

طراحی کنترل‌کننده فازی عصبی بهینه برای توربین بادی سرعت ثابت

حمیدرضا ایزدفر^۱، رضا نیکزاد^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران

hrizadfar@semnan.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران

rezanikzad@semnan.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک کنترل‌کننده فازی عصبی تطبیقی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک برای بهبود عملکرد توربین بادی سرعت ثابت طراحی شده است. این کنترل‌کننده در ابتدا با راه‌اندازی نرم، کاهش دامنه جریان هجومی و کاهش بیشینه گشتاور الکترومغناطیسی را در لحظه اتصال ژنراتور باعث می‌شود. همچنین پس از راه‌اندازی و در طی عملکرد معمول توربین، با کنترل بهینه زاویه پره توربین، باعث جذب حداکثر انرژی باد و کاهش نوسانات توان خواهد شد. برای هر بخش کنترلی، متغیرهای ورودی مناسب با تابع هدف در نظر گرفته خواهند شد. توابع عضویت پارامترهای خروجی در بخش فازی کنترل، تابعی خطی از توابع عضویت ورودی‌ها انتخاب می‌شوند. برای کاهش جریان راه‌اندازی، زاویه آتش سوئیچ‌های مبدل و برای عملکرد معمول، زاویه پره توربین کنترل خواهند شد. علاوه بر روش پیشنهادی، کنترل مد نظر با دو روش فازی و فازی عصبی تطبیقی بهینه‌نشده، انجام و هر سه روش با هم مقایسه خواهند شد. محدودسازی جریان راه‌اندازی و ملایم‌سازی نوسانات توان در عملکرد عادی توربین به خوبی با روش مذکور صورت می‌پذیرد.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، راه‌انداز نرم، زاویه پره، فازی عصبی تطبیقی

۱- مقدمه

جذب توان راکتیو زیادی نیازمندند. برای جذب چنین توانی، جریان هجومی بزرگی در لحظه اولیه از شبکه کشیده می‌شود. جریان هجومی و گشتاور الکترومغناطیسی بزرگ تولیدی در لحظه راه‌اندازی، آسیب سیستم الکتریکی و مکانیکی را باعث می‌شوند. شوک و لرزش زیاد ناشی از اتصال مستقیم ژنراتور به شبکه، آسیب به گیربکس و کوپلینگ‌ها و گاهی فروپاشی ولتاژ بعد از بروز خطا در شبکه را باعث می‌شوند [۲]. ممکن است تغییرات ولتاژ ناشی از کلیدزنی اتصال ژنراتور به شبکه نیز رخ دهد.

توربین‌های بادی با ژنراتورهای القایی مستقیم وصل شده به شبکه با توان بیشتر از ۸۰۰KW معمولاً به راه‌انداز نرم مجهز هستند [۳]. وظیفه اصلی راه‌انداز نرم، ایجاد یک ایزولاسیون الکتریکی بین توربین و شبکه برای زمان بسیار کوتاه در لحظه راه‌اندازی است [۳]. این راه‌انداز، جریان هجومی و ضربان گشتاور را با افزایش تدریجی ولتاژ در

در سال‌های اخیر توربین‌های بادی همچون سایر منابع انرژی تجدیدپذیر با پیشرفت تکنولوژی و گسترش کاربرد و روبرو بوده‌اند. کاهش هزینه و بهبود کیفیت انرژی تولیدی از موضوعات دلخواه مراجع مختلف به شمار می‌روند. بیشینه‌سازی انرژی جذب‌شده از باد نیز یکی از توابع هدف اصلی در مطالعات طراحی این توربین‌هاست [۱]. توربین‌های بادی سرعت ثابت، عموماً ژنراتور القایی دارند؛ بنابراین در لحظه راه‌اندازی و به‌منظور مغناطیس‌کنندگی به

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۹۵/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۳/۱۰

نام نویسنده مسئول: حمیدرضا ایزدفر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - دانشگاه سمنان - دانشکده مهندسی برق

کنترل‌کننده PID کار دشواری خواهد بود. کنترل‌کننده‌های فازی به مدل دقیق ریاضی سیستم کنترلی نیاز ندارند. این کنترل‌کننده‌ها برای سیستم‌های پیچیده، متغیر با زمان و مدل‌های غیرخطی بسیار مناسب هستند. امروزه روش‌های کنترل هوشمند دیگری نظیر شبکه‌های عصبی و کنترل‌کننده‌های فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) نیز در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی به شکل وسیع استفاده می‌شوند. در واقع، سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی یک نوع کنترل‌کننده فازی است که با دریافت داده‌هایی از ورودی‌ها و خروجی، توزیع بهینه توابع عضویت را تخمین می‌زند و رفتار کنترلی سیستم را از روی داده‌ها پیش‌بینی می‌کند. مزیت کنترل‌کننده فازی عصبی نسبت به کنترل‌کننده‌های فازی معمولی در قابلیت خود بهینه‌سازی و حداقل‌سازی خطای آموزش است. در واقع، ANFIS از شبکه‌های عصبی استفاده می‌کند تا یک کنترل‌کننده فازی از نوع تاکاگی - سوگنو را به شکل بهینه تنظیم کند [۹]. در [۱۰-۱۱] نمونه‌ای از کاربرد ANFIS در افزایش کارایی و کاهش تلفات توان در راه‌اندازی ماشین‌های القایی آمده است. علاوه بر جریان هجومی، نوسانات توان خروجی توربین بادی از دیگر موضوعات مهم کیفیت عملکرد توربین به‌شمار می‌رود. مرجع [۱۰] استراتژی‌های ملایم‌سازی نوسانات توان، نظیر سیستم‌های بر پایه ذخیره‌ساز انرژی بدون آن را مرور کرده است.

یکی از دغدغه‌های اصلی استفاده از سیستم کنترل زاویه پره، طراحی کنترل‌کننده مناسب برای آن است. در مرجع [۱۲] یک کنترل‌کننده PID بر مبنای روش مکان ریشه برای کنترل زاویه پره توربین‌های بادی سرعت ثابت طراحی شده است. مرجع [۱۳] دو مدل کنترلی ساده شده بر مبنای مدل سیستم کنترل زاویه پره ارائه کرده است. یک کنترل‌کننده زاویه گام پره با استفاده از روش کنترل حالت لغزان در [۱۴] معرفی شده است. اثر مدل کنترل‌کننده زاویه پره بر رفتار حالت گذرای مزارع بادی متصل به شبکه، از نظر اغتشاشات الکتریکی و مکانیکی، در مرجع [۱۵] بررسی شده است.

