



کنترل فازی توربین بادی سرعت متغیر با استفاده از ANFIS

مسعود مجد¹، محسن کاظمی² و سعیداله مرتضوی³

به استفاده از توربین های با محور افقی وجود دارد. در سوی دیگر توربین ها با توجه به ژنراتور بکار رفته در آن ها به چهار دسته طبقه بندی می شوند که یکی از آن ها که در اینجا نیز مورد توجه گرفته است، توربین سرعت متغیر-زاویه گام متغیر است. در این نوع از توربین ها ژنراتور مورد استفاده ژنراتور القایی دو تحریکه است که در واقع قادر به کنترل سرعت ژنراتور می باشد. برای حداکثر کردن توان کسب شده از باد تلاشهای علمی و تحقیقات بسیاری از سوی محققین در منابع علمی انجام شده است. در [5] تحقیقی نسبتاً کامل در ارتباط با مدل های مختلف توربین باد، انواع و مصارف آن ارائه شده است. همچنین یک کنترل کننده مُد لغزشی در [1] با در نظر گرفتن دو ناحیه کاری برای توربین باد (زیر سرعت نامی باد و بالای سرعت نامی باد) طراحی شده است یکی دیگر از روش های متداول در طراحی کنترل کننده های سیستم های صنعتی، کنترل تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر (PID) است که بعنوان روشی مقاوم نیز شناخته می شود که می توان نمونه ای از آن را در توربین های باد در [2] مشاهده کرد. ذکر این نکته نیز مهم است که در کارهای صورت گرفته در ارتباط با توربین های بادی، برخی در جستجوی یافتن مدلی مناسب برای سیستم توربین بوده اند که از جمله از آنها را می توان در [3] و [4] یافت. همانطور که می دانید، کنترل کننده های فازی نیز در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. سیستم توربین باد به علت رفتار غیر خطی که از خود نشان می دهند و همچنین به علت وجود عوامل بیرونی فراوان از جمله بارهای اضافی و نوسانات قطعات و تیغه و غیره، که ممکن است اختلال در سیستم ایجاد کنند، در قبال کنترل کننده های خطی مانند PID دارای پاسخ یکسان نخواهند بود و این امکان وجود دارد که پس از هر مدت لازم باشد که ضرایب کنترلی را تنظیم کرد که این به نوبه خود مشکل به حساب می آید. به همین منظور در این مقاله سعی شده است با استفاده از کنترل هوشمند فازی که بر اساس کنترل کننده مقاوم PID توسط ANFIS آموزش داده

چکیده - سیستم های توربین باد با سرعت متغیر دارای رفتار غیر خطی و پیچیده ای هستند و همچنین به علت وجود عوامل بیرونی فراوان از جمله بارهای اضافی و نوسانات قطعات و تیغه و غیره، که موجب اختلال در سیستم می شوند، کنترل آن ها از اهمیت به سزایی برخوردار است. در همین خصوص در این مقاله، با توجه به تطبیق کنترل کننده های فازی (در مقایسه با کنترل کننده های خطی) با سیستم های غیر خطی، کنترل کننده های فازی که به وسیله روش ANFIS طراحی شده اند، اعمال خواهند شد. در آخر نیز نتایج و شبیه سازی ها ارائه شده اند.

واژه های کلیدی - توربین بادی سرعت متغیر، ژنراتور القایی دو تحریکه (DFIG)، کنترل فازی، کنترل PID.

1- مقدمه

در دو دهه اخیر، توجه کشورهای صنعتی و در چند سال گذشته، کشورهای توسعه یافته به انرژی های نو بیش از پیش متمرکز شده است. عمده ترین دلیل این امر بدون شک کاهش ذخائر سوخت فسیلی و این واقعیت که روزی این منابع به پایان خواهند رسید، می تواند باشد. یکی از منابع خدادادی انرژی در طبیعت، باد است. انرژی نهفته در باد بر اساس یافته ها، 15 برابر انرژی موجود در کل دنیا است که این خود نشان از عظمت این انرژی است. امروزه برای دریافت انرژی باد و تبدیل آن به برق، از توربین های بادی استفاده می شود. برای کسب حداکثر انرژی باد، انواع مختلفی از توربین های بادی طراحی شده اند. بطور معمول دسته بندی توربین های بادی بر اساس نوع محورشان (افقی و یا قائم) و یا ژنراتور بکار رفته در آن ها صورت می گیرد. امروزه توربین های بادی با محور قائم مصرف زیادی ندارند و بیشتر تمایل

¹دانشگاه آزاد واحد کازرون، بخش مهندسی برق، m.majd23@gmail.com

²دانشگاه آزاد واحد زرقان، بخش مهندسی برق، info@kazemi.ir

³دانشگاه شهید چمران اهواز، بخش مهندسی برق، mortazavi_s@scu.ac.ir

- سرعت شیب (v_r)
- سرعت تند باد (v_g)
- اغتشاش (v_t)

بنابراین می توان سرعت باد را به صورت زیر نوشت.

