

بررسی و طراحی سیستم کنترل توربین بادی در حالت دور ثابت با ژنراتور آسنکرون

محمد حسن غفاری سعادت^۱ حمیدرضا لاری^۲ محمد خردمند کیسمی^۱

^۱دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ^۲پژوهشگاه نیرو-گروه انرژی های نو

ایران

Email: hlari@nri.ac.ir

واژه های کلیدی : توربین بادی، سیستم کنترل، شبیه سازی، ژنراتور آسنکرون

چکیده

در این مقاله، پس از بررسی سیستم عملکرد توربین بادی، طراحی تفصیلی سیستم کنترل در حالت دور ثابت با مولد القایی (آسنکرون) صورت می گیرد. هدف از این سیستم کنترلی، کاهش بارهای دینامیکی بر روی محور روتور، ریشه پره ها و سیستم انتقال قدرت و همچنین کنترل تولید توان الکتریکی در محدوده وسیعی از سرعت های باد پس از رسیدن دور روتور توربین به دور نامی می باشد. در نهایت برای تست کنترلر طراحی شده به کمک نرم افزار سیمولینگ، انواع ورودیها مورد بررسی قرار گرفته اند. چون کنترلر به صورت خطی طراحی شده است ابتدا ورودیهای پله و شیب و در نهایت ورودی باد واقعی بصورت تابع غیر خطی توسط کنترلر بررسی شده اند که نتایج بدست آمده در قسمت نتایج ارائه شده اند. در انتها پس از تست، کنترلر PI طراحی شده برای استفاده در توربین بادی مطلوب تشخیص داده شد.

مقدمه

تاریخچه استفاده از انرژی باد به قرنهای قبل باز می گردد. در ایران نیز در مناطقی از استان خراسان آثاری از آسیابهای بادی با قدمت دو هزار سال به چشم می خورد. با این وجود بیش از سه دهه از زمان تولید برق با انرژی باد نمی گذرد. در طول این مدت کوتاه مطالعات گسترده ای در زمینه های مختلف در مورد نیروگاههای بادی انجام شده است. بطوریکه یکی از این زمینه ها، چگونگی کنترل توربین های بادی است. اکثر نیروگاهها با دریافت شکلی از انرژی و تبدیل مقداری از آن به توان قابل دسترسی روی محور متصل به مولد، تولید الکتریسیته می نمایند. بنابراین وجود سیستم کنترل برای برقراری توازن میان انرژی ورودی و خروجی نیروگاه برق ضروری به نظر می رسد که نیروگاه بادی نیز از این قاعده مستثنی نمی باشد. بویژه که در این حالت شرایط ورودی باد نیز در حال تغییر است.

طراحی سیستم کنترل توربین بادی دو هدف عمده را دنبال می‌کند که عبارتند از الف) کاهش بارهای دینامیکی بر روی محور روتور، ریشه پره‌ها و سیستم انتقال قدرت بطوریکه سیستم کنترل باید با بکارگیری الگوریتم صحیح و مناسب تاثیرات نیروهای ناخواسته گوناگون بر روی اجزاء توربین باد را کاهش دهد. ب) کنترل تولید توان الکتریکی در محدوده وسیعی از سرعت‌های باد در حالتیکه هنگام رسیدن باد به سرعت نامی خواهد رسید. با افزایش سرعت باد بیش از سرعت نامی، لازم است تا با روش کنترلی مناسب توان خروجی در مقدار نامی خود تولید گردد [۱].

همچنین مکانیزم‌های کنترل که بیشتر جهت کنترل دور و توان مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از الف) کنترل توسط بار ب) کنترل توسط پره (کنترل توسط پره (کنترل آیرودینامیک) ج) کنترل حالت‌های اضطراری توسط رمزهای مکانیکی د) کنترل بوسیله انحراف دیسک روتور [۲، ۳، ۴].