در مرجع [۱۶] یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل توان اکتیو و راکتیو تولیدی توربین بادی سرعت ثابت طراحی شده است. این کنترل‌کننده با دریافت ولتاژ استاتور و

ژنراتور کاهش می‌دهد. همچنین افت ولتاژ ناشی از جریان راه‌اندازی بزرگ کاهش می‌یابد.

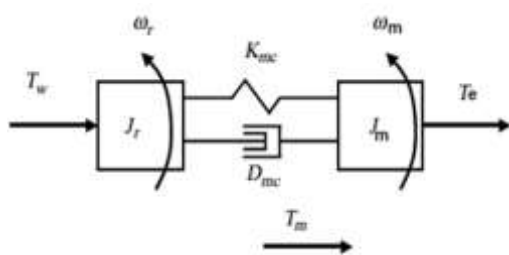
کاهش مصرف انرژی راه‌انداز نرم با کاهش ولتاژ اعمالی به ماشین زمانی به دست می‌آید که گشتاور بار مورد نیاز بتواند در شاری کمتر از شار نامی ماشین تولید شود. این روش تلفات هسته و تلفات مسی استاتور را نیز کاهش می‌دهد. تنظیم متناسب شار مغناطیسی با بار و کاهش تلفات ماشین، افزایش راندمان در لحظه راه‌اندازی را باعث می‌شود [۴]. از دیگر مزایای استفاده از راه‌انداز نرم، جبران‌سازی استاتیکی توان راکتیو ژنراتور در لحظه راه‌اندازی است [۵]. به علت اثر غیرخطی و هارمونیک‌زاد بودن ادوات الکترونیک قدرت و کاهش تلفات کل سیستم، بعد از اتمام پروسه راه‌اندازی، راه‌انداز نرم از مدار خارج می‌شود. برخی از روش‌های راه‌اندازی نرم و همچنین افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف انرژی در لحظه راه‌اندازی موتورها و ژنراتورهای القایی در [۸-۶] معرفی شده است.

پارامتر اصلی کنترل راه‌انداز، پالس آتش اعمالی به تایریستورهاست که با یک زاویه تأخیر مشخص در هر سیکل به آن اعمال می‌شود. با تغییر این زاویه، زمان روشن شدن تایریستور در آن سیکل تغییر می‌یابد. زاویه آتش مناسب برای راه‌اندازی سیستم با توجه به ضریب توان سیستم تعیین می‌شود. برای زوایای آتش کمتر از ۱۵۰ درجه رابطه بین زاویه آتش و ولتاژ خروجی ژنراتور کاملاً غیرخطی است و به ضریب توان ژنراتور بستگی دارد [۸]. زاویه آتش مناسب برای راه‌اندازی ژنراتور القایی که خاصیت اهمی - سلفی دارد، کمتر از ۹۰ درجه است.

برای کنترل مستقیم زاویه آتش معمولاً از یک کنترل‌کننده حلقه بسته به منظور تنظیم جریان راه‌اندازی در یک مقدار مطلوب استفاده می‌شود. کنترل‌کننده با مقایسه مقادیر خروجی و مرجع، زاویه آتش مطلوب راه‌انداز را تولید می‌کند. یکی از پرکاربردترین کنترل‌کننده‌ها در سیستم‌های الکتریکی، نوع کلاسیک PID است. کنترل‌کننده PID، ساختاری ساده، پایداری خوب و قابلیت اطمینان بالا دارد. PID براساس مدل دقیق ریاضی سیستم طراحی می‌شود. مدل کنترلی توربین بادی با ژنراتور القایی از نوع مرتبه بالا و غیرخطی است؛ بنابراین طراحی دقیق

۲- مدل توربین بادی سرعت ثابت

توربین بادی سرعت ثابت متشکل از اجزا مختلفی چون ژنراتور القایی، رتور و جعبه دنده، سیستم‌های کنترلی، سیستم‌های انحراف و ترمز، دکل و... است. در شبیه‌سازی‌های سیستم‌های قدرت، معمولاً رفتار توربین بادی سرعت ثابت از مدل رتور، پیشرانه و سیستم تولید با یک ژنراتور القایی قفس سنجابی و خازن‌های جبران‌ساز ارزیابی می‌شود. مدل پیشرانه با دو جرم بیان می‌شود. جرم اول بیان‌کننده رتور توربین بادی (پره‌ها و شفت سرعت پایین) و جرم دوم بیان‌کننده رتور ژنراتور (شفت سرعت بالا) است. شکل (۱) آن را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل پیشرانه توربین

روابط ریاضی حاکم بر این بخش به صورت زیر است.

$$T_w - T_m = J_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (1)$$

$$T_m = D_{mc}(\omega_r - \omega_g) + K_{mc} \int (\omega_r - \omega_g) dt \quad (2)$$

$$T_m - T_e = J_m \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3)$$

که در آن ω_r , J_r , ω_m , J_m ، به ترتیب سرعت و اینرسی توربین بادی و ژنراتور، T_e و T_m نیز به ترتیب، گشتاور مکانیکی ژنراتور و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور هستند. پارامترهای K_{mc} و D_{mc} نیز، ضرایب سختی و میرایی کوپلینگ‌های مکانیکی هستند. معادلات ولتاژ، شارهای پیوندی و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور نیز به صورت زیر هستند.

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + p \lambda_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + p \lambda_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

سرعت باد ورودی، زاویه پره توربین و نوسانات توان اکتیو و راکتیو را کنترل می‌کند. در [۱۷] یک کنترل‌کننده هیبرید شامل کنترل‌کننده‌های فازی و PI طراحی شده است. کنترل‌کننده با دریافت پارامترهای خطای سرعت ژنراتور و مشتق آن، ضرایب K_p و K_i را در PI تولید می‌کند. در مراجع [۲۰-۱۸] نیز نمونه‌هایی از کنترل‌کننده‌های فازی زاویه پره توربین بادی با ورودی‌ها و شرایط متفاوت طراحی شده‌اند.

