مدلسازی غیرخطی توربین بادی دیزباد و کنترل آن بر اساس کنترلگر فیدبک بهینهٔ تصادفی

حمید خالوزاده[۱]، مسعود اکبری ثانی [۲]

دانشیارگروه کنترل دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی[۱]، کارشناسی ارشد کنترل دانشگاه فردوسی مشهد[۲]

[1]h_khaloozadeh@kntu.ac.ir، [2]makbarisani@yahoo.com

چکیده: در این مقاله ابتدا مدلسازی توربین بادی، ژنراتور القایی، شافت انتقالی، خازن استاتیکی توان راکتیو و مدلسازی خط انتقال برای کنترل خروجی ماشین بصورت غیرخطی انجام شده است که در مجموع معادلات فضای حالت غیرخطی با ۱۳ متغیر حالت را تشکیل می دهد. با توجه به در دسترس نبودن حالتها و وجود نویز فرایند و نیز با توجه به اینکه مولد اصلی نیروگاه های بادی، عامل شبه تصادفی باد بوده و یکی از مولفه های تشکیل دهنده باد مولفه تصادفی آن است، استفاده از تئوری کنترل تصادفی مناسب بنظر می رسد به همین منظور، برای کنترل خروجی ماشین، یک تخمینگر بهینهٔ تصادفی و یک کنترلگر بهینهٔ تصادفی با توجه به تابع هزینه برای سیستم توربوژنراتور بادی طراحی می شود و عملکرد آن با کنترلگر فیدبک خروجی و نیز با کنترلگر فیدبک حالت همراه با فیلتر کالمن تعمیم یافته بعنوان تخمینگر حالت، مقایسه می شود. پاسخ سیستم حلقه بسته با کنترل بهینه تصادفی در مقایسه با تخمینگر کالمن با جایابی قطب میرایی مطلوبی در برابر نوسانات باد دارد، که مبین کارائی بالای کنترلر بهینهٔ تصادفی است.

واژه های کلیدی: کنترلگر فیدبک حالت و خروجی، توربو ژنراتور بادی، جبران کنندهٔ توان راکتیو، فیلتر کالمن تعمیم یافته، کنترل بهینهٔ تصادفی

Abstract: This paper presents nonlinear modeling, simulation, and controller design for wind energy conversion system in Dizbad power plant. The wind power plant scheme consists of a three-phase induction generator that connected to the wind turbine via a fixed ratio gearbox. A static VAR compensator was connected at the generator terminals to regulate its voltage. The induction generator was connected to the utility through a double transmission line. The mechanical power input and terminal voltage output was controlled using blade pitch angle and firing angle of thyristor. An optimal stochastic control is designed for the system based on the optimal stochastic estimator. The performance of the proposed scheme is compared with both output feedback and state feedback controllers with extended Kalman filter. These controllers are applied to the nonlinear system and their performances are recognized under gust and different type of disturbances. The responses of the proposed optimal stochastic controller exhibited a good damping and fast recovery under these disturbances.

Keywords: State and Output Feedback Controllers, Wind Turbo Generator, VAR Compensator, Extended Kalman Filter, Stochastic Optimal Control.

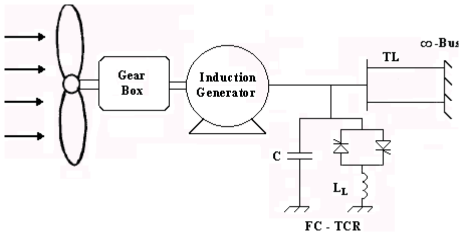
۱. مقدمه

به علت ماهیت تغییرپذیری سرعت باد با زمان، کنترل سیستم غیرخطی توربین بادی مسأله ای مشکل جلوه می‌نماید. زیرا، علاوه بر تغییرات دائم سرعت باد، مسألهٔ برش باد توسط پره ها نیز موجب اعمال ورودی کاملاً غیر یکنواخت به سیستم می شود. روش های گوناگونی برای حل این مشکل تاکنون پیشنهاد شده است. در [1] استفاده از یک سیستم دیزل در شبکه های ضعیف به عنوان جبرانگر ما به التفاوت بار پیشنهاد شده است. در [2] از یک ژنراتور سنکرون استفاده شده است و به کمک کنترل زاویهٔ فراز پره ها، سرعت توربین در نزدیکی سرعت ثابت ژنراتور نگه داشته شده است. در [3] یک کنترلگر فازی برای کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون و زاویهٔ آتش تریستور طراحی شده است. به علت قابلیت اطمینان بالاتر و هزینهٔ کمتر، استفاده از ژنراتورهای القائی در سیستم های تبدیل انرژی بادی، در سالهای اخیر بیشتر شده است. یک مدل ریاضی برای سیستم تبدیل انرژی بادی ژنراتور القایی با باتری در [4] بیان شده است. در [5] کنترل حالت لغزشی، بر روی مبدل اعمال شده است. این کنترلگر سیستم را مجبور به دنبال نمودن و میرا نمودن نوسانات باد نموده و نوسانات گشتاور را میرا می کند. در [6] استفاده از SVC همراه با ژنراتورهای القایی به جای استفاده از ژنراتور سنکرون در سیستم تبدیل انرژی بادی، بیان شده است.

در این مقاله ابتدا مدلسازی سیستم مرکب توربین – ژنراتور یک نیروگاه بادی متشکل از توربین بادی، ژنراتور القایی، شافت انتقالی، خازن استاتیکی توان راکتیو و مدلسازی خط انتقال برای کنترل خروجی ماشین بصورت غیرخطی انجام می شود، سپس برای کنترل و ردیابی توان و ولتاژ ماشین، از یک کنترلگر فیدبک بهینهٔ تصادفی بر پایهٔ تخمین بهینهٔ تصادفی استفاده می شود. این تخمین با توجه به دینامیک واقعی سیستم، نویزهای فرایند و اندازه گیری برای سیستم در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه سیستم تبدیل انرژی بادی یک سیستم غیر خطی است، فیلتر کالمن تعمیم یافته برای این سیستم در جهت تخمین غیرخطی حالت‌های نویزدار طراحی شده و کنترلگر فیدبک حالت با جایابی قطب با توجه به آن طراحی می شود. پس از اعمال، پاسخ آن با کنترلگر بهینهٔ تصادفی مقایسه می شود.