۱- تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی سیستم [۵]

با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی سیستم توربین بادی طراحی سیستم کنترلی انجام می‌شود. برای تحلیل دینامیکی ابتدا باید روتور شبیه‌سازی شود به این منظور درجات آزادی سیستم مشخص شده و بردارهای نیرو و سرعت در المان پره تعیین می‌گردد.

برای تشریح عملکرد و شبیه‌سازی روتور توربین بادی، روتوری با سه پره و سه درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود. به منظور ساده‌سازی محاسبات و استخراج معادلات حرکت که بتوان آنها را شبیه‌سازی نمود، شکل پره به صورت ایرفول نازک با ضخامت ناچیز فرض می‌شود. همچنین برای استخراج معادلات حرکت روتور از روش دینامیک لاگرانژی استفاده میشود. بدین منظور لازم است انرژی جنبشی و پتانسیل

روتور محاسبه گردند. سپس معادلات حرمت روتور بدست خواهد آمد. از آنجا که مرکز ثقل کار روتور بر روی دماغه آن قرار دارد انرژی پتانسیل صفر بوده و تنها انرژی جنبشی بصورت انرژی جنبشی انتقالی و دورانی موجود است.

سرعت شبیه‌سازی در ادامه سرعت باد نیز شبیه‌سازی می‌شود. سرعت باد را می‌توان ترکیبی از چهار مولفه دانست [۶].

V_B : سرعت بار پایه (ثابت)

V_G : مولفه تند باد

V_R : مولفه بصورت ورودی شیب

V_N : مولفه اغتشاش باد

$$V = V_B + V_G + V_R + V_N \quad (1)$$

۲- محاسبه نیروهای عمومی و سرعتها

نیروهای برا و پسا در دو جهت مماس بر پره و عمود بر آن تصویر می‌شوند. نیروهای مماسی (H) و نیروی (T) عبارتند از:

$$H = L \sin(\delta) + D \cos(\delta) \quad (2)$$

$$T = L \cos(\delta) + D \sin(\delta) \quad (3)$$

δ : زاویه بین محور دورانی روتور و جهت جریان آزاد باد

L: نیروی برا

D: نیروی پسا

گشتاور حاصل از نیروی مماسی باعث دوران روتور حول محور توربین میشود. بردار سرعت نسبی نیز دارای دو مولفه U_t, U_p است که عبارتند از:

$$U_t = V \sin \phi \cos \psi - h \phi \cos \psi + r \Omega \quad (4)$$

$$U_p = V \cos \phi + r \phi \sin \psi - v \quad (5)$$

V: سرعت آزاد باد

U_t : بردار سرعت خطی پره

U_p : بردار سرعت آزاد باد

ϕ : زاویه یاو (Yaw)

ψ : زاویه وضعیت روتور

Ω : سرعت دورانی محور سرعت پایین

بردار سرعت نسبی نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$U = \sqrt{u_p^2 + u_t^2} \quad (6)$$

۲-۳- شبیه سازی کامپیوتری توربین بادی

برای شبیه سازی از نرم افزار simulink که یکی از زیر مجموعه‌های نرم افزار Matlab می‌باشد استفاده شده است. معادلات حرکت روتور به صورت ماتریسی عبارتند از:

$$[H] \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^1} \beta \\ \frac{\partial^2}{\partial t^1} \psi \end{bmatrix} = [A] \quad (7)$$

$[H]$: ماتریس نیروی برشی روتور

$[A]$: ماتریس معادلات حرکت روتور

$\frac{\partial^2}{\partial t^1}$: مشتق دوم تابع

β : زاویه گام پره

ψ : زاویه وضعیت پره

برای آنکه رفتار نیروگاه بادی مورد بررسی دقیق قرار گیرد، ورودیهای مختلف باد در زوایای گام مختلف به سیستم اعمال گردید. شکل (۱) نمونه ای از شبیه سازی نیروگاه بادی با نرم افزار simulink و با ورودی باد طبق رابطه (۱) میباشد. در نهایت نتایج بدست آمده بصورت منحنیهای توان الکتریکی و سرعت دورانی برای سرعتهای باد گوناگون در حالتی باد ثابت، شیب، اغتشاش و مخلوطی از آنها بدست آمده است. شکل (۲) منحنیهای گشتاور آیرودینامیک بر حسب سرعت دورانی در زوایای گام مشخص و سرعتهای باد متفاوت را نشان میدهد.