طراحی کنترل‌کننده بهینه و مطلوب برای کنترل زاویه پره توربین در شرایط کاری مختلف همواره اهمیت خاصی دارد. در این مقاله، یک کنترل‌کننده فازی - عصبی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک، طراحی و تنظیم شده است. کنترل‌کننده مذکور ابتدا با در نظر گرفتن گشتاور و سرعت ژنراتور ورودی، وظیفه کنترل بهینه راه‌انداز را بر عهده دارد، سپس در عملکرد معمول توربین، با کنترل زاویه پره، کیفیت پارامترهای خروجی را تضمین می‌کند. عموم روش‌های کنترل بهینه صورت گرفته بر توربین‌های بادی به صورت فازی یا ژنتیک به تنهایی است. استفاده از الگوریتم ژنتیک در یافتن ضرایب بهینه مشارکت توابع عضویت و نیز ورودی‌های تعریف شده برای کنترل‌کننده، از نقاط تمایز این تحقیق با پژوهش‌های پیشین به شمار می‌رود. الگوریتم ژنتیک وظیفه تنظیم بهینه پارامترهای فازی سوگنو - تاکاگی را به عهده دارد. همچنین یکی از دیگر وجوه تمایز این مقاله با تحقیقات گذشته در نظر گرفتن دو تابع هدف در کنترل توربین بادی است. ابتدا در مرحله راه‌اندازی با کنترل زاویه آتش، جریان هجومی ژنراتور در محدوده مجاز و مناسب قرار می‌گیرد. سپس با رسیدن سرعت توربین به مقدار سنکرون، کنترل راه‌انداز به اتمام می‌رسد و زاویه پره توربین برای کاهش نوسانات توان اکتیو به عنوان متغیر کنترلی مدنظر قرار می‌گیرد.

سایر بخش‌های مقاله به شرح زیر است. در بخش ۲ مدل توربین بادی و روابط الکتریکی و مکانیکی حاکم بر آن بیان می‌شود. بخش ۳ روش طراحی کنترل‌کننده را تشریح می‌کند. سرانجام در بخش ۴ نتیجه مقاله آمده است.

طراحی کنترل کننده فازی عصبی بهینه برای توربین بادی سرعت ثابت

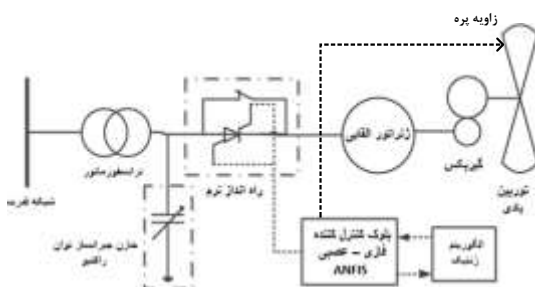
مطابق رابطه (۷) به ازای هر تابع عضویت برای هر ورودی ۲ پارامتر و طبق رابطه (۸) برای هر تابع عضویت خروجی ۳ پارامتر وجود خواهد داشت. شکل (۴) نمایی از ساختار کروموزوم (متغیرهای تصمیم) را برای آموزش ANFIS نشان می دهد که i و j و k به ترتیب تعداد ورودی ها، تعداد توابع عضویت هر ورودی و تعداد توابع عضویت خروجی (یا تعداد خروجی) هستند؛ بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم، $3 \times 3 \times j \times i$ عدد است. محدوده تغییر پارامترها بین $100^{-0.05}$ تا $1000^{0.05}$ و بسیار کوچک انتخاب می شوند.

تابع هزینه برای الگوریتم در این مسئله معیار جندر میانگین مربعات خطا یا RMSE است. خطای آموزش به صورت اختلاف بین خروجی هدف و خروجی واقعی کنترل کننده تعریف می شود. RMSE به صورت رابطه (۹) بیان می شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i^{Target} - P_i^{Output})^2} \quad (9)$$

جدول (۱): مشخصات ژنراتور و توربین [۲۱]

پارامتر	مقدار	واحد
توان نامی ژنراتور	۲/۳	مگا وات
توان مکانیکی توربین	۲/۳۴۴	مگا وات
ولتاژ نامی	۶۹۰	ولت
فرکانس	۵۰	هرتز
سرعت نامی روتور	۱۵۱۲	دور در دقیقه
جریان نامی استاتور	۲۱۶۸	آمپر
ضریب توان نامی	۰/۸۸۸	-
لغزش نامی	-۰/۰۰۸	-
تعداد جفت قطب	۲	-



شکل (۲): توربین بادی و کنترل کننده

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = (L_{ls} + L_m)i_{ds} + L_m i_{dr} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \lambda_{qs} = (L_{ls} + L_m)i_{qs} + L_m i_{qr} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \lambda_{dr} = (L_{lr} + L_m)i_{dr} + L_m i_{ds} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \lambda_{qr} = (L_{lr} + L_m)i_{qr} + L_m i_{qs} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (6)$$

۳- طراحی کنترل کننده توربین بادی

شمای کلی سیستم توربین بادی به همراه کنترل کننده مدنظر در شکل (۲) مشاهده می شود. این سیستم شامل توربین بادی، سیستم کنترل، ترانسفورماتور اتصال به شبکه است. سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی یا ANFIS کنترل کننده هوشمند برای این سیستم است. ساختار پایه کنترل کننده فازی عصبی بر طبق کنترل کننده فازی از نوع تاکاگی - سوگنو است.

ورودی های کنترل کننده برای راه اندازی نرم، گشتاور الکترومغناطیسی و سرعت محور ماشین و برای کاهش نوسانات توان در عملکرد معمول توربین، خطای توان اکتیو ژنراتور و سرعت باد است. خروجی های کنترل کننده در مرحله راه اندازی، زاویه آتش و برای کاهش نوسانات توان در عملکرد معمول زاویه پره توربین هستند. توابع عضویت ورودی ها از جنس تابع گوسی و به صورت رابطه (۷) هستند.

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right] \quad (7)$$

که در آن a و σ به ترتیب نقطه مرکزی و واریانس تابع گوسی است که به صورت بهینه با ANFIS تعیین می شوند. مشخصات اصلی توربین و ژنراتور مدنظر مطابق جدول (۱) هستند.