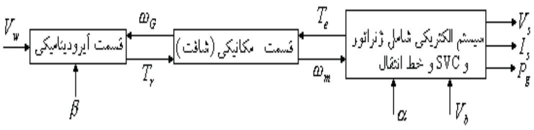
۲. ساختار سیستم ژنراتور بادی

شکل (۱) ساختار سیستم تبدیل انرژی بادی را نشان می‌دهد. این سیستم شامل یک ژنراتور القایی است که از یک طرف به رتور توربین بادی و از طرف دیگر از طریق یک خط انتقال دو سیمه به شبکه متصل شده است. برای تنظیم ولتاژ در ترمینال های ماشین القایی از یک جبران کنندهٔ توان راکتیو استاتیک (SVC) استفاده شده است. این جبران کننده شامل یک خازن ثابت و یک سلف متغیر است که به کمک تغییر زاویهٔ آتش تریستور، اندوکتانس آن تغییر می کند.



شکل (۱) ساختار سیستم تبدیل انرژی بادی

ورودی های سیستم فوق شامل زاویهٔ آتش تریستور SVC و زاویهٔ انحراف پره توربین می باشد. متغیرهای قابل اندازه گیری سرعت ژنراتور ω_m و ولتاژ و توان و جریان آن (P_g, V_s, I_s) می باشد. ورودی اغتشاش سیستم سرعت باد v_w می باشد. همچنین ولتاژ شبکهٔ باس بی‌نهایت V_b معلوم و ثابت فرض می شود. دیاگرام بلوکی سیستم در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل (۲) دیاگرام بلوکی کلی سیستم

۳. مدل سازی سیستم مرکب نیروگاه بادی

۱.۳. مدل توربین بادی

توربین بادی به صورت یک سیستم سه ورودی و یک خروجی مدل می شود. میزان خروجی توان تولیدی یک توربین بادی، به سرعت باد و سرعت رتور و زاویهٔ فراز توربین بادی بستگی دارد. رابطهٔ توان به شکل زیر می باشد.

$$P_m = A_R \cdot \frac{\rho}{2} C_p V^3 \tag{1}$$

در سیستم فوق P_m قدرت مکانیکی توربین، A_R سطح جاروب شده پره های رتور، ρ چگالی هوا، V سرعت لحظه ای ورودی باد و C_p ثابت قدرت توربین می باشد. [7]

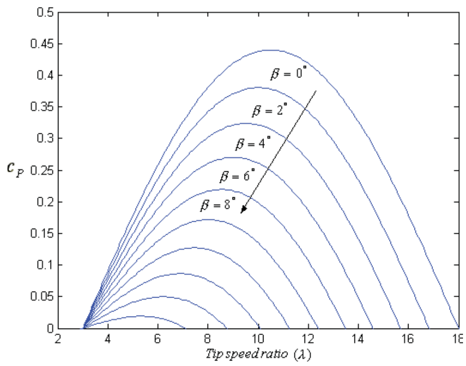
ثابت قدرت C_p را می توان از طریق اندازه گیری مستقیم و یا از طریق محاسبات آیرودینامیکی به دست آورد. ثابت قدرت تابعی از زاویهٔ پره ها و نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد می باشد $(C_p(\lambda, \beta))$. این ثابت قدرت به صورت زیر تعریف شده است. [1]

$$C_P(\lambda,\beta) = (0.44 - 0.0167\beta)\sin\left[\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda-3)\cdot\beta \tag{2}$$

که در آن β زاویهٔ فراز پره ها و $\lambda = \frac{R \cdot \omega_R}{V}$ (نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد ورودی) است و ω_R سرعت زاویه ای چرخش پره های توربین و R شعاع رتور است. گشتاور مکانیکی توربین از رابطهٔ زیر حاصل می شود.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_R} = \frac{1}{2}\rho ARC_p V^2 / \lambda \qquad (3)$$

دیده می شودً قدرت مکانیکی توربین بادی به سه عامل سرعت باد، زاویهٔ پره ها و سرعت زاویه ای رتور ارتباط دارد. شکل زیر تغییرات ضریب توان رانشان داده است .



شکل (۳) تغییرات ضریب توان نسبت به (λ) برای زوایای فراز مختلف

۲.۳. مدل ژنراتور القایی

مدل ژنراتور القائی در دستگاه مرجع سنکرون در راستای محورهای d,q وقتی که شارهای نشتی به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شوند، به صورت زیر است [8]. بایستی یادآور شد که این شکل نمایش برای اجرا و شبیه سازی نسبت به حالتی که جریان ها را بـه عنـوان متغیـر حالـت در نظـر بگیریم، مناسب تر است.

$$\dot{\varphi}_{ds} = \omega_b (V_{ds} - R_s i_{ds} + \varphi_{qs}) \qquad (4)$$

$$\dot{\varphi}_{qs} = \omega_b (V_{qs} - R_s i_{qs} - \varphi_{ds}) \qquad (5)$$

$$\dot{\varphi}_{dr} = \omega_b (V_{dr} - R_r i_{dr}) + (\omega_b - \omega_m)\varphi_{qr} \qquad (6)$$

$$\dot{\varphi}_{qr} = \omega_b (V_{qr} - R_r i_{qr}) - (\omega_b - \omega_m)\varphi_{dr} \qquad (7)$$

در این معادلات رابطهٔ جریان ها با شارها به صورت زیر است.

$$\varphi_{qs} = X_{ss} i_{qs} + X_M i_{qr} \qquad (8)$$

$$\varphi_{ds} = X_{ss} i_{ds} + X_M i_{dr} \qquad (9)$$

$$\varphi_{qr} = X_M i_{qs} + X_{rr} i_{qr} \qquad (10)$$

$$\varphi_{dr} = X_M i_{ds} + X_{rr} i_{dr} \qquad (11)$$

با قرار دادن مقادیر معادل جریان ها به جای شارها سیستم فضای حالت زیر تولید می شود.