$$v = v_{av} + v_g + v_r + v_t \quad (1)$$

متوسط سرعت باد بیانگر مقدار میانگین سرعت باد در فاصله زمانی مشخص است. مؤلفه سرعت شیب، در واقع افزایش ثابت سرعت باد در حالت مانا است که به صورت تابع چند ضابطه زیر تعیین می شود.

$$v_r = \begin{cases} 0 & t < T_{sr} \\ A_r \frac{(t - T_{sr})}{T_{er} - T_{sr}} & T_{sr} < t < T_{er} \\ A_r & t > T_{er} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن A_r دامنه سرعت شیب، T_{sr} و T_{er} به ترتیب زمان شروع و اتمام وزش باد شیب در نظر گرفته شده است. مدل سرعت تند باد را که در [6] ارائه شده است می توان به صورت زیر مدل کرد.

$$v_g = \begin{cases} 0 & t < T_{sg} \\ A_g \left\{ 1 - \cos \left(2p \frac{(t - T_{sg})}{(T_{eg} - T_{sg})} \right) \right\} & T_{sg} < t < T_{eg} \\ A_g & t > T_{eg} \end{cases} \quad (3)$$

مؤلفه اغتشاش نیز که توصیف حالت تصادفی سرعت باد را بر عهده دارد به صورت (4) خواهد بود.

$$v_t = 2 \sum_{i=1}^N [S_v(w_i) \Delta w]^{1/2} \cos(w_i + f_i) \quad (4)$$

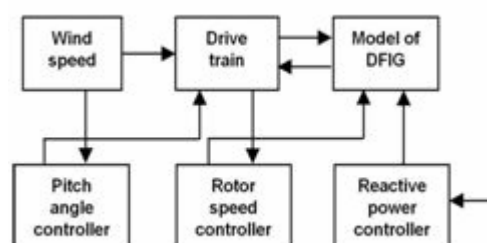
که $w_i = (i - \frac{1}{2})\Delta w$ و f_i یک متغیر تصادفی است که چگالی احتمال یکنواخت در محدوده صفر تا 2π دارد. همچنین $S_v(w_i)$ تابع چگالی طیف است که توسط ویکیتیس در [8] ارائه شده است.

$$S_v(w_i) = \frac{2K_N F^2 |w_i|}{p^2 [1 + (Fw_i / mp)^2]^{4/3}} \quad (5)$$

می شود، طراحی شود. بخش های دیگر این کار عبارتند از: بخش دوم که اختصاص به بیان و توضیح مدل توربین باد مورد استفاده و روابط حاکم بر آن است دارد. بخش سوم کنترل خطی PID و فازی طراحی شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه سازی و شکل های مربوطه ارائه شده است. در آخر نیز پیشنهاداتی برای کارهای دیگر که به نظر می رسد مؤثر باشند بیان شده است.

2- بیان مسئله

همانطور که ذکر شد، سیستم های توربین بادی به چهار نوع دسته بندی می شوند. توربین باد با سرعت روتور ثابت- زاویه گام ثابت، سرعت روتور ثابت- زاویه گام متغیر، سرعت روتور متغیر- زاویه گام ثابت و بالاخره سرعت روتور متغیر- زاویه گام متغیر. در مورد چهارم که در آن ژنراتور القایی دو تحریکه (DFIG) به کار برده می شود، قابلیت کنترل پذیری بیشتری روی توربین و توان تولیدی و مصرفی آن وجود دارد. به همین خاطر در این جا نیز این نوع توربین مورد بحث قرار می گیرد. به طور کلی نمایش سیستمای توربین بادی با ژنراتور DFIG را می توان در شکل (1) مشاهده کرد. سیستم توربین باد در این نوع دارای چندین بخش است که عبارتند از: مدل سرعت باد، واحد مکانیکی Drive-train، مدل ژنراتور DFIG و کنترل کننده های سرعت روتور، زاویه گام و توان راکتیو مصرفی.



شکل 1. سیستم توربین باد با سرعت روتور متغیر-زاویه گام متغیر

در ادامه بخش های مختلف را به طور جداگانه مورد بررسی قرار می دهیم.

2-1- مدل سرعت باد

مدل سرعت باد را می توان به دو گونه، از طریق اندازه گیری و به وسیله شبیه سازی در مدل استفاده کرد [6]. در اینجا به دلیل این که شبیه سازی را مد نظر داریم از نوع دوم، شبیه سازی مدل باد بهره می بریم. در منابع، سرعت باد را مجموع چهار مؤلفه در نظر می گیرند.

