.
- [16] محمدرضا رحیمی و محسن اسماعیلی، «طراحی کنترل کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیشگی در توربین بادی DFIG- 710 kW نصب شده در سایت بینالود»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۱۲۴-۱۳۴، ۱۳۹۵.
- [17] میلاد دلالی و علیرضا جلیلیان، «محاسبه آلودگی هارمونیک و میان هارمونیک ژنراتورهای القائی دو سو تغذیه بادی با استفاده از یک روش ترکیبی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۲، شماره ۲، صفحه ۲۵-۳۷، ۱۳۹۱.
- [18] M. N. S. Swamy and K. L. Du, *Neural Networks and Statistical Learning*. 2014th ed, 2014.
- [19] H. Quan, D. Srinivasan and A. Khosravi, "Short-Term load and wind power Forecasting Using Neural Network-Based Prediction Intervals," *IEEE Transaction on neural networks and learning systems*, vol. 25, no. 2, pp. 303-315, 2014.
- [20] H. A. Mohammad pour and E. Santi, "Modeling and Control of Gate-Controlled Series Capacitor Interfaced With a DFIG-Based Wind Farm," *IEEE transaction on industrial electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 1022-1033, 2015.
- [21] L. M. Fernandez, J. R Saenz and F. Jurado, "Dynamic models of wind farms with fixed speed wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 8, no. 31, pp. 1203–1230, 2006.
- [22] M. P. Aoller and S. Achilles, "Aggregated wind park models for analyzing power system dynamics", In Proceedings of the 4th international workshop on large-scale integration of wind power and transmission networks for offshore wind farms, Billund, Denmark, 2003.

T2	8×10^{-4}	$2/5 \times 10^{-2}$	500	∞
	$V_1:V_2$ (kv)			
T1	۱۲۰:۲۵			
T2	۲۵ :۰/۵۷۵			

مراجع

- [1] L. M. Fernandez, F. Jurado and J. R. Saenz, "Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 129-140, 2008.
- [2] L. M. Fernandez, C. A. Garcia and J. R. Saenz "Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 3, pp. 691–704, 2009.
- [3] H. Q. Zhou, Z. P. Song, J. P. Wang and Y. Xue, "A Review on Dynamic Equivalent Methods for Large Scale Wind Farms," *Proceedings of the 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp.1-7, 2011.
- [4] J. Zou, C. Peng, Y. Yan, H. Zheng Hong and Y. Li, "A survey of dynamic equivalent modeling for wind farm," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 956–963, 2014.
- [5] P. M. Anderson and B Anjan, "Stability simulation of wind turbine systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3791–3795, 1983.
- [6] Manitoba HVDC Research Centre Inc. *PSCAD Users Guide [Z]. Manitoba*, Canada, 2003.
- [7] H. Ya-juan, *Study on the whole model of wind farms based on the measured data*. Jilin: Northeast Dianli University, 2007.
- [8] L. M. Fernandez, C. A. Garcia and J. R. Saenz "Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 3, pp. 691–704, 2009.
- [9] J. Brochu, C. Larose and R Gagnon, "Validation of single and multiple-machine equivalents for modeling wind power plants [J]," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 532–541, 2011.
- [10] V. Akhmatov and H. Knudsen, "An aggregate model of a grid-connected, large-scale offshore wind farm for power stability investigations: importance of Windmill Mechanical System," *international journal of Electrical Power and Energy Systems*, no. 24, pp. 709–717, 2002.
- [11] H. Zareipour, D. Huang and W. Rosehart, "Wind power ramp events classification and forecasting: A data mining approach," in *Proceedings of IEEE Power Energy Society General Meeting*, pp. 1–3, San Diego, CA, USA, 2011.
- [12] R. Sevljan and R. Rajagopal, "Detection and statistics of wind power ramps," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3610–3620, 2013.

زیر نویس ها

⁸ Validation

⁹ Feature space

¹⁰ Performance

¹¹ Tansig

¹² Purelin

¹³ Levenberg-marquardt

¹⁴ Mean square error

¹⁵ Fuzzy c-means

¹⁶ Fitness

¹⁷ Multi machine model

¹ Wind power ramp events

² Support vector machines

³ Monte Carlo

⁴ Doubly fed induction generator

⁵ Optimal tracking strategy

⁶ Normal wind speed

⁷ Neural networks

¹⁸ Single machine model