۳-۱- کنترل راه انداز نرم

بلوک دیاگرام کنترلی راه انداز در شکل (۳) آمده است. تابع عضویت خروجی k ام از نوع خطی و به صورت رابطه (۸) تعریف می شود.

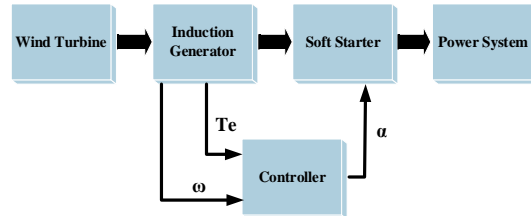
$$\alpha_k = A_k T_e + B_k \omega_m + C_k \quad (8)$$

که در آن A_k ، B_k و C_k ضرایب دلخواه برای خروجی k ام هستند که با ANFIS به صورت بهینه تعیین می شوند.

شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترلی راه‌انداز نرم

a_{11}	σ_{11}	a_{21}	σ_{21}	A_1	B_1	C_1	a_{12}	σ_{12}	a_{22}	σ_{22}	A_2	B_2	C_2	a_{ij}	σ_{ij}	A_k	B_k	C_k
----------	---------------	----------	---------------	-------	-------	-------	----------	---------------	----------	---------------	-------	-------	-------	-------	----------	---------------	-------	-------	-------

قبل از شروع شبیه‌سازی، آموزش کنترل‌کننده فازی - عصبی با الگوریتم ژنتیک، انجام و کنترل‌کننده بهینه تولید شده برای شبیه‌سازی سیستم استفاده می‌شود. در هنگام پروسه راه‌اندازی همواره دو پارامتر گشتاور الکترومغناطیسی و سرعت محور ژنراتور با کنترل‌کننده دریافت می‌شود. با اتصال توربین بادی به شبکه، گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی ژنراتور القایی پس از رسیدن به مقدار بیشینه به صفر میل می‌کند و هم‌زمان سرعت ژنراتور به سرعت سنکرون نزدیک می‌شود. به تبع آن جریان ژنراتور نیز از مقدار ماکزیمم کاهش می‌یابد.



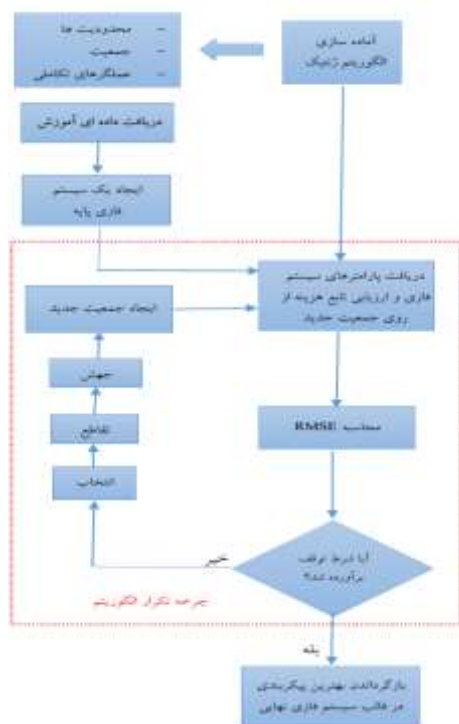
شکل (۴): ساختار کروموزوم برای آموزش ANFIS

N تعداد کل داده‌های آموزش است. به علت پیچیده و غیرخطی بودن سیستم، استخراج رابطه ریاضی تابع هدف بسیار دشوار و گاه غیرممکن است؛ بنابراین، از مدل فازی سیستم برای محاسبه تابع هدف استفاده می‌شود. با نوشتن پایگاه قواعد مناسب با استفاده از تحلیل سیستم، مدل فازی آن طراحی می‌شود. فلوچارت پروسه کاری الگوریتم در شکل (۵) آمده است. همچنین در جدول (۲) پارامترهای الگوریتم ژنتیک در کنترل‌کننده فازی عصبی ذکر شده‌اند. توابع عضویت ورودی و خروجی‌های کنترل‌کننده در شکل (۶) آمده است. توابع عضویت خروجی‌های سوگنو به صورت تابع هستند.

جدول (۲): پارامترهای ژنتیک در کنترل فازی - عصبی

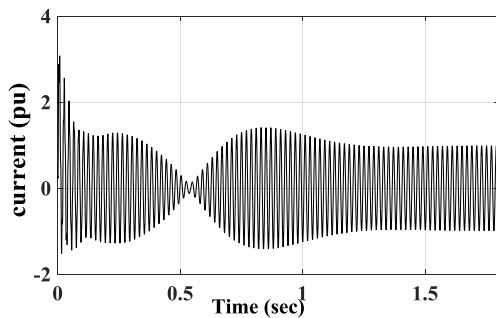
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
جمعیت اولیه	۱۰۰	نرخ جهش	۰/۰۵
تعداد نسل	۱۰۰۰	فشار انتخاب	۸
نرخ تقاطع	۰/۷	روش انتخاب	چرخ طیار
i	۲	j	۲۰
k	۲۰	تعداد قوانین فازی	۲۰

شکل (۷) خروجی ANFIS آموزش دیده به کمک الگوریتم ژنتیک در مقایسه با مقدار خروجی مطلوب در داده‌های آموزش یکسان و همچنین خطای آموزش و معیار RMSE را برای ۱۱۰ نمونه داده آموزش نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی راه‌انداز توربین بادی، سرعت باد ۱۱m/s فرض می‌شود. در زمان $t=0$ تمام شرایط اولیه الکتریکی سیستم صفر است و تنها ژنراتور، سرعت اولیه ۱۴۷۰rpm یا لغزش ۰/۰۳۳ را دارد. در ثانیه $t=0/8$ ماشین به سرعت سنکرون رسیده است و راه‌انداز با بریکرها اتصال کوتاه می‌شود. درخور ذکر است توربین به صورت پیش‌فرض راه‌انداز مکانیکی دارد؛ یعنی در ابتدای راه‌اندازی تا لحظه رسیدن ژنراتور به سرعت سنکرون گشتاور مکانیکی اعمالی به ژنراتور حدود ۰/۲pu است و به محض رسیدن ژنراتور به سرعت سنکرون (۱۵۰۰ rpm) گشتاور اعمالی به ژنراتور ۱ pu می‌شود.