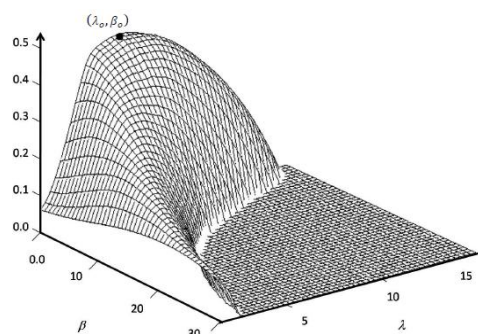
- متوسط سرعت باد (v_{av})

گام است که می توان برای دریافت هر چه بیشتر توان از باد، کنترلی مناسب روی آن ها انجام داد. با استفاده از روش های تقریب عددی ارتباط بازده توان را با نسبت سرعت نوک و زاویه گام به صورت فرم بسته زیر بدست آورده شده است.

$$C_p(I, b) = c_1 \left(\frac{c_2}{I_i} - c_3 b - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{I_i}} + c_6 I \quad (10)$$

که $I_i = \left(\frac{1}{I + 0.08b} - \frac{0.035}{b^3 + 1} \right)^{-1}$ است و متناسب با هر سایت که محل نصب توربین باد است، پارامترهای $c_1 - c_6$ باید تنظیم شوند. در اینجا پارامترها را با توجه به [11] به صورت زیر در نظر گرفته ایم.

$$\begin{aligned} c_1 &= 0.5176 & c_4 &= 5.0000 \\ c_2 &= 116.00 & c_5 &= 21.000 \\ c_3 &= 0.4000 & c_6 &= 0.00068 \end{aligned} \quad (11)$$



شکل 2. نمودار بازده توان بر حسب نسبت سرعت لبه و زاویه گام

همانطور که در شکل (2) نیز مشاهده می کنید، خوشبختانه تنها یک نقطه بهینه وجود دارد که در آن بازده توان به حداکثر خود می رسد که در $b = 0, I = 8.1$ است.

3-2- مدل ژنراتور

در سیستم های توربین بادی با سرعت متغیر، همانطور که از نامش بر می آید ژنراتور مورد استفاده از نوعی است که سرعت روتور در آن تغییر می کند و می توان کنترل روی آن انجام داد. در واقع در این ژنراتور، روتور بطور غیر مستقیم با شبکه در ارتباط است. در این فاصله مبدل هایی وجود دارند که وظیفه تطبیق فرکانسی و تنظیم ولتاژ را بر عهده دارند. یکی از این موارد، ژنراتور القایی DFIG است که شکل (3) نمونه ای از این ژنراتور را نشان داده شده است.

که $F = 200, 400 \text{ K}_N$ و متوسط سرعت در ارتفاع بالا است. در [6] نتیجه گرفته شده است که $N = 50$ و $\Delta w = 0.5 - 2$ مناسب برای شبیه سازی خواهند بود.

2-2- مدل Drive-train

مدل Drive-train در واقع زیر سیستم آیرودینامیکی توربین بادی است که شامل مدل روتور، بخش توان مکانیکی و مدل قطعات مکانیکی توربین است که مورد آخر در بحث ما نمی گنجد و تاثیر ناچیز آن را نیز مد نظر نخواهیم داد. بنابراین دو بخش روتور و توان مکانیکی را مورد توجه قرار می دهیم. به طور کلی مدل روتور توسط رابطه دیفرانسیلی مرتبه اول زیر بیان می شود.

$$\dot{w}_r = \frac{1}{J_t} (T_m - K_t - B_t q_t - T_g) \quad (6)$$

$$\text{که } n_g = \frac{w_g}{w_r} \text{ و } \begin{cases} J_t = J_r + n_g^2 J_g \\ K_t = K_r + n_g^2 K_g \\ B_t = B_r + n_g^2 B_g \end{cases}$$

همچنین در آن w ، J, T, K, B و q به ترتیب سرعت زاویه ای، اینرسی، گشتاور، ضریب سختی، ضریب دمپینگ و زاویه ژنراتور هستند. همچنین اندسیهای r, g و m نیز به ترتیب نشانگر روتور، ژنراتور و مکانیکی می باشند. با توجه به ناچیز بودن مقادیر B_t, K_t ، می توان مدل ساده تری به صورت زیر را داشت.

$$\dot{w}_r = \frac{1}{J_t} (T_m - T_g) \quad (7)$$

توان مکانیکی توربین بادی که در واقع درصدی از توان کل انرژی باد است، به صورت زیر محاسبه می شود.

$$P_m = \frac{r}{2} A C_p(I, b) V^3 \quad (8)$$

که r چگالی هوا، C_p ضریب بازده توان، I نسبت سرعت لبه، b زاویه گام و A سطح جاروب شده توسط روتور و در نهایت V سرعت باد است. نسبت سرعت لبه I ، به صورت زیر تعریف می شود.

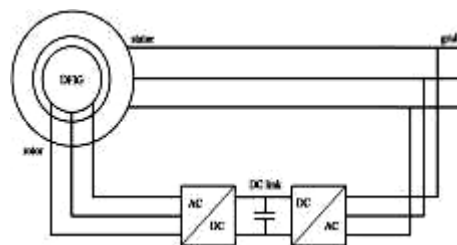
$$I = \frac{w_r R}{V} \quad (9)$$

که R شعاع روتور است. همانطور که در (8) ملاحظه می کنید با فرض ثابت بودن سطح جاروب شده A و سرعت باد V ، که در اختیار ما نیست، C_p تابعی از دو پارامتر نسبت سرعت لبه و زاویه

صرفنظر شده است. همانطور که در رابطه دینامیکی روتور در (7) مشاهده می کنید، گشتاور مکانیکی T_m و گشتاور ژنراتور T_g نیز باید محاسبه شوند که به ترتیب به صورت زیر هستند.