۳- سیستم کنترل در حالت دور ثابت

اکنون با استفاده از نتایج بدست آمده از شبیه سازی نیروگاه بادی، طراحی سیستم کنترل در حالت دور در نظر گرفته شده از نوع القایی (آسنکرون) خواهد بود. در ضمن فرض می‌شود که نیروگاه بادی متصل به شبکه سراسری بوده و مستقل از تغییرات بار شبکه است. با توجه به مطالب ذکر شده در حالت دور ثابت دو متغیر را باید کنترل نمود: ۱- سرعت دورانی (دور) ۲- گشتاور. هنگامی که بر اثر افزایش سرعت باد، سرعت دورانی محور مولد به دور نامی می‌رسد، مولد به توربین متصل شده و شروع به تولید توان می‌نماید. از این زمان به بعد با استفاده از کنترل کننده مناسب، دور در میزان نامی خود ثابت میشود با افزایش سرعت باد، پس از آنکه سرعت باد به حد نامی خود رسید باد به حد نامی خود رسید مولد، توان را در حد نامی خود رسید، مولد توان را در حد نامی خود تولید می‌کند. از این زمان با افزایش سرعت باد متغیر دیگر (گشتاور) کنترل شده تا توان در حد نامی خود تولید شود. بنابراین برای کنترل در حالت دور ثابت دو حلقه کنترلی دور ثابت و گشتاور مورد نیاز است. البته این دو حلقه کنترلی مستقل از یکدیگر نبوده و در ارتباط با یکدیگر می‌باشند. اگر از مولد القایی (آسنکرون) استفاده شود دیگر نیازی به حلقه کنترل گشتاور نیست [۷]. لذا با کنترل نمودن. بنابراین طراحی سیستم کنترل عبارت است از طراحی حلقه کنترل سرعت دورانی که در آن با استفاده از تغییر زاویه گام پره، دور روتور در حد نامی خود ثابت نگاه داشته می‌شود. به علت آنکه کنترل کننده‌های خطی (PID) از نظر اقتصادی کم هزینه و از نظر فنی ساده می‌باشند، لذا کاربرد وسیعی در صنعت دارند. البته استفاده از این نوع کنترل کننده منوط به خطی نمودن معادلات حاکم بر سیستم دینامیکی می‌باشد.

۴- طراحی سیستم کنترل سرعت دورانی

برای طراحی کنترل دور چهار مرحله به شرح زیر باید طی شوند.

(الف) خطی نمودن معادله گشتاور آیرودینامیک

(ب) پیدا کردن رابطه گشتاور آیرودینامیک و گشتاور محور روتور

(ج) محاسبه تابع تبدیل سیستم کنترل دور ثابت

(د) تعیین مرز پایداری

گشتاور آیرودینامیک تابعی از سه متغیر سرعت باد، زاویه گام و سرعت دورانی است. یعنی:

$$Q = f(v, \beta, \Omega) \quad (8)$$

رابطه (۸) را می توان با استفاده از بسط تیلور به صورت زیر خطی کرد.

(۹)

$$\Delta Q = \left(\frac{\partial}{\partial v} Q \right) \Delta(v) + \left(\frac{\partial}{\partial \beta} Q \right) \Delta(\beta) + \frac{\partial}{\partial \Omega} Q \Delta(\Omega)$$

هدف ثابت نگاه داشتن β سرعت دورانی است لذا

تغییرات آن صفر بوده و رابطه ۹ بصورت زیر ساده

می شود.

$$\Delta(Q) = \left(\frac{\partial}{\partial v} Q \right) \Delta(v) + \left(\frac{\partial}{\partial \beta} Q \right) \Delta(\beta) \quad (10)$$