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{qs} \\ \dot{\varphi}_{ds} \\ \dot{\varphi}_{qr} \\ \dot{\varphi}_{dr} \end{bmatrix} = \omega_b \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} - \omega_b \begin{bmatrix} \frac{R_s X_{rr}}{D} & 1 & -\frac{R_s X_M}{D} & 0 \\ -1 & \frac{R_s X_{ee}}{D} & 0 & -\frac{R_s X_M}{D} \\ -\frac{R_r X_M}{D} & 0 & \frac{R_r X_{ss}}{D} & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \\ 0 & -\frac{R_r X_M}{D} & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & \frac{R_r X_{ss}}{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} \qquad (12)$$

در این معادلات، تمامی متغیرهای رتور به سمت استاتور منتقل شده انـد. گشتاور الکترو مغناطیسی رتور به صورت pu [1] به صورت زیر نوشته می شود.

$$T_e = \varphi_{dr} i_{dr} - \varphi_{dr} i_{qr} \qquad (13)$$

۳.۳. مدل شافت انتقالی

در مـدل گیـربکس بـرای سـاده سـازی از دینامیـک قسـمتهای بـزرگ مکانیکی که به طور قابل ملاحظه ای در مقایسه بـا قسـمت هـای مکـانیکی آهسته هستند، صرفنظر می شود. این امر خصوصـاً در ماشـینهای بـا اینرسـی بالا و در زمانهایی که پارامترهای لازم موجود نیست، صادق می باشد. پـس در این حالت با صرفنظر کردن از دینامیـک دماغـه و در نظـر گـرفتن عـدم انعطاف در شافت، سرعت زاویـه ای پـره ω_m و سـرعت زاویـه ای دماغـه رتور ω_H و سرعت زاویه ای طرف کم سرعت گیربکس ω_G، بـه طـور برابر در نظر گرفته می شود. در این سیستم سرعت مکـانیکی رتـور ژنراتـور ω_m به صورت زیر تعریف مـی شـود کـه در آن R_G ضـریب گیـربکس است.

$$\omega_m = R_G \omega_G \qquad (14)$$

با در نظر گرفتن رابطهٔ بین سرعت زاویهٔ الکتریکی و مکـانیکی بـه صـورت $\omega_r = \frac{p}{2}\omega_m$ معادلهٔ دینامیک حرکت به صورت زیر خواهد شد:

$$\dot{\omega}_m = \frac{\omega_b}{2H_A}(T_m - T_e) \qquad (15)$$

که در آن H_A ثابت زمانی مجموع اینرسی توربین بادی و ژنراتور القـایی است.

۴.۳. مدل خازن استاتیکی توان راکتیو

در این مقاله از یک خازن ثابت جبران کننده توان راکتیـو کنتـرل شـده توسط تریستور برای ثابت نگه داشتن ولتاژ در پایانـه هـای ژنراتـور اسـتفاده می شود. این امر با کمک تنظیم پیوسته توان راکتیو بـا کمـک تغییـر زاویـهٔ آتش تریستور حاصل می شود. برای خازن ثابت، رابطهٔ بین ولتـاژ و جریـان به صورت معادلات فضای حالت در راستای محورهای d,q به شکل زیر است:

[1] Per unit

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{qs}\\ \dot{V}_{ds}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -\omega_b\\ \omega_b & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_{qs}\\ V_{ds}\end{bmatrix}+\omega_b X_c\begin{bmatrix}i_{qc}\\ i_{dc}\end{bmatrix} \qquad (16)$$

برای تریستور، هدایت کامل در زاویهٔ ۹۰ درجه رخ می دهد. افزایش زاویهٔ آتش باعث کاهش توان راکتیو و جریان راکتیو می شود. با استفاده از تحلیل فوریه عناصر جریان القایی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$i_L=\frac{2(\pi-\alpha)-\sin[2(\pi-\alpha)]}{\pi X_L}V_s=\frac{V_s}{X_{eq}} \qquad (17)$$

که در آن X_{eq} راکتانس معادل تریستور و α زاویهٔ آتش است. معادلات دیفرانسیل در راستای محورهای d,q به شکل فضای حالت برای i_L در دستگاه مرجع سنکرون به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix}\dot{i}_{qL}\\ \dot{i}_{dL}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -\omega_b\\ \omega_b & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{qL}\\ i_{dL}\end{bmatrix}+\frac{\omega_b}{X_{Leq}}\begin{bmatrix}V_{qs}\\ V_{ds}\end{bmatrix} \qquad (18)$$

۵.۳. مدل خط انتقال

معادلات خط انتقال در راستای محورهای d,q در دستگاه مرجع سنکرون به شکل فضای حالت، به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix}\dot{i}_{qTL}\\ \dot{i}_{dTL}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{\omega_b R_{TL}}{X_{TL}} & -\omega_b\\ \omega_b & -\frac{\omega_b R_{TL}}{X_{TL}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{qTL}\\ i_{dTL}\end{bmatrix}+\frac{\omega_b}{X_{TL}}\begin{bmatrix}V_{qs}\\ V_{ds}\end{bmatrix}-\frac{\omega_b}{X_{TL}}\begin{bmatrix}V_{qb}\\ V_{db}\end{bmatrix}$$
(19)