$$T_m = \frac{P_m}{w_r} \quad (16)$$

$$T_e = (y_{ds} i_{qs} - y_{qs} i_{ds}) \quad (17)$$



شکل 3. ژنراتور القایی DFIG

4-2- سیستم زاویه گام

مدل سیستم زاویه گام را می توان به صورت یک سیستم خطی مرتبه اول در نظر گرفت که میزان تغییرات زاویه آن و همچنین محدوده تغییرات آن از قبل تعیین شده است. در این کار ما چند مقدار برای میزان تغییرات زاویه گام در نظر می گیریم و محدوده آنرا از صفر تا 50 درجه در نظر گرفته ایم.

5-2- کنترل کننده ها

قسمت مهم دیگر، بخش کنترل کننده ها است که ابتدا در مورد استراتژی کنترل مورد نظر بحث می کنیم و سپس سه کنترل کننده برای اعمال آن در نظر می گیریم.

استراتژی کنترل: به طور کلی برای دریافت حداکثر توان ناشی از انرژی باد، چندین ایده وجود دارد که در مهمترین آنها، ناحیه کار توربین باد را به دو قسمت تقسیم می کنند، ناحیه زیر سرعت نامی باد و ناحیه بالای سرعت نامی باد. با توجه به رابطه (7) می توان دریافت که سرعت روتور متناسب با سرعت باد خواهد بود و در ناحیه اول زیر مقدار نامی خود است. همچنین توجه داشته باشید که بازده توان در $\lambda=8.1$ و $\beta=0$ به مقدار بهینه خود (تقریباً 0.5) می رسد، بنابراین در این ناحیه با در نظر گرفتن زاویه گام صفر ($\beta=0$)، سرعت روتور را متناسب با سرعت باد چنان باید تنظیم می کنیم تا نسبت سرعت لبه در مقدار 8.1 تثبیت شود. با این ایده توان نیز در هر سرعت باد زیر حد نامی مقدار بهینه قابل حصول را دارد. در ناحیه دوم که بازده سرعت باد به مقدار نامی می رسد و از آن تجاوز می کند، توان نیز به حد نامی خود رسیده است و با افزایش سرعت باد از آن تجاوز می کند که موجب خسارت به بخش های الکتریکی و حتی مکانیکی توربین خواهد شد. برای رفع این موضوع، در ناحیه دوم وضعیت را تغییر می دهیم بطوری که در این قسمت سرعت روتور را در زیر مقدار نامی خود نگه داشته، زاویه گام را کنترل خواهیم کرد.

بنابراین با توجه به این استراتژی دو کنترل کننده یک برای سرعت روتور و دیگری کنترل زاویه گام باید طراحی شود.

معادلات حاکم بر ژنراتور القایی را می توان بر اساس روابط ولتاژ آن در مرجع d-q نشان داد.

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} - w_s y_{qs} + \frac{dy_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} + w_s y_{ds} + \frac{dy_{qs}}{dt} \\ u_{dr} = -R_r i_{dr} - s w_s y_{qr} + \frac{dy_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = -R_r i_{qr} - s w_s y_{dr} + \frac{dy_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

که در آن ω ، ψ ، i ، u و R به ترتیب ولتاژ، جریان، فلو مغناطیسی، سرعت زاویه ای و مقاومت هستند که اندیسهای d ، q ، r و s نیز به ترتیب نشانگر محورهای مستقیم و تربیی و روتور و استاتور ژنراتور هستند. همچنین s بیانگر لغزش است که به صورت زیر تعریف می شود.

$$s = 1 - \frac{p w_m}{2 w_s} \quad (13)$$

که p تعداد قطبها است. حال اگر روابط بین فلو- جریان را که به صورت (14) هستند در نظر بگیرید، می توان معادلات ولتاژ- جریان ژنراتور القایی را در اختیار داشت (15).

$$\begin{cases} y_{ds} = (L_s + L_m) i_{ds} - L_m i_{dr} \\ y_{qs} = -(L_s + L_m) i_{qs} - L_m i_{qr} \\ y_{dr} = -(L_r + L_m) i_{dr} - L_m i_{ds} \\ y_{qr} = -(L_r + L_m) i_{qr} - L_m i_{qs} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} - w_s [-(L_s + L_m) i_{qs} - L_m i_{qr}] \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} - w_s [-(L_s + L_m) i_{ds} - L_m i_{dr}] \\ u_{dr} = -R_r i_{dr} - s w_s [-(L_r + L_m) i_{qr} - L_m i_{qs}] \\ u_{qr} = -R_r i_{qr} - s w_s [-(L_r + L_m) i_{dr} - L_m i_{ds}] \end{cases} \quad (15)$$

که در آن L اندکتانس است. زیرنویس m بیانگر تاثیر متقابل است. البته توجه داشته باشید که در (15) از جمله های حالت گذر (مشتقات فلو مغناطیسی) که در (14) وجود دارند،

حداقل سازی خطا آموزش داده شوند دو روش وجود خواهد داشت. روشهای یادگیری نیز اغلب روش گامهای عقب در نظر گرفته می شود.