مشتقات گشتاور نسبت به سرعت با دو زاویه گام را می توان در چند نقطه عملکرد از سیستم محاسبه نمود. برای پیدا نمودن نقاط عملکرد مورد نیاز از منحنی (۲) استفاده می شود. با انتخاب نقاط عملکرد

مناسب بر روی منحنی های مذکور می توان مدلی خطی از سیستم بدست آورد. در مورد بند الف رابطه زیر بین گشتاور آیرودینامیک و گشتاور محور برقرار است.

$$T_{(aero)} - T_{(sh)} = T_{(acc)} \quad (11)$$

که در آن $T_{(aero)}$ گشتاور آیرودینامیک و $T_{(sh)}$ گشتاور محور روتور می باشد.

$T_{(acc)}$ گشتاوری است که باعث شتاب دورانی

محور روتور می شود و برابر است با

$$T_{(acc)} = J_t \Omega \quad (12)$$

چون در حلقه کنترل سرعت دورانی مقدار دور موتور ثابت می شود لذا شتاب محور روتور صفر خواهد شد و بنابراین گشتاور شتاب دهنده ای در سیستم وجود نخواهد داشت.

$$\Omega = \int \frac{T_{(aero)} - T_{(sh)}}{J_t} dt \quad (13)$$

گشتاور محور از رابطه زیر محاسبه می شود

$$T_{(sh)} = K(\theta(1) - \theta(2)) \quad (14)$$

یعنی گشتاور محور عبارت است از حاصل ضرب سختی پیچشی محور در تغییر زاویه پیچشی آن. در شکل (۳) الگوریتم مناسب برای کنترل سرعت بصورت نمودار جعبه ای ترسیم شده است.

در سومین مرحله از استفاده از قوانین نمودار جعبه ای تابع تبدیل سیستم کنترل شکل (۳) بدست می آید.

$$T_{transfer} \text{ Functinn} = \left(\begin{array}{l} ((37)Q_w V + 37Q_{pi} WK_p) s^3 + 37Q_{pi} K_i s^2 + \\ (-110000T_s + 110000Q_{pi} WK_p + 110000Q_w V) s + \\ 110000Q_{pi} WK_i / (10^7 S^4 + 37Q_{pi} K_p s^3 + 37Q_{pi} K_i + 0.31 \times 10^{11}) s^2 \\ + 110000Q_{pi} K_i s + 110000Q_{pi} K_i - 0.53 \times 10 \end{array} \right)$$

مخرج رابطه (۹) معادله مشخصه تابع تبدیل است. با معیار روت - هرویتس می توان مقادیر K_P (ضریب تناسب) و K_I (ضریب انتگرال گیر) که مرز پایداری را مشخص می نمایند، بدست آورد. نتایج بصورت جدول (۱) می باشد.

جدول (۱) K_I, K_P در هر یک از نقاط عملکرد به روش

روت - هرویتس

K_I	K_P	نقطه عملکرد
۵۷۷	۰/۳۸	۱
۱۵۲۷	۰/۱۲	۲
۷۰۰	۰/۱	۳
۷۰	۰/۴۱	۴
۱۲۵	۰/۱۲	۵

جدول (۲) K_I, K_P در هر یک از نقاط عملکرد به روش

سعی و خطا

K_I	K_P	نقطه عملکرد
۰/۱	۱	۱
۰/۳	۲	۲
۰/۴	۳	۳
۰/۷	۳	۴
۱	۳	۵

پس از مشخص شدن مرز پایداری، با روش سعی و خطا می توان ضرایب K_i و k_p را برای عملکرد بهینه سیستم کنترل بدست آورد. با شبیه سازی شکل (۳) توسط نرم افزار سیمولینک مقادیر K_i و k_p در هر یک از نقاط عملکرد استخراج می شود. جدول (۲) این مقادیر را نشان می دهد.