٤. مدل خطی شدهٔ سیگنال کوچک

با توجه به زیر سیستم های موجود در یک سیستم تبدیل انرژی بادی (رتور توربین بادی، ژنراتور القائی، خط انتقال دو سیمه، گیربکس نسبت ثابت و جبران کنندهٔ توان راکتیو (SVC)) در نهایت می توان شکل فضای حالت سیستم نهایی را به دست آورد. اگر معادلات حالت حول نقطه کار خطی شوند، مدل سیگنال کوچک به صورت زیر در می آید:

$$\dot{X}=AX+Bu$$

که در آن X,u به شرح زیر است:[7]

$$X=[\Delta\varphi_{ds},\Delta\varphi_{qs},\Delta\varphi_{dr},\Delta\varphi_{qr},\Delta\omega_r,\Delta V_{ds},\Delta V_{qs},\Delta i_{dl},\Delta i_{ql},\Delta i_{dTL},\Delta i_{qTL}]^t$$
$$u=[\Delta\beta,\Delta\alpha]^t$$
$$d=\Delta V_w$$

متغیرهای حالت در ضمیمه معرفی شده اند. این تغییرات همگی حول نقطهٔ کار و در دستگاه مرجع سنکرون در محورهای d,q هستند. ماتریس های A,B نیز در ضمیمه آمده است.

روش طراحی کنترلگر در این مقاله، بر پایهٔ مدل خطی فضای حالت است. مدل غیر خطی سیستم نیروگاه بادی شامل معادلات (12) (15),(16) (18),(19)در حول نقطه کار خطی شده است. مدل خطی به شکل زیر است:

$$\dot{X}=AX+Bu+\delta d$$
(20)

که در آن X,u,d به شرح زیر است.

$$X=[\Delta\varphi_{ds},\Delta\varphi_{qs},\Delta\varphi_{dr},\Delta\varphi_{qr},\Delta\omega_r,\Delta V_{ds},\Delta V_{qs},\Delta i_{dl},\Delta i_{ql},\Delta i_{dTL},\Delta i_{qTL}]^t$$
$$u=[\Delta\beta,\Delta\alpha]^t$$
$$d=\Delta V_w$$

لازم به ذکر است که در روند خطی سازی، نقاط کار متغیرهای حالت، ورودی و باد بایستی معین شوند. پس از چند بار اجرای برنامه بردار نقطه کار پایدار $X_{014\times1}$ شامل ۱۱ متغیر حالت و دو ورودی و یک اغتشاش به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$X_0=[\varphi_{ds0},\varphi_{qs0},\varphi_{dr0},\varphi_{qr0},\omega_{0r},V_{ds0},V_{qs0},i_{dl0},i_{ql0},\\ i_{dTL0},i_{qTL0},\beta_0,\alpha_0,V_{w0}]^t$$

بردار عددی X_0 به صورت زیر است.

$$X_0=[0.80,0.10,0.74,0.233,323.58,-0.09,0.80,0.17,0.02,\\ -0.35,0.61,6,1.66,12.5]^t$$

٥. طراحی کنترلگر فیدبک حالت

خروجی توربین بادی عمدتاً شامل ولتاژ پایانه و توان ماشین می باشد. دو راه برای کنترل توربین بادی وجود دارد. اولین راه، کنترل توان راکتیو برای تنظیم ولتاژ در پایانه های ماشین القایی است. ابزار کنترل در این روش زاویهٔ آتش تریستور سلف SVC است. دومین راه، کنترل گشتاور ورودی به ژنراتور بادی است. ابزار کنترل در این روش تغییر زاویهٔ فراز پره های توربین بادی است. برای کاهش فشارهای مکانیکی بر روی سیستم پیچش توربین بادی، یک حد محدود $\pm 10\deg/s$ برای عملگر تغییر دهندهٔ زاویهٔ توربین در نظر می گیریم. تنظیمات توان الکتریکی و تنظیمات ولتاژ از طریق کنترلگر I حاصل می شود. طراحی این کنترلگرها بر پایهٔ مدل خطی است. دو انتگرال گیر بر روی سیگنال های خطای $(P_{ref}-P_g)$ و $(V_{ref}-V_s)$ اعمال می شود. این دو سیگنال با مدل خطی شده فضای حالت قبلی ترکیب می شوند، تا مدل افزوده زیر حاصل شود.

$$\dot{z}=\Phi z+\Gamma u+Ed \qquad (21)$$

که در آن پارامترها به صورت زیر تعریف می شود.

$$z_{13\times1}=\begin{bmatrix}X_{11\times1}\\ \gamma_{2\times1}\end{bmatrix},$$
$$\gamma=\left[\int(\Delta P_{ref}-\Delta P_g)dt,\int(\Delta V_{ref}-\Delta V_s)dt^{t}\right]$$
$$\Phi_{13\times13}=\begin{bmatrix}A_{11\times11} & 0\\ -D_{2\times11} & 0\end{bmatrix},\Gamma_{13\times1}=\begin{bmatrix}B_{11\times2}\\ 0\end{bmatrix},E_{13\times1}=\begin{bmatrix}\delta_{11\times1}\\ 0\end{bmatrix}$$

با توجه به مدل افزوده بالا، کنترلگر فیدبک حالت با کمک روش های طراحی جایابی قطب به شکل زیر حاصل می شود.

$$u=-K_s z \tag{22}$$

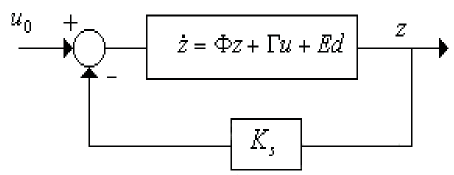
با انتخاب قطب های حلقه بسته ماتریس K_s حاصل می شود. بردار خروجی y به صورت زیر نوشته می شود.