3-2- طراحی کنترل کننده ها

برای طراحی کنترل کننده های فازی، ابتدا کنترل کننده های PID را برای آن ها طراحی می شوند سپس با استفاده از ANFIS کنترل کننده فازی نیز بدست خواهد آمد.

کنترل کننده سرعت روتور: در ناحیه اول کنترل کننده سرعت روتور، وظیفه تنظیم سرعت روتور را برای حداکثر سازی توان قابل حصول از باد را بر عهده خواهد داشت در صورتیکه زاویه گام در زاویه صفر نگه داشته می شود. برای این منظور در نظر داشته باشید که با استفاده از جریان مؤلفه Q روتور I_{QR} ، که در آخر به ولتاژ آن نیز مربوط است، فرمان کنترلی را برای تطبیق سرعت روتور به سیستم توربین باد ارسال می شود. در واقع ما ابتدا با توجه به سرعت باد و علم به اینکه مقدار λ باید در 8.1 حفظ شود، سرعت مرجع روتور را بدست آورده، سپس با محاسبه خطای موجود، فرمان کنترلی از کنترل کننده سرعت روتور توسط جریان I_{QR} به سیستم الکتریکی داده می شود.

جدول 1. ضرایب کنترل کننده های PID

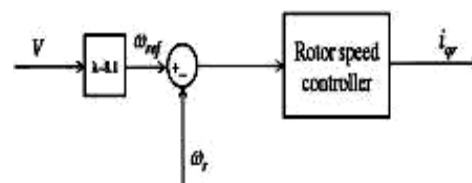
ضرایب کنترل کننده	P	I	D
سرعت روتور	20	5	0
زاویه گام	30	9	0
توان راکتیو	1	1	0

کنترل کننده زاویه گام: در ناحیه دوم که سرعت باد بیشتر از مقدار نامی خود است، جهت حفظ توان دریافتی می توان زاویه گام را طوری تنظیم کرد تا توان در مقدار نامی خود باقی بماند. برای این منظور با ساختن یک Look up table بطوریکه در آن مقادیر زاویه گام های مختلف معادل با مقادیر بازده توان و نسبت سرعت های نوک متفاوت قرار دارند، زاویه مرجع را از آن با توجه به سرعت باد و سرعت نامی روتور بدست می آوریم و خطای زاویه گام را محاسبه و به کنترل کننده منتقل کرده سپس کنترل کننده فرمان لازم به سیستم زاویه گام را ارسال می کند. برای درک بهتر شکل (5) را مشاهده کنید.

از طرف دیگر به علت اینکه ژنراتور القایی $DFIG$ قابلیت تولید توان راکتیو را از طریق روتور به استاتور برای تزریق به شبکه دارد، می توان کنترلی بر روی توان راکتیو مصرفی توربین نیز انجام داد. توجه داشته باشید که می توان از توان راکتیو تلفاتی در مبدل ها صرف نظر کرد [8]. بنابراین توان اکتیو و راکتیو به صورت زیر خواهند بود.

$$P = P_s + P_r = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (18)$$

$$Q = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}$$



شکل 4. کنترل کننده سرعت روتور

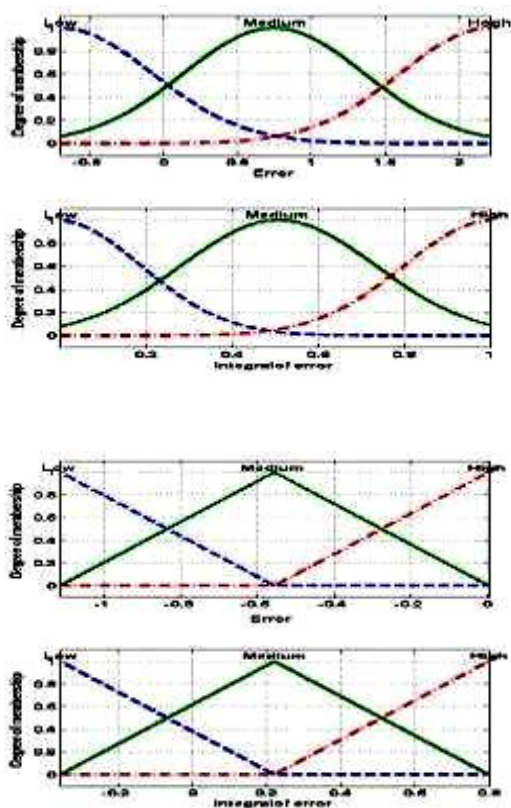
همچنین توجه کنید که برای محاسبه راحت تر ولتاژ و جریانهای ژنراتور، محورهای $d-q$ را طوری قرار داد تا $v_{ds} = 0$ و $v_{qs} = 1$ شوند.

3- طراحی کنترل فازی ANFIS

همان طور که در بخش قبل ذکر شد، سه کنترل کننده سرعت روتور، زاویه گام و توان راکتیو را برای سیستم توربین باد در نظر می گیریم که باید طراحی شوند.