۵- بررسی نتایج

با خطی نمودن سیستم تحت کنترل، ضرایب K_i و

K_P کنترلر PI در پنج نقطه عملکرد از سیستم بدست آمد. اکنون با اعمال کنترلر PI به سیستم واقعی (غیرخطی) کارایی سیستم کنترل با ورودیهای مختلف باد بررسی می شود. برای آنکه کارایی کنترلر PI طراحی شده مورد بررسی قرار گیرد لازم است تا پاسخ سیستم واقعی به ورودیهای مختلف باد شبیه سازی شود. در شکل (۴) پاسخ ورودی پله نیروگاه ترسیم شده است. ورودی، بادی با مقدار سرعت ثابت ۲۵ متر بر ثانیه است. ملاحظه می گردد که سیستم به خوبی در سرعت دورانی خواسته شده 2rad/S اشباع شده است. در همان شکل خطای کنترلر نیز ترسیم شده و همانگونه که مشاهده می شود پس از زمانی معین به صفر میل می نماید.

ورودی دیگری که برای آزمایش کارایی کنترلر به سیستم واقعی اعمال می شود ورودی شیب است. در شکل (۴) پاسخ سیستم به ورودی شیب ترسیم شده است. ملاحظه می شود که سرعت دورانی محور روتور پس از مقداری جهش توسط کنترلر در مقدار خواسته شده ثابت می شود. یعنی با وجود اینکه سرعت باد در حال افزایش است، سرعت دورانی ثابت می ماند. در شکل (۵) خطای سیستم نیز ترسیم شده است.

اما مهمترین قسمت اعمال ورودی باد واقعی به سیستم و بررسی پاسخ سیستم واقعی است. اصولاً سرعت باد را می توان متشکل از چهار مؤلفه دانست که عبارتند از: مؤلفه سرعت باد پایه (ثابت)، مؤلفه باد بصورت ورودی شیب و مؤلفه اغتشاش باد. بنابراین بعنوان آخرین مرحله از آزمایش کارایی کنترلر، پاسخ سیستم به ورودی باد متشکل از مؤلفه های ذکر شده بررسی می شود. در شکل (۶) پاسخ مذکور ترسیم شده است. منحنیهای ترسیم شده در شکل (۶) عبارتند از: ورودی باد شبیه سازی شده، تغییرات زاویه گام بر حسب زمان (خروجی کنترلر)، سرعت دورانی محور

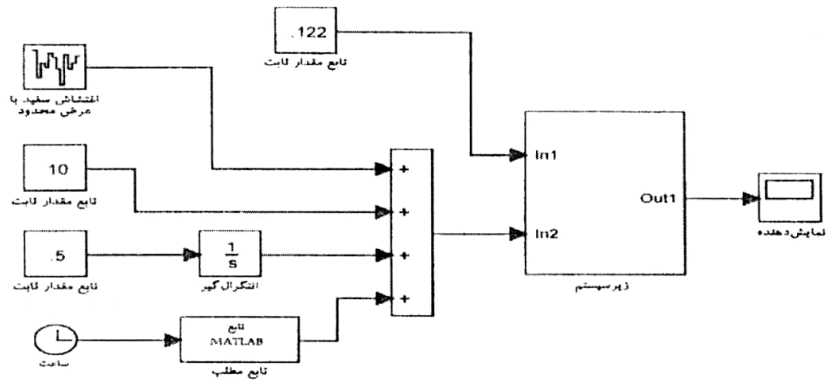
منابع و مراجع

- 1- P.Bongers, W.Strum, I. Kraas, "Control Option for Wind Energy Conversion System", European Community Wind Energy Conference, p.534537, 1993
- 2- L.L. Freris, "Wind Energy Conversion System", Prentice Hall, 1990.
- 3- D. L.E. Conreries. "Wind Power plants (Theory & Design)", Pergaman Press, 1982.
- 4- N.G. Calvert, "Wind Power principle & Their Application on the small scale." Charles Griffin Ltd., 1981.
- ۵- م. ح غفاری سعادت، ح. ر. لاری، م خردمند کیسمی، تحلیل دینامیکی و شبیه سازی توربینهای بادی، نشریه علمی برق، شماره ۳۳، صفحه ۴۴-۵۵، ۱۳۸۰
- 6- P.M. Anderson, A. Bose, Stability Simulation of wind Turbine System, IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS 02, No. 12, 1983
- 7- E.N. Hinrichen, Control for Variable Pitch Wind Turbine Generator, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS 103, No.4, 1984.