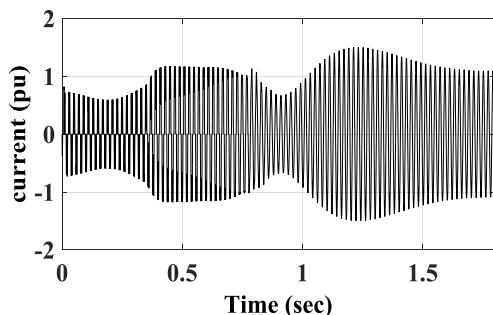


شکل (۵): فلوچارت الگوریتم ژنتیک

طراحی کنترل کننده فازی عصبی بهینه برای توربین بادی سرعت ثابت



شکل (۸): جریان ژنراتور بدون راه انداز



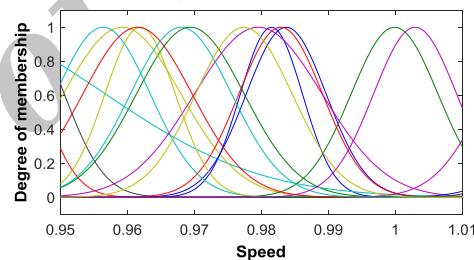
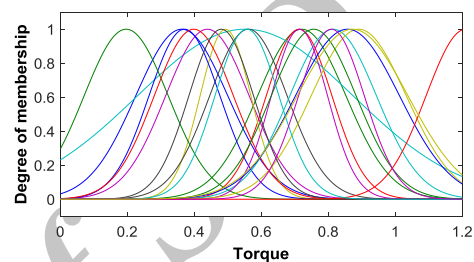
شکل (۹): جریان ژنراتور با راه انداز پیشنهادی

شکل (۱۰) زوایای آتش کلیدهای تعیین شده با روش پیشنهادی را نشان می دهد. همچنین در شکل (۱۱) نمای سه بعدی پاسخ این کنترل کننده دیده می شود.

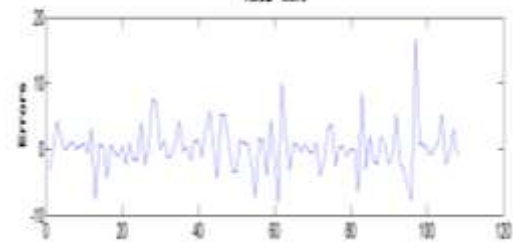
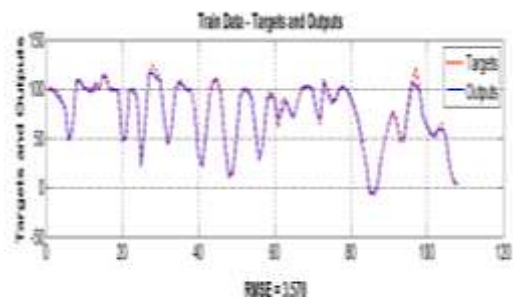
به منظور تعیین کیفیت روش پیشنهادی، کنترل راه انداز نرم علاوه بر روش پیشنهادی (فازی عصبی تطبیقی بهینه)، با دو روش فازی و فازی عصبی تطبیقی نیز، انجام و نتایج مقایسه می شود.

دامنه جریان راه اندازی حاصل از سه روش مختلف کنترلی در شکل (۱۲) آمده است. دامنه جریان ابتدایی با روش پیشنهادی، مقدار کوچک تر و مطلوب تری را داراست. شکل های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب، تغییرات توان راکتیو و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور را در راه اندازی نشان می دهند. گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی در ژنراتور نیز در روش پیشنهادی کاهش یافته است. علت آن کم تر بودن جریان راه اندازی در ژنراتور است. کاهش این گشتاور به معنی کاهش گشتاور مکانیکی توربین و تنش کمتر است.

بیشترین مقدار جریان راه اندازی در لحظه ای است که گشتاور الکترومغناطیسی و لغزش، هر دو در بیشترین مقدار مثبت خود باشند؛ بنابراین، کنترل کننده باید در این حالت بیشترین زاویه آتش را تولید کند تا ولتاژ پایانه ژنراتور کوچک باشد و ژنراتور توان راکتیو کمتری از شبکه بکشد و در نتیجه، جریان ژنراتور کاهش یابد. شکل های (۸) و (۹) جریان راه اندازی را در دو حالت بدون کنترل و با روش پیشنهادی مقاله نشان می دهد.

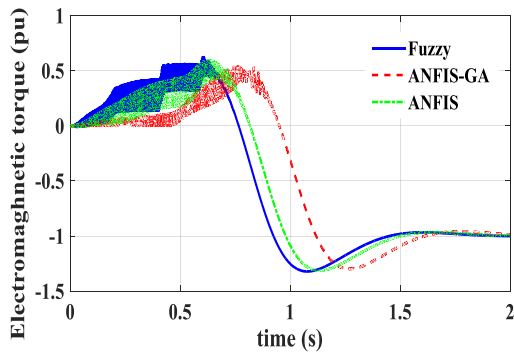


شکل (۶): توابع عضویت ورودی های کنترل کننده

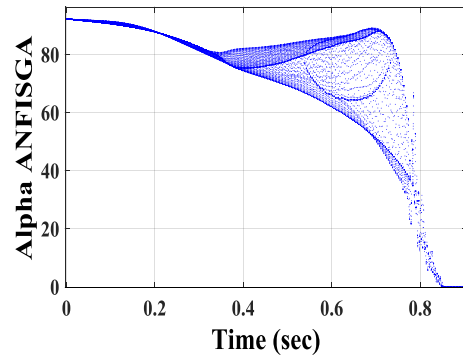


شکل (۷): خروجی ANFIS آموزش دیده با الگوریتم ژنتیک

در مقایسه با مقدار خروجی مطلوب



شکل (۱۴): گشتاور ژنراتور در حضور کنترلرهای مختلف



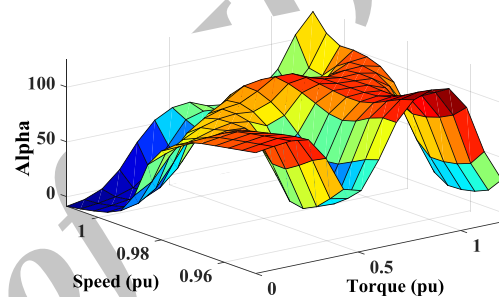
شکل (۱۰): زوایای آتش به دست آمده با الگوریتم پیشنهادی