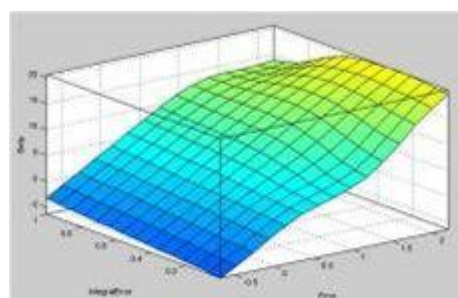
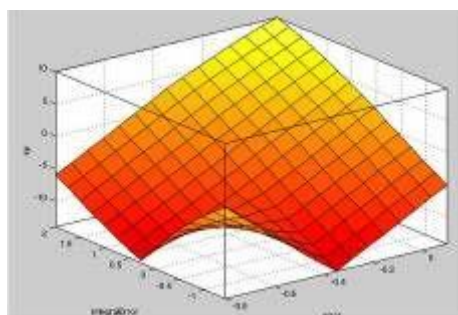
3-1- سیستم ANFIS

ANFIS در سال 1993 توسط ژانگ در [9] ارائه شد که در واقع یک سیستم استنتاج فازی در قالب شبکه تطبیقی است. ANFIS می تواند نگاشت ورودی-خروجی سیستمی را با استفاده از قوانین بشری و حتی جفت ورودی-خروجی (داده های از پیش تعیین شده) در قالب سیستم فازی بدست آورد. مدل فازی بکار برده شده در ANFIS مدل سوگینو است که برای آموزش قوانین و تشکیل سیستم فازی بطور عددی بسیار مناسب است. همانطور که می دانید، در سیستمهای فازی سوگینو قسمت آنگاه قوانین ترکیب خطی از متغیر های زبانی است که با ضرایب ثابتی قرار دارند و همچنین توابع عضویت نیز دارای پارامترهایی است که باید تعیین شوند. با این اوصاف، برای آموزش و ساختن سیستم فازی با استفاده از روشهای یادگیری شبکه، بر اساس اینکه ابتدا کدام دسته پارامترها (پارامترهای قسمت آنگاه قوانین و یا پارامترهای توابع عضویت) را فرض کرده و کدام دسته را برای

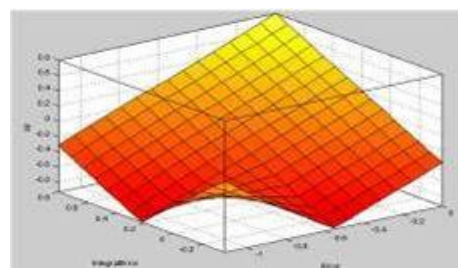


ج

شکل 6. توابع عضویت الف (سرعت روتور ب) زاویه گام ج) توان راکتیو

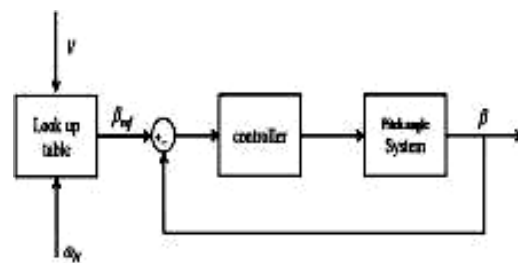


ب



ج

شکل 7. رویه قوانین الف (سرعت روتور ب) زاویه گام ج) توان راکتیو

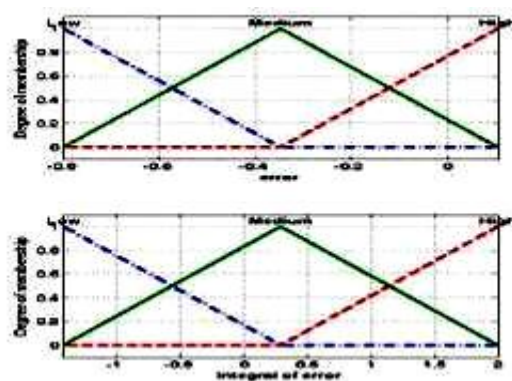


شکل 5. کنترل کننده زاویه گام

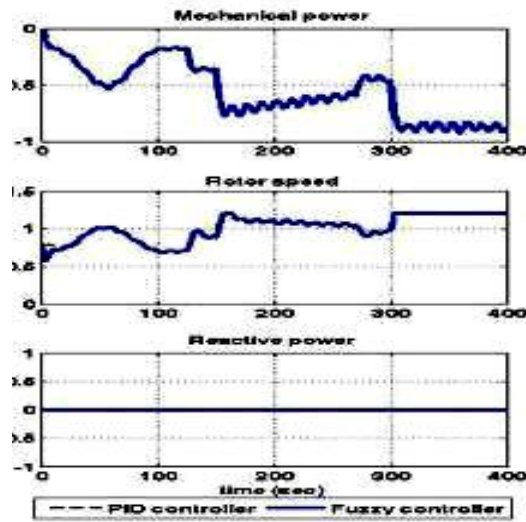
کنترل کننده توان راکتیو: توان راکتیو در ژنراتورهای DFIG را می توان کنترل کرد. این کنترل بر اساس مؤلفه مستقیم جریان روتور i_{qr} صورت می گیرد. در اینجا فرض شده که توان راکتیو مطلوب صفر باشد. همچنین توجه کنید که توان راکتیو نیز از رابطه (18) محاسبه می شود.