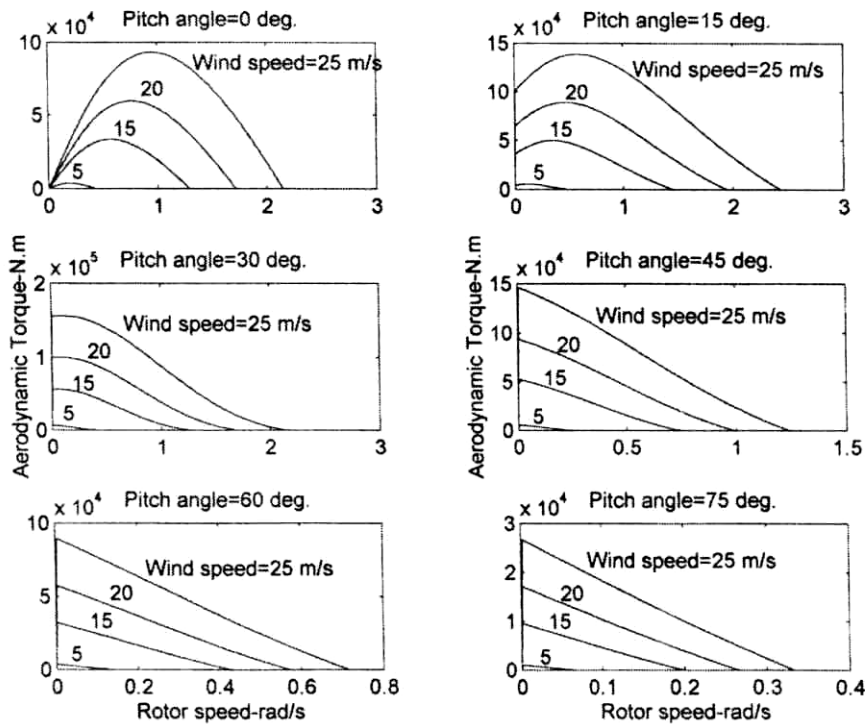
روتور و خطای سیستم کنترلر برای آنکه به تغییرات سرعت باد پاسخ دهد و سرعت دورانی را در مقداری معین ثابت نگاه دارد. زاویه گام را متناسب با ورودی متغیر تنظیم می نماید.