۳-۲- کنترل زاویه پره توربین

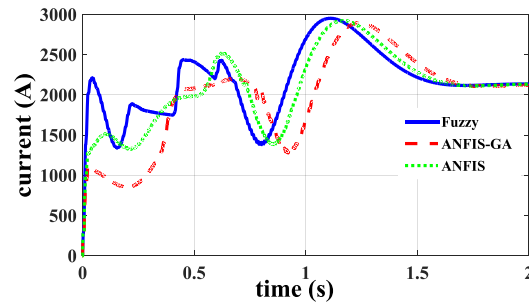
در حین کار عادی، ملایم‌سازی تغییرات توان اکتیو ژنراتور برای توربین بادی اهمیت دارد. یکی از روش‌های مناسب کنترل نوسانات توان اکتیو، کنترل زاویه پره است؛ البته همه توربین‌های بادی، بخش متحرک در پره‌های توربین را ندارند. این قابلیت معمولاً در توربین‌های بادی سرعت ثابت با محور افقی وجود دارد. در این بخش کنترل‌کننده با روش فازی عصبی تطبیقی بهینه‌شده با ژنتیک این مهم را انجام می‌دهد. روش الگوریتم کاملاً مشابه حالت قبل (شکل ۵) و پارامترهای تنظیمی ژنتیک نیز مطابق جدول ۲ است. بلوک دیاگرام کنترلی سیستم در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود. در طراحی کنترلر، از دو پارامتر خطای توان اکتیو و سرعت باد برای آموزش استفاده می‌شود و خروجی، زاویه پره توربین است. تابع عضویت خروجی، تابعی خطی و مطابق رابطه ۱۰ است.

$$\beta_k = A_k \Delta P + B_k \omega + C_k \quad (10)$$

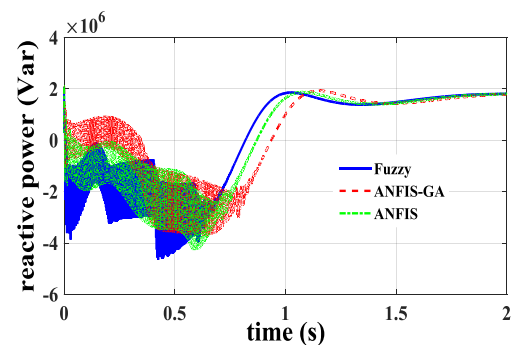
ΔP و ω ، خطای توان اکتیو و سرعت باد (ورودی‌های کنترلر) و β زاویه پره توربین است. مقادیر بهینه ضرایب A_k ، B_k و C_k نیز با ANFIS تعیین می‌شوند. جدول (۳) اطلاعات کنترلی ANFIS را ارائه می‌دهد.



شکل (۱۱): پاسخ سه بعدی کنترل‌کننده



شکل (۱۲): جریان راه‌اندازی با روش‌های مختلف کنترلی



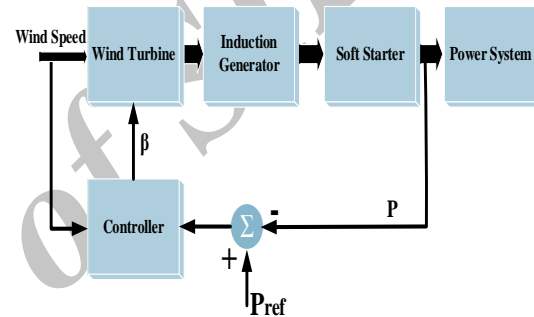
شکل (۱۳): توان راکتیو ژنراتور در حضور کنترلرهای مختلف

جدول (۳): پارمترهای کنترلر فازی عصبی

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
خطی	نوع توابع عضویت خروجی	گوسی	نوع توابع عضویت ورودی
۳۶	تعداد توابع عضویت خروجی	۶	تعداد توابع عضویت ورودی
۲۰	تعداد دفعات آموزش	۴۶	تعداد قوانین فازی
۰/۴۸۴۱۵	خطای آموزش	تفکیک شبکه	الگوریتم آموزش

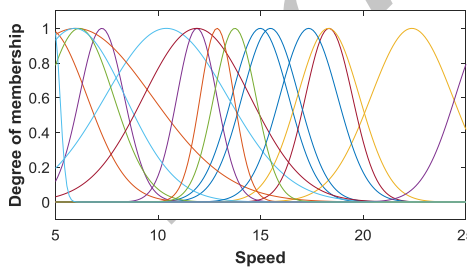
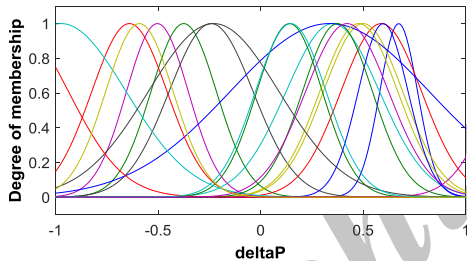
تغییرات توان اکتیو ژنراتور به ازای سه روش کنترلی مختلف در شکل (۱۰) آمده‌اند. به علت ماهیت مکانیکی و اینرسی بالای سیستم، حساسیت سیستم نسبت به تغییرات زاویه پره کند است؛ بنابراین پاسخ سیستم با کنترل کننده‌های مختلف به تغییرات سرعت باد تقریباً مشابه است. باین حال، رفتار نرم تر و خطی تر کنترل کننده پیشنهادی به ویژه در زمان های کوچک تر از ۲ ثانیه مشاهده می شود. تغییرات گشتاور مکانیکی توربین و گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور به ازای کنترل کننده های مختلف به ترتیب در شکل های (۲۲) و (۲۳) معرفی شده اند. تغییرات سرعت محور ژنراتور نیز در شکل (۴۳) آمده است. نتایج شبیه سازی به مدت ۱۰ ثانیه نمایش داده شده است تا مقایسه شکل ها با همدیگر راحت تر انجام گیرد.

روش پیشنهادی مقاله به ارائه تغییرات نرم تر در این پارامترها منجر شده است.