$$y_{6\times1}=C_{6\times13}z_{13\times1} \tag{23}$$

که در آن بردار y به صورت رابطهٔ (24) تعریف می شود.

$$y=[\Delta P_g,\Delta V_s,\Delta I_s,\Delta\omega_r\int(\Delta P_{ref}-\Delta P_g)dt,\\ \int(\Delta V_{ref}-\Delta V_s)dt]^{t} \tag{24}$$

شکل زیر دیاگرام بلوکی کنترلگر فیدبک حالت را نشان می دهد. [2]



شکل (۴) کنترلگر فیدبک حالت

با انتخاب قطب های حلقه بسته در مکان های مشخص شده در جدول (۱) ماتریس K_s به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$K_s=\begin{bmatrix}106.29 & 195.06 & 47.54 & 32.02 & -71.67 & -0.821 & 2.67 & \cdots & -22.008 & -639.9 & -3.21 & -99.82 & 2746.2 & -7678.5\\ -0.438 & 0.073 & 1.479 & -4.84 & 0.804 & 0.013 & -0.016 & \cdots & 0.688 & -0.616 & 0.04 & -0.648 & 37.11 & -144.1\end{bmatrix}$$

قطب های مطلوب حلقه بسته به گونه‌ای انتخاب شده اند که پاسخ ها میرایی لازم را داشته باشند.

جدول (۱) قطب های سیستم حلقه باز و سیستم حلقه بسته با فیدبک حالت

مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته با فیدبک حالت	مقادیر ویژه سیستم حلقه باز
$-23.4+j2888.4$	$-23.4+j2888.4$
$-23.4-j2888.4$	$-23.4-j2888.4$
$-27.28+j2134.4$	$-27.28+j2134.4$
$-27.28-j2134.4$	$-27.28-j2134.4$
$-22.04+j375.08$	$-22.04+j375.08$
$-22.04-j375.08$	$-22.04-j375.08$
$-30+j377$	$-0.34+j377$
$-30-j377$	$-0.34-j377$
$-37.14+j9.59$	$-37.14+j9.59$
$-37.14-j9.59$	$-37.14-j9.59$
-40	-0.42
-5.5	0
-0.8	0

۶. طراحی فیلتر کالمن تعمیم یافته

تئوری کنترل بهینه قطعی[2] در حالت کلی تنها در برخی حالت های عادی عاری از نویز که تمامی حالت ها قابل اندازه‌گیری هستند، قابل اجراء می باشد. روش کنترل تصادفی از این تخمین حالت برای کنترل بهینه یک سیستم تصادفی استفاده می کند.

در سیستم توربین بادی با توجه به اینکه خروجی ها علاوه بر اینکه در دسترس نمی باشند، آلوده به نویز نیز می باشند. استفاده از فیلتر کالمن ضروری است.

مسأله تخمین برای سیستم های غیرخطی در حالت کلی یک کار دشوار است. برای دستیابی به یک الگوریتم محاسبه ای برای سیستم‌های غیرخطی، برخی تقریب ها اعمال شده است که در نهایت به فیلتر کالمن تعمیم یافته منجر می شود. مدل سیستم و مدل اندازه گیری به صورت زیر است:

$$\dot{z}=f(z,u,t)+G(t)w\\ y=h(z,t)+v\\ z(0)\approx N(\bar{z}_0,p_0),w\approx N(0,Q),v\approx N(0,R) \tag{25}$$

که در آن z متغیر تصادفی با متوسط و واریانس در لحظهٔ صفر برابر $(\bar{z}_0,p_0)$ و $f(x,u,t)$ تابع غیر خطی سیستم و u ورودی سیستم و w نویز فرایند و G ماتریس وزنی متغیر با زمان نویز و y خروجی قابل اندازه‌گیری و v نویز اندازه‌گیری می‌باشد.

[2]Deterministic optimal control

هدف تخمین $\hat{z}$ به صورتی است که بهترین و نزدیک ترین حالت را به حالت z در حضور نویزهای ناشناخته و تصادفی داشته باشد. بردار حالت های اولیه به صورت زیر است.

$$P(0)=p_0\,,\hat{z}(0)=\bar{z}_0 \quad (26)$$

به روز شدن ماتریس مربعی کواریانس خطای تخمین به صورت زیر است:

$$\dot{P}=A(\hat{z},t)P+PA^T(\hat{z},t)+GQG^T-PH^T(\hat{z},t)R^{-1}H(\hat{z},t)P \quad (27)$$

در این رابطه A و H (ماتریسهای ژاکوبین) به صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{cases} A(z,t)=\dfrac{\partial f(z,u,t)}{\partial z} \\ H(z,t)=\dfrac{\partial h(z,t)}{\partial z} \end{cases} \quad (28)$$

پس از حل معادلهٔ ریکاتی و مشخص شدن ماتریس کواریانس خطای $P(t)$ بهرهٔ کالمن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K(t)=P(t)H^T(\hat{z},t)R^{-1} \quad (29)$$

در نهایت، معادلهٔ دیفرانسیل تخمین حالتها به صورت زیر در می آید:

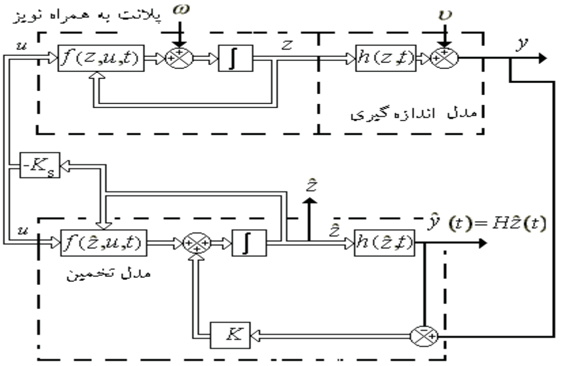
$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}&=f(\hat{z},u,t)+K(y-h(\hat{z},t)) \\ \hat{y}&=h(\hat{z},t) \end{aligned} \quad (30)$$