۶- بحث و نتیجه گیری

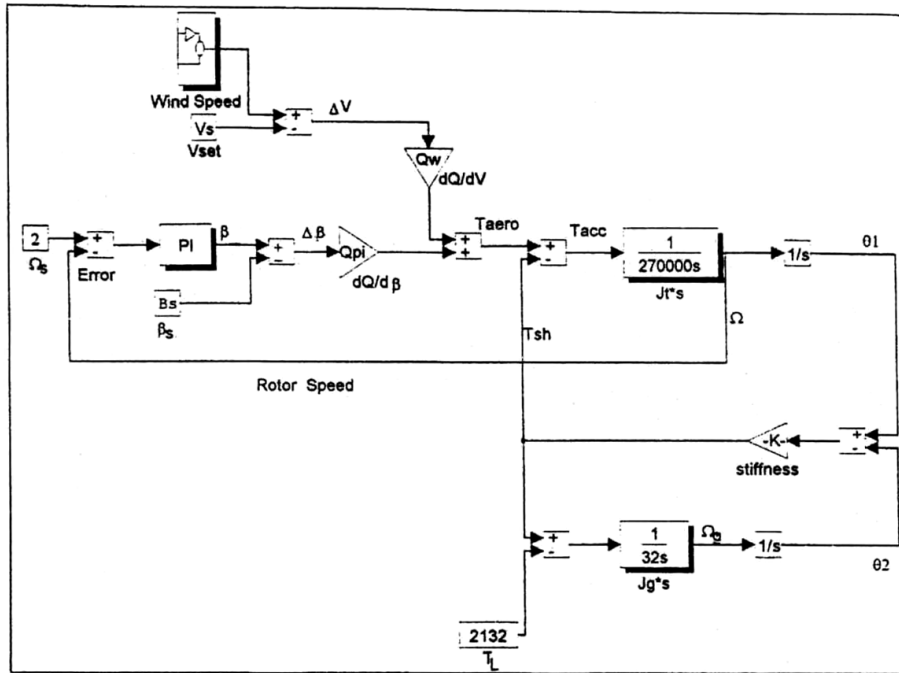
به منظور بحث و نتیجه گیری و جمع بندی مطالب ارائه شده، ابتدا لازم است تا روند طراحی سیستم کنترل بار دیگر مرور شود. پس از بررسی اولیه بر روی اهداف طراحی سیستم کنترل و انواع روشها و مکانیزمهای کنترلی، طراحی مفهومی سیستم کنترل نیروگاه بادی محور افقی در حالت دور ثابت و با استفاده از مولد اقلایی (آسنکرون) انجام شد. شبیه سازی کامپیوتری با استفاده از نرم افزار سیمولینک انجام شده است. اگر اهداف طراحی سیستم کنترل بار دیگر مرور شود ملاحظه می گردد که کنترلر PI طراحی شده یکی از هدفها (کنترل تولید توان الکتریکی در محدوده وسیعی از سرعتهای باد) را با توجه به نتایج بدست آمده، تأمین می نماید. اما جواب به این سوال که آیا کنترلر PI هدف دیگر (کاهش بارهای دینامیکی بر روی محور روتور، ریشه پره ها و سیستم انتقال قدرت) را تأمین می نماید منوط به بررسی بیشتر کنترلر به خصوص به صورت عملی می باشد. استفاده از کنترلرهای غیر خطی برای نیل به هدف مذکور (با توجه به طبیعت کاملاً غیرخطی سیستم) یکی از روشهای پیشنهادی می باشد. البته هم اکنون کنترلرهای PI بعلت سادگی و ارزانی به طور وسیع در توربینهای بادی استفاده می شوند.



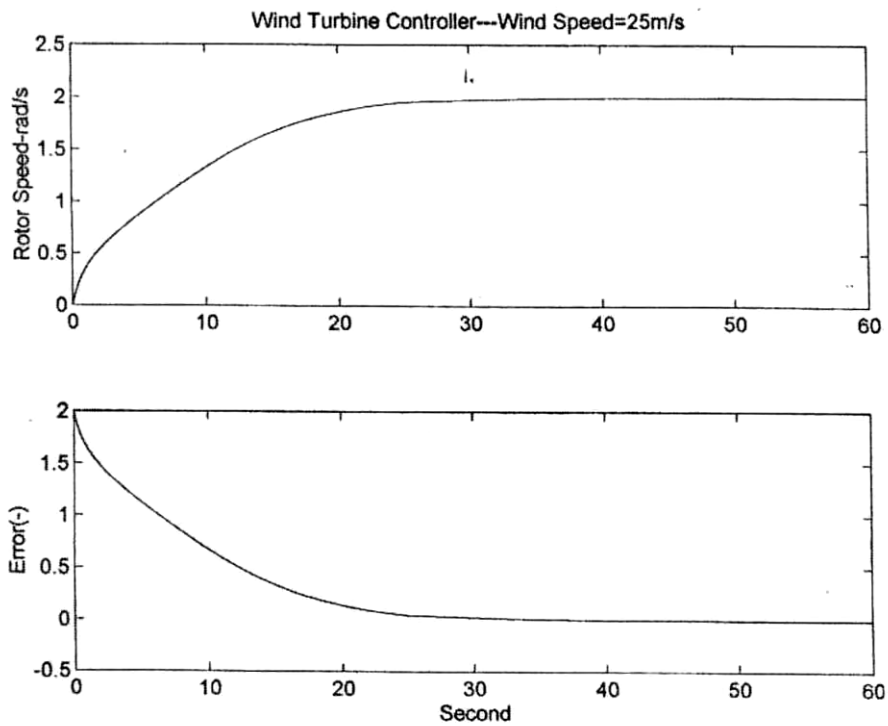
شکل (۱)- نمودار جعبه ای اعمال ورودیهای مختلف برای شبیه سازی توربین بادی