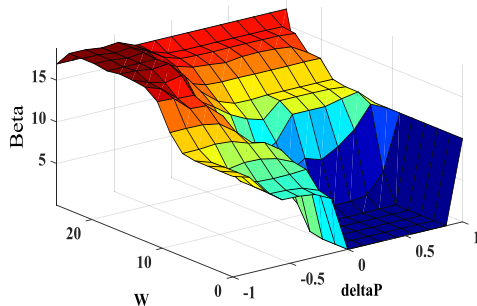


شکل (۱۴): بلوک دیاگرام کنترل زاویه پره

توابع عضویت متغیرهای ورودی کنترل کننده در شکل (۱۵) مشاهده می شوند.



شکل (۱۵): توابع عضویت پارمترهای ورودی

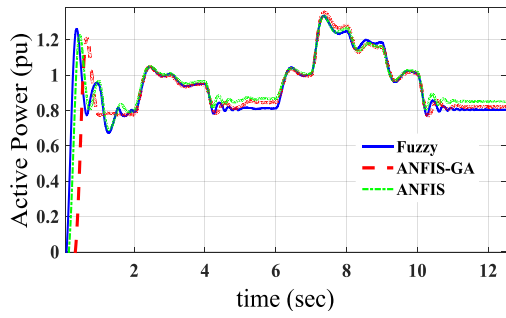


شکل (۱۶): نمای سه بعدی پاسخ ANFIS

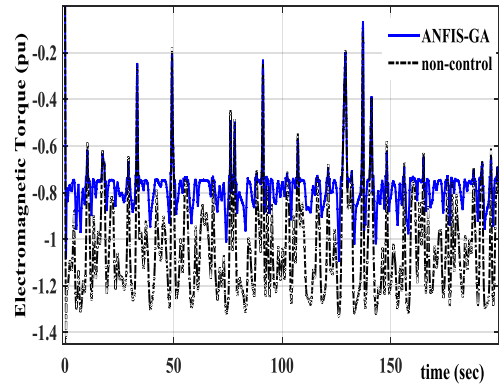
شکل (۱۶) پاسخ سه بعدی کنترل کننده را نشان می دهد. تغییرات گشتاور و سرعت محور ژنراتور برای حالت کنترل نشده و کنترل شده در شکل های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است. با توجه به اینکه تفاوت پارامترها در این دو حالت، امری بدیهی و پیش بینی شده است، علاوه بر روش پیشنهادی، مانند راه انداز نرم، زاویه پره نیز با روش ANFIS و فازی، کنترل و نتایج با هم مقایسه و تحلیل می شوند.

در این تحلیل، سرعت باد مبنا (نامی) برای سیستم $9^{m/s}$ در نظر گرفته شده است. همچنین فرض می شود زاویه پره اولیه قبل از شروع شبیه سازی، صفر است.

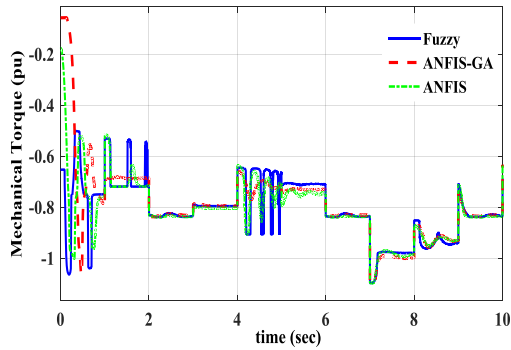
نمودار تغییرات سرعت باد در شکل (۱۹) نشان داده شده است. تغییرات زاویه پره توربین برای دو روش ANFIS و ANFIS بهینه شده در شکل (۲۰) دیده می شوند.