ثابت می شود که تخمین فوق، بهترین تخمین برای سیگنال غیر قابل دسترس و نویزدار z از نظر کمترین کواریانس خطا می‌باشد. برای سیستم خطی نیروگاه بادی همان طور که در قسمت قبل بیان شد، ۱۳ متغیر حالت و ۶ خروجی و ۲ ورودی وجود دارد. نویز فرایند به صورت یک بردار 13×1 تصادفی گوسی با میانگین صفر و قدرت $-30db$ مدل شده است. از آنجایی که همه حالت ها دارای یک نویز مشابه نمی‌باشند، می توان ماتریس وزنی G را صورت یک ماتریس قطری به صورت زیر در نظر گرفت:

$$G=diag[1\quad 1\quad 1\quad 1\quad 5\quad 4\quad 4\quad 3\quad 3\quad 10\quad 10\quad 10\quad 10]$$

همچنین نویز اندازه‌گیری را به صورت یک بردار نویز 6×1 تصادفی گوسی با میانگین صفر و قدرت $-30\ db$ مدل شده است.

در نهایت فیدبک حالت به این مسأله اعمال شده است. بایستی توجه داشت بردار فیدبک به تخمین حالات($\hat{z}(t)$) اعمال می‌شود که از فیلتر کالمن توسعه یافته غیرخطی حاصل می‌شود. دیاگرام بلوکی سیستم حلقه بسته با فیدبک حالت و فیلتر کالمن تعمیم یافته در شکل زیر آمده است.



شکل (۵) دیاگرام بلوکی سیستم غیر خطی حلقهٔ بسته آلوده به نویز و تخمین حالتها به کمک فیلتر کالمن تعمیم یافته

۷. مسألهٔ گوسی درجهٔ دوم خطی زمان پیوسته (LQG)

مدل سیستم به صورت زیر فرض می شود:

$$\dot{x}=Ax+Bu+Gw \quad (31)$$

که در آن x متغیر حالت تصادفی با متوسط و واریانس در لحظهٔ صفر $x(t_0)\approx N(\bar{x}_0,p_0)$ و A,B ماتریس های سیستم و u ورودی سیستم و w نویز فرایند به صورت گوسی $w\approx N(0,Q)$ و G ماتریس وزنی نویز می باشد.

شاخص عملکرد به صورت درجهٔ دوم زیر است :

$$J[x(t_0),t_0]=\frac{1}{2}x^T(T)S(T)x(T)+\frac{1}{2}\int_{t_0}^{T}(x^TQx+u^TRu)dt \quad (32)$$

که در آن، $S(T)\geq 0$ ماتریس وزنی متقارن و $Q\geq 0, R>0$ ماتریس های وزنی حالت ها و ورودی می‌باشد. پلانت و ماتریس‌های وزنی می توانند توابعی از زمان باشند.

هدف تعیین سیگنال کنترل $u^*(t)$ در بازهٔ $[t_0,T]$ به صورتی است که امید تابع هزینهٔ زیر را حداقل کند.

$$j(t_0)=E\{J[x(t_0),t_0]\} \quad (33)$$

که در آن $x(T)$ آزاد و زمان T ثابت است.

این مسأله، به نام *مسألهٔ کنترل خطی درجهٔ دوم گوسی*[3] *(LQG)* شناخته می شود.

- **حالت ها معلوم**

در ابتدا فرض می کنیم که حالت $x(t)$ دقیقاً قابل اندازه‌گیری باشد. در این حالت قانون کنترل فیدبک خطی به صورت زیر خواهد بود:

$$u(t)=-K(t)x(t) \quad (34)$$

روابطی که در آن شاخص عملکرد را حداقل می کند؛ به صورت زیر است: [9]

بردار بهرهٔ فیدبک به صورت زیر تعیین می شود:

[3]Linear Quadratic Gaussian

$$K(t) = R^{-1}B^T S(t) \qquad (35)$$

که در آن:

ماتریس متقارن زمانی $S(t)$ از حل معادلهٔ ریکاتی به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$-\dot{S} = A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q \qquad (36)$$

با توجه به این دو، تابع هزینهٔ $j(t_0)$ به صورت حالت بهینهٔ $j^*(t_0)$ در می‌آید:

$$j^*(t_0) = \frac{1}{2}E[x^T(t_0)S(t_0)x(t_0)] + \frac{1}{2}trace\int_{t_0}^{T} SGQ'G^T dt \qquad (37)$$

در نتیجه، سیگنال کنترل بهینهٔ $u^*(t)$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T S(t)x(t) \qquad (38)$$

برای T های به اندازه کافی بزرگ جهت کاهش حجم محاسبات و سادگی اعمال کنترلگر می توان از بردار ثابت حالت دائم K به شکل زیر استفاده کرد:

$$K_\infty = R^{-1}B^T S_\infty \qquad (39)$$

که در آن S_∞ حل محدود و مثبت معین معادلهٔ ریکاتی است. $(\dot{S} = 0)$

- **حالت ها نامعلوم**

در این حالت فرض می شود که تمامی حالت‌های $x(t)$ دقیقاً قابل اندازه‌گیری نباشد. به جای آن، بردار اندازه‌گیری $z(t)$ با معادلهٔ زیر موجود باشد:

$$z(t) = Hx + v \qquad (40)$$

که در آن $v \approx N(0, R_v)$ نویز اندازه‌گیری گوسی می باشد. در این حالت سیگنال کنترل $u(t)$ تنها به تخمین $\hat{x}(t)$ که از روی اندازه‌گیری ها حاصل شده، وابسته می باشد. با بهینه سازی تابع هزینه $j(t_0) = E\{J[x(t_0), t_0]\}$ و با استفاده از روش جاروب[4] رو به عقب دو دسته معادله ماتریسی ریکاتی برای فرایند تخمین و کنترل عاید می شود. معادلات تخمین به صورت زیر می‌باشد: [11]

$$\dot{P} = AP + PA^T + GQ'G^T - PH^T(R_v)^{-1}HP \quad t \ge t_0$$
$$P(t_0) = P_0 \qquad (41)$$

$$L = PH^T(R_v)^{-1} \qquad (42)$$

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(z - H\hat{x}) \qquad (43)$$