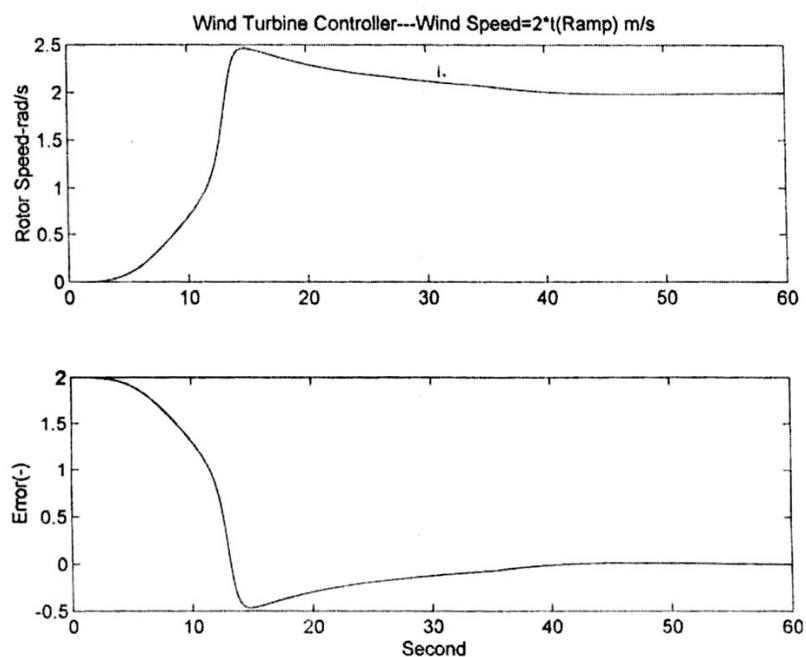
شکل (۲)- منحنی های گشتاور آیرودینامیک بر حسب سرعت دورانی در زوایای گام مشخص و سرعتهای باد متفاوت



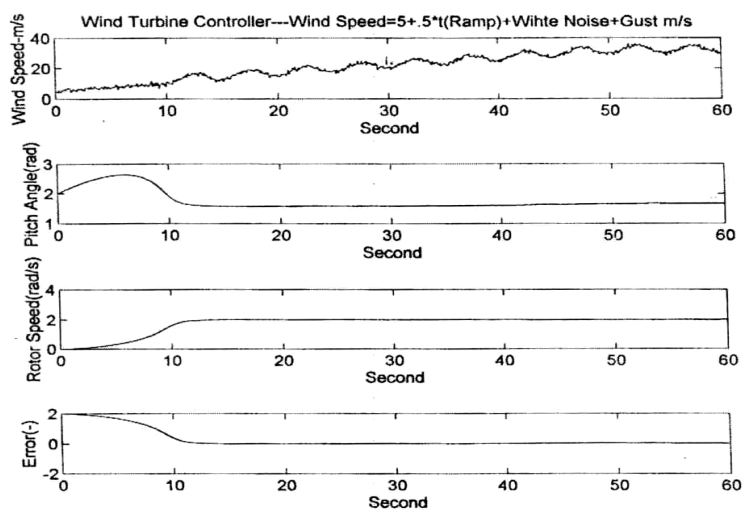
شکل (۳) - نمودار جعبه ای سیستم کنترل دور ثابت در حالت خطی



شکل (۴) - پاسخ ورودی پله سیستم غیر خطی تحت کنترل



شکل (۵) - پاسخ ورودی شیب سیستم غیر خطی تحت کنترل



شکل (۶) - پاسخ سیستم واقعی (غیر خطی) به ورودی باد واقعی (شبیه سازی شده)