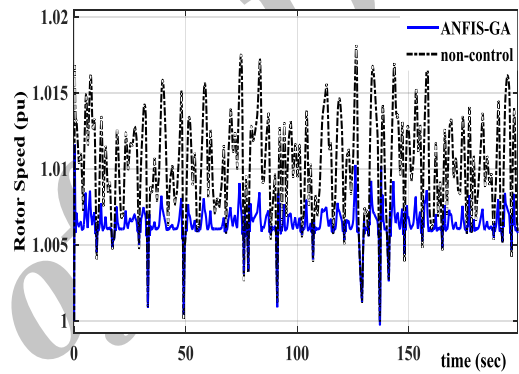
شکل (۲۱): تغییرات توان اکتیو ژنراتور



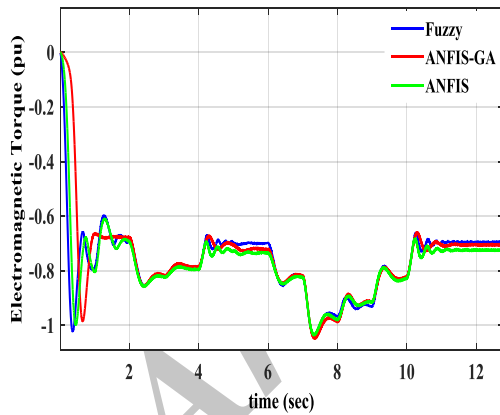
شکل (۱۷): تغییرات گشتاور ژنراتور



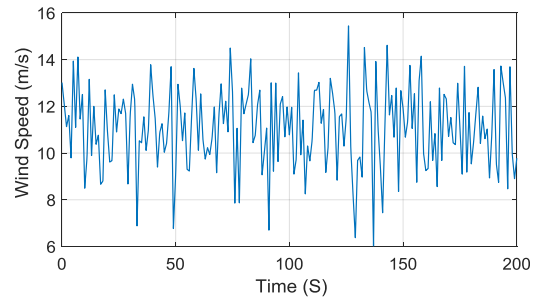
شکل (۲۲): تغییرات توان مکانیکی



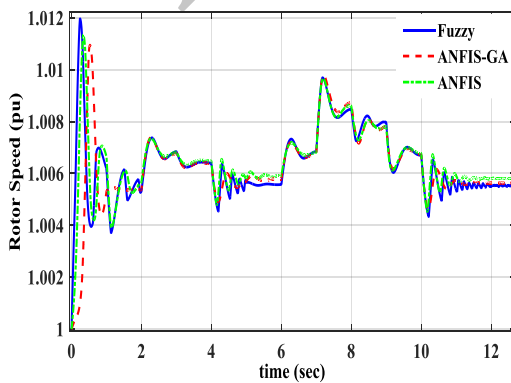
شکل (۱۸): تغییرات سرعت محور ژنراتور



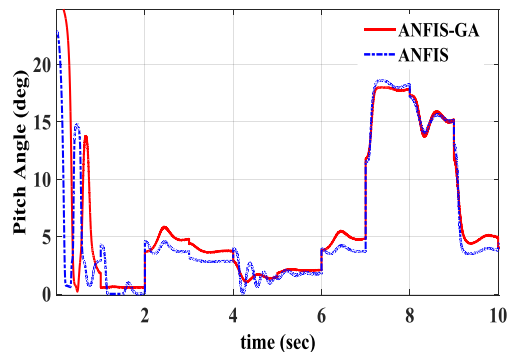
شکل (۲۳): تغییرات گشتاور ژنراتور



شکل (۱۹): تغییرات سرعت باد



شکل (۲۴): تغییرات سرعت ژنراتور



شکل (۲۰): تغییرات زاویه پره توربین

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، یک کنترل‌کننده فازی عصبی تطبیقی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک برای یک توربین بادی سرعت ثابت، طراحی و تحلیل شد. این کنترل‌کننده در ابتدا با تنظیم بهینه زاویه آتش راه‌انداز جریان هجومی را به میزان چشمگیری محدود کرد. در عملکرد معمول نیز با تنظیم زاویه پره توربین از تغییرات نامناسب توان اکتیو کاست. ورودی‌های جدیدی برای کنترل‌کننده در هر دو قسمت در نظر گرفته شد. از کارهای دیگر مقاله، انجام کنترل با دو روش دیگر، یعنی روش‌های فازی و فازی عصبی تطبیقی برای مقایسه است. در مجموع، روش پیشنهادی عملکرد بهتری به خصوص در راه‌اندازی نشان داد.

مراجع

- connected induction generator for wind turbine system" IEEE International Conference on Control, Automation and Systems, 2010.
- [9] T.Thiringer, "Grid Friendly Connecting of Constant Speed Wind Turbines Using External Resistors" IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, 2002.
- [10] W.Deleroi, J.B.Woudstra, A.A.Fahim, "Analysis and application of three phase induction motor voltage controller with improved transient performance" IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 25, No. 2, 1989.
- [11] H. Amooshahi, R. Hooshmand, A.Khodabakhshian, M. Moazzami, "A New Optimal Under Frequency Load Shedding in Micro Grids in Presence of Wind Turbines by using ANFIS Networks", Computational Intelligence in Electrical Engineering, 3th year, No. 3, Autumn 2011.
- [12] C.Jauch, S.M.Islam, P.Sorensen, B.B.Jensen, "Design of a wind turbine pitch angle controller for power system stabilization" Journal on Renewable Energy(Elsevier), Vol. 32, No. 4, 2007.
- [13] L.Lin, J.Jang, Y.Yang, "Comparison of pitch angle control models of wind farm for power system analysis" IEEE Power and Energy Society General Meeting Calgary, 2009
- [14] M.Yang, B.Xiaowei, Y.Yang, Z.Han, "The sliding mode pitch angle controller design for squirrel cage induction generator wind power generation system" IEEE 33rd Chinese Control Conference, 2014.
- [15] F.A.R.Al-Jowder, "Influence of modelling pitch angle controller on transient behavior of fixed speed wind farm" IEEE GCC Conference and Exhibition, 2011.
- [16] L.Krichen, B.Francois, A.Ouali, "A fuzzy logic supervisor for active and reactive power control of a fixed speed wind energy conversion system" Journal Electric Power Systems Research, Vol. 78, No. 3, pp.418-424, 2008.
- [17] P.Garasi, M. Watanabe, Y.Mitani, "Power smoothing of wind turbine generator using fuzzy-PI angle controller" Australasian University Power Engineering Conference, 2014.
- [18] T.L.Van, T.H.Nguyen, D.Lee, "Advanced Pitch Angle Control Based on Fuzzy Logic for Variable Speed Wind Turbine Systems" IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.30, No.2, 2015.
- [19] A.V.A.Macedo, W.S.Mota, "Real Time Simulations of Wind Turbine with Pitch Angle Control Using Fuzzy Logic" 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2014.
- [20] M.Q.Duong, F.Grimaccia, S.Leva, "Pitch Angle Control Using Hybrid Controller for all Operating Regions of SCIG Wind Turbine System" Journal on Renewable Energy(Elsevier), Vol. 70, No. 4, pp.197-203, 2014.
- [1] Salehe Afsharian, Ali Karimpour, "A Multiple Model Predictive Control for Maximum Energy Extraction from Variable Speed Wind Power Systems", Computational Intelligence in Electrical Engineering, 7th year, No. 1, spring 2016.
- [2] L. Mihet, F.Blaabjerg and I.Boldea, "Wind Turbine Generator Modeling and Simulation where Rotational Speed is the controlled Variables" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 40, No. 1, 2004.
- [3] S.Mishra, S. Debdas, Y.Kashap, "Inrush Current Limitation in Wind Generators by SCR Based Soft Starter during Grid Connection" American Journal of Engineering Research, Vol. 2, No. 10, pp.154-159, 2013.
- [4] K.Mohanasundaram, K. Sathiyasekar, N.Rajasekar, "Neuro Fuzzy Controller for High Performance Induction Motor Drives" International Journal of Computer Applications, Vol. 38, No. 10, 2012.
- [5] R.Peters, D. Muthumuni, T.Bartel, "Stator VAR Compensation of a fixed Speed Stall Control Wind Turbine during Start up" Journal on Electric Power Systems Research (Elsevier), Vol. 80, No. 4, pp 400-405, 2010.
- [6] M.A.Chowdury, N. Hosseinzadeh, W.X.Shen, "Smoothing Wind Power Fluctuations by Fuzzy Logic Pitch Angle Controller" Journal on Renewable Energy(Elsevier), Vol. 38, No. 10, pp.224-233, 2012.
- [7] A.M. Howlader, N.Uraski, A.Youna, "A review of output power smoothing methods for wind energy conversion systems" Journal on Renewable and Sustainable Energy Reviews , Vol. 26, No. 11, pp.135-146, 2013.
- [8] S.Tunyasarirut, B. Wangsilabatra, T.Sukari, "Phase control thyristor based for a grid

Systems", John Wiley & Sons, 2011.

[21] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro, "Power Conversion and Control of Wind Energy

Archive of SID