که در آن P ماتریس کواریانس خطا و $L(t)$ بهرهٔ فیلتر کالمن و $\hat{x}(t)$ تخمین حالت است. در این شرایط، بهرهٔ کنترل بهینه $K(t)$ به جای اعمال به $x(t)$ به سیگنال تخمین $\hat{x}(t)$ وارد می‌شود.

قانون کنترل فیدبک خطی به صورت زیر خواهد بود:

$$u(t) = -K(t)\hat{x}(t) \qquad (44)$$

که معادلات مربوط به $K(t)$ همان معادلات (35),(36) خواهد بود.

[4] Sweep method

با استفاده از معادلات فوق و جایگذاری آن در تابع هزینه، تابع هزینه بازای کنترل بهینه و تخمین بهینه به شکل زیر قابل حصول است.

$$j^*(t_0) = \frac{1}{2}E[x^T(t_0)S(t_0)x(t_0)] + \frac{1}{2}trace\int_{t_0}^{T}(SGQ'G^T)dt + \frac{1}{2}trace\int_{t_0}^{T}(K^T R_v KP)dt \qquad (45)$$

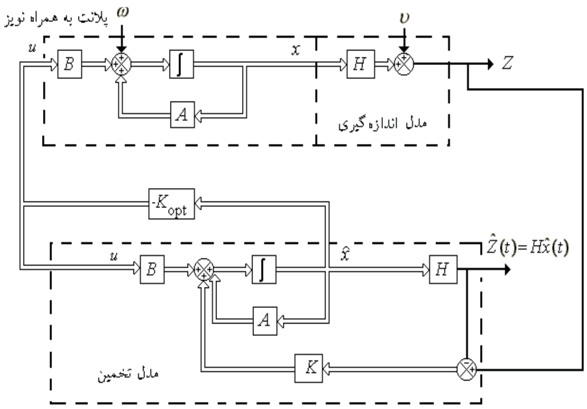
لازم به ذکر است که جملهٔ اول از تنظیم کنندهٔ LQ قطعی حاصل شده است. جملهٔ دوم بیانگر افزایش هزینه به علت عدم قطعیت اغتشاش در سیگنال $x(t)$ به واسطهٔ نویز فرایند است. جمله آخر بیانگر افزایش هزینه به علت عدم قطعیت در اندازه‌گیری است.

طراحی تنظیم کننده LQG به صورتی که سیگنال ورودی مرجع $r(t)$ نیز برای آن در نظر گرفته شده است. معادلات اصلی تنظیم کننده به صورت زیر است:

$$\dot{\hat{x}} = (A - LH)\hat{x} + Bu + Lz \qquad (46)$$

$$u = -K_{opt}\hat{x} + r \qquad (47)$$

دیاگرام بلوکی سیستم حلقه بسته با فیدبک بهینه تصادفی و فیلتر کالمن در شکل(۶) آمده است.



شکل (۶) دیاگرام بلوکی سیستم خطی حلقه بسته با کنترل بهینه و تخمین به کمک فیلتر کالمن

۸. طراحی کنترلگر بهینهٔ تصادفی نیروگاه بادی

با حل معادلات ریکاتی ذکر شده بهرهٔ فیدبک بهینه تصادفی K_{opt} محاسبه می شود که عبارت است از:

$$K_{opt} = \begin{bmatrix} -0.0021 & 0.036 & -0.033 & 0.016 & -0.108 & 0.0003 & -0.001 & -1.99\times10^{-5} & 0.00037 & -0.031 & -0.00059 & 9.998 & -0.177 \\ -0.248 & 1.146 & 1.185 & 0.084 & 0.0068 & 0.036 & -0.396 & 1.6562 & -22.181 & -0.0182 & 0.1163 & -0.1706 & -9.98 \end{bmatrix}$$

با این بهرهٔ فیدبک حالت بهینه تصادفی، قطب های حلقه بسته محاسبه شده اند. در جدول (۲) محل قطب ها را نشان می دهد. با جایگذاری K_{opt} به

جای بهرهٔ فیدبک K_s (به دست آمدهٔ از روی جایابی قطب) می توان پاسخها را مشاهده و مقایسه کرد.