کنترل PID: حال در نظر بگیرید کنترل کننده کلاسیک PID را برای سیستم توربین باد مد نظر داشته باشیم. برای سه کنترل کننده سرعت روتور، زاویه گام و توان راکتیو ضرایب PID به صورت جدول (1) است. لازم به ذکر است که ضرایب کنترل کننده PID برای زاویه گام را بر اساس الگوریتم زیگلر- نیکولز [11] تعیین شده اند ولی برای دو کنترل کننده دیگر به صورت سعی و خطا انجام شده است.

کنترل فازی: در اینجا با استفاده از ANFIS کنترل کننده های فازی را که تقریبی از کنترل کننده های PID هستند طراحی می کنیم. در واقع کنترل کننده های فازی شبه PID خواهیم داشت. توابع عضویت برای سه کنترل کننده در شکل (6) نشان داده شده است و همچنین رویه قوانین نیز در زیر برای سه کنترل کننده فازی آورده شده اند.



میزان تغییر (به عبارت دیگر تغییرات نامحدود)، میزان تغییرات برابر با ± 2 و ± 5 نشان داده شده است.



شکل 9. به ترتیب از بالا به پایین توان مکانیکی، سرعت روتور و توان راکتیو

توجه کنید که در شکل (10)، پایین ترین شکل، فقط زاویه گام در حالت کنترل کننده فازی نشان داده شده است و بعلاوه اینکه کنترل PID پاسخگوی این میزان تغییر نبود و همیشه به حد بالا (50) می رسید، آنرا نشان ندادیم. که خود یکی از بهبودهای کنترل فازی را نسبت به PID نشان می دهد. در شکل (10) و (11) نیز مشاهده می کنید که در ابتدای کار پاسخهای ناشی از کنترل PID دارای نوسانات بیشتری نسبت به کنترل فازی هستند که در واقع حالت گذرای مناسبتر را از سوی کنترل فازی نشان می دهند.

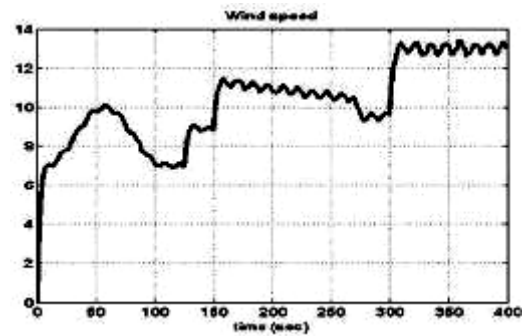
6- نتیجه گیری و پیشنهادات

سیستم های غیر خطی همانند توربین باد که دارای نواحی کار مختلف هستند با استفاده از کنترل کننده های خطی به نسبت، پاسخ های مطلوبی را نخواهند داشت بطوری که در برابر تغییرات کوچک در سیستم، کنترل کننده قادر به کنترل صحیح نخواهند بود. بنابراین یکی از راهکارهای حل این موضوع استفاده از کنترل کننده های فازی می تواند باشد که در کارهای قبلی برای سیستمهای پیچیده و غیر خطی پاسخ های شگفت انگیزی را از خود نشان داده است. یکی از روش های استفاده از کنترل فازی، تقریب کنترل های دیگر در قالب سیستم فازی است که علاوه بر مزایای آن کنترل کننده، از ویژگی های سیستم های فازی از جمله مسائل مقاوم بودن آن و رفتار غیر خطی اش می توان بهره برد.

ابتدا مدل باد را چنان در نظر بگیرید که سرعت متوسط باد در 150 ثانیه اول 7 متر بر ثانیه و سپس 150 ثانیه دوم به مقدار 9,5 متر بر ثانیه افزایش می یابد. نهایتاً در 100 ثانیه آخر، سرعت به 13 متر بر ثانیه خواهد رسید. همچنین با توجه به سرعت های شیب و تند باد در (2و3)، پارامترهای این دو مؤلفه از قرار زیر می باشند.

$$\begin{aligned} A_r &= 2.00 \text{ m/s} & A_g &= 1.5 \text{ m/s} \\ T_{sr} &= 125 \text{ m/s} & T_{sg} &= 5.00 \text{ m/s} \\ T_{er} &= 270 \text{ m/s} & T_{eg} &= 105 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (19)$$

همچنین در نظر داشته باشید که سرعت باد نامی 12 m/s است.



شکل 8. سرعت باد

پارامترهای ژنراتور را طبق جدول (2) قرار داده شده اند که همگی بر حسب pu هستند.

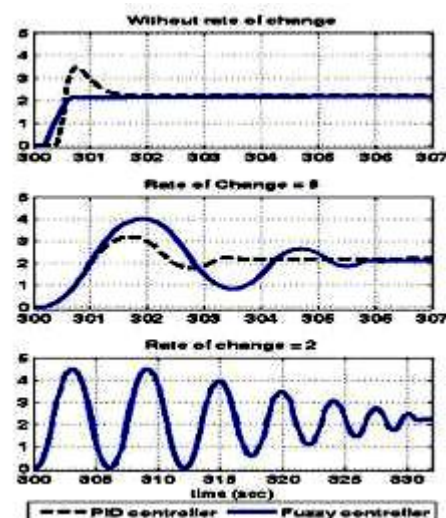
جدول 2. پارامترهای ژنراتور و سیستم زاویه گام

0,01	R_s	مقاومت استاتور (p.u)
0,1	X_s	اندوکتانس استاتور (p.u)
0,01	R_r	مقاومت روتور (p.u)
0,08	X_r	اندوکتانس روتور (p.u)
3	X_m	اندوکتانس مغناطیس کنندگی (p.u)
3	H	ثابت اینرسی روتور (p.u)
1/100	n_g	نسبت جعبه دنده
35	R	شعاع روتور (متر)
2-5	Δb	میزان تغییر زاویه گام
[0-50]	b_m	محدود مجاز زاویه گام

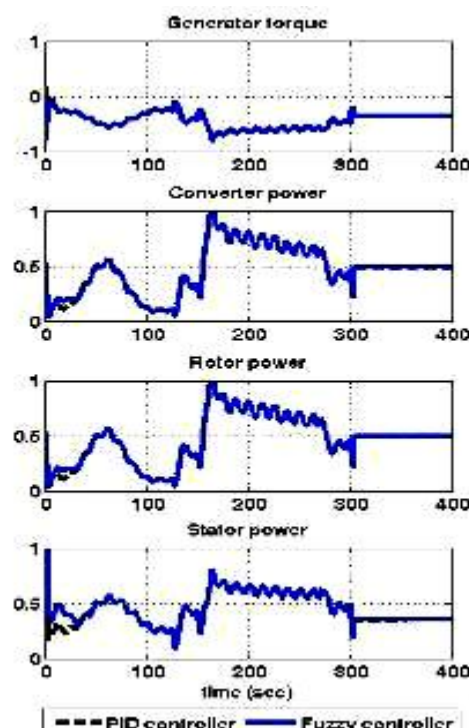
همچنین توربین باد مورد نظر، 1.5 مگا وات توان قابل حصول دارد. نتایج شبیه سازی را در شکلهای (10-12) مشاهده می کنید که برای هر دو نوع کنترل PID (خط چین) و فازی (خط ممتد) نشان داده شده است. در شکل (10)، زاویه گام برای هر دو نوع کنترل و به ازای سه میزان تغییر زاویه مجاز که عبارتند از بدون

- [2] M. M. Hand, M. J. Balas, "Systematic approach for PID controller design for pitch-regulated, variable- speed Wind Turbines". 17th ASME Wind Energy Symposium Proceedings,; 89-94, 1998.
- [3] J. G. Sloomweg, H. Polinder, W. L. Kling, "Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator", Proceedings IEEE Power Engineering Society Summer Meeting (Vancouver, 15-19 July 2001), pp. 1-6.
- [4] بهمن خاکی، محمد رضا نقی زاده و علیرضا نظری "مدلسازی سیستم توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه" کنفرانس بین المللی مدیریت و برنامه ریزی انرژی. ایران 2006.
- [5] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems" John Wiley & Sons Ltd, Chicester, UK. 2005.
- [6] P. M. Anderson, A. Bose, "Stability Simulation of Wind Turbine Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 102(12) 3791-3795. 1983.
- [7] Vaicaitis, Rimas, M. Shinozuka, and M. Takeno. "Parameters Study of Wind Loading on Structures", J. of the Structural Div., ASCE, Mar. 1973, pp. 453-468.
- [8] J. G. Sloomweg, H. Polinder, W. L. Kling, "Initialization of Wind Turbine Models in Power System Dynamics Simulations", in Proceedings of IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, 2001.
- [9] J. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Neuro-Fuzzy Inference System" IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. 23, NO. 3, MAY/JUNE 1993.
- [10] K. J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive Control Addison-Wesley 2nd edition. 1995.
- [11] S. Heier, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons Ltd, 1998.

برای کارهای بیشتر می توان به تلفیق روش های کنترل غیر فازی با کنترل فازی از جمله کنترل شبکه عصبی و غیره را نام برد. همچنین با در نظر گرفتن اعمال دو کنترل کننده سرعت روتور و زاویه گام در هر دو ناحیه بطور همزمان به نظر می رسد که در عمل بسیار مفید واقع شود و بار سنگین کنترلی در هر دو کنترل کننده بطور جداگانه را به شکل زیادی بکاهد.



شکل 10. زاویه گام به ازای سه میزان تغییر متفاوت



شکل 11. به ترتیب از بالا گشتاور ژنراتور، توان اکتیو مبدل، توان اکتیو روتور و استاتور

7- مراجع

- [1] B. Beltran, T. Ahmed-Ali, M. E. Benbouzid, "Sliding Mode Power Control of Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems" IEEE Transaction on Energy Conversion, June 2008.