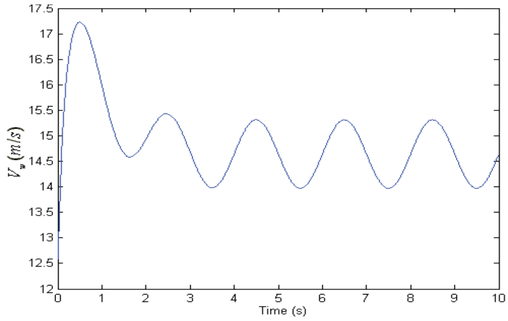
۹. شبیه سازی

ابتدا با اعمال K_s به دست آمده طبق روابط ذکر شده با استفاده از جایابی قطب و اعمال فیدبک حالت به سیستم افزوده، رفتار سیستم حلقه بسته ابتدا در سه حالت، سیستم غیرخطی بدون نویز، سیستم غیرخطی با نویز(نویز فرایند و اندازه‌گیری) و نیز سیستم غیرخطی با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته بررسی می شود. بدین منظور پاسخ سیستم در برابر اعمال تندباد در نظر گرفته شده است. سرعت اولیه (نقطه کار) باد در این مسأله ۱۲/۵ متر بر ثانیه است، که نزدیک به سرعت نامی (۱۲ متر بر ثانیه) توربین بادی است. بالاترین سرعت تندباد ۱۶/۲ متر بر ثانیه است. زمان تندباد در حدود ۱/۷ ثانیه است. پس از تندباد سرعت باد به یک نقطهٔ دیگر که بالاتر از مقدار اولیه است می رود، در حالی که یک سری نوسانات سینوسی با دورهٔ تناوب ۲ ثانیه و دامنهٔ تغییرات ۱/۴ متر بر ثانیه به عنوان اثر برش باد توسط پره های توربین روی آن قرار دارد. شکل موج تندباد، خروجی سیستم و ورودی‌های سیستم حلقه بسته در شکل های (۷) تا (۱۳) با اندازه واقعی و به صورت زوم شده نشان داده شده است.

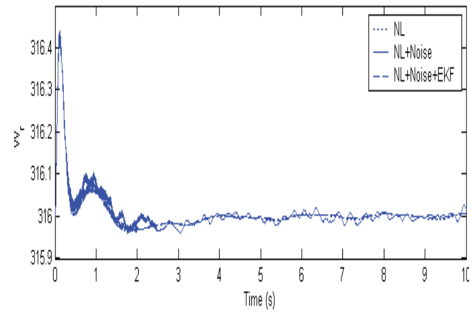
برای بیان عملکرد فیلتر کالمن تعمیم یافته در مواجه با سیستم غیرخطی آلوده به نویز، در شکل‌های زیر مقایسه‌ای بین سیستم حلقهٔ بسته غیرخطی با فیدبک حالت بدون در نظر گرفتن نویز و با فرض در دسترس بودن تمامی حالتها در برابر اعمال تندباد و سیستم آلوده به نویز و سیستم تخمین کالمن تعمیم یافته صورت گرفته است. همان طور که شکل ها نشان می دهند، پاسخ سیستم حلقه بسته دارای میرایی و پایداری مطلوب بوده و نوسانات سرعت و ولتاژ و توان توربین در حداقل مقدار می باشند. پاسخ سیستم حلقه بسته با فیلتر کالمن تعمیم یافته علاوه بر اینکه دارای میرایی و پایداری مطلوب بوده و نوسانات سرعت و ولتاژ و توان توربین در حداقل مقدار قرار می دهد، همخوانی نزدیکی با پاسخ سیستم غیرخطی بدون نویز دارد. همان طور که شکل موج‌ها نشان می دهند، با استفاده از فیلتر کالمن تعمیم یافته در سیستم غیرخطی می توان نوسانات ناشی از نویز را جبران نمود.

جدول (۲) قطب های سیستم حلقه باز، سیستم حلقه بسته با فیدبک حالت و فیدبک بهینه تصادفی

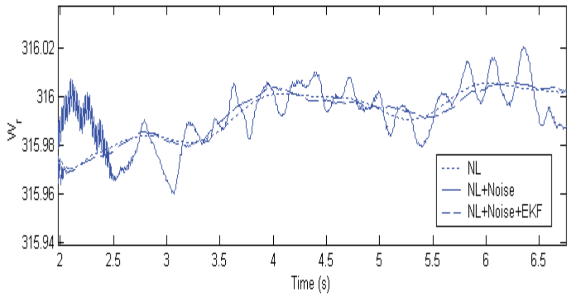
مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته با فیدبک بهینه تصادفی	مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته با فیدبک حالت	مقادیر ویژه سیستم حلقه باز
$-18.106+j2356$	$-23.4+j2888.4$	$-23.4+j2888.4$
$-18.106-j2356$	$-23.4-j2888.4$	$-23.4-j2888.4$
$-17.48+j1728$	$-27.28+j2134.4$	$-27.28+j2134.4$
$-17.48-j1728$	$-27.28-j2134.4$	$-27.28-j2134.4$
$-26.24+j313.58$	$-22.04+j375.08$	$-22.04+j375.08$
$-26.24-j313.58$	$-22.04-j375.08$	$-22.04-j375.08$
$-3.69+j19.75$	$-30+j377$	$-0.34+j377$
$-3.69-j19.75$	$-30-j377$	$-0.34-j377$
-2456	$-37.14+j9.59$	$-37.14+j9.59$
-61.46	$-37.14-j9.59$	$-37.14-j9.59$
-7.22	-40	-0.42
-0.586	-5.5	0
-0.442	$-.8$	0



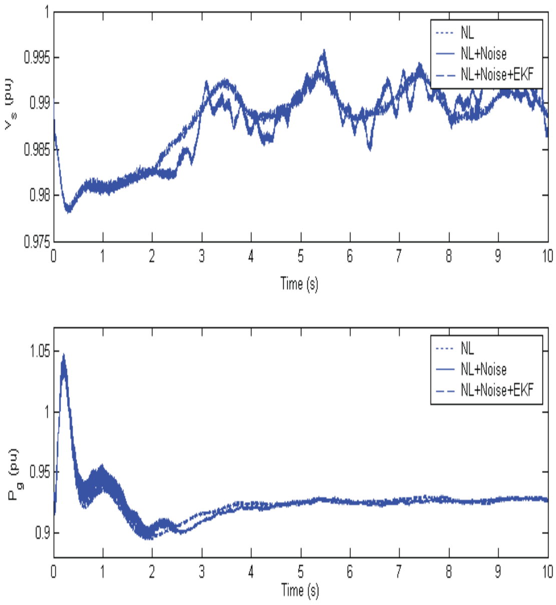
شکل (۷) نمودار تغییرات سرعت باد بر حسب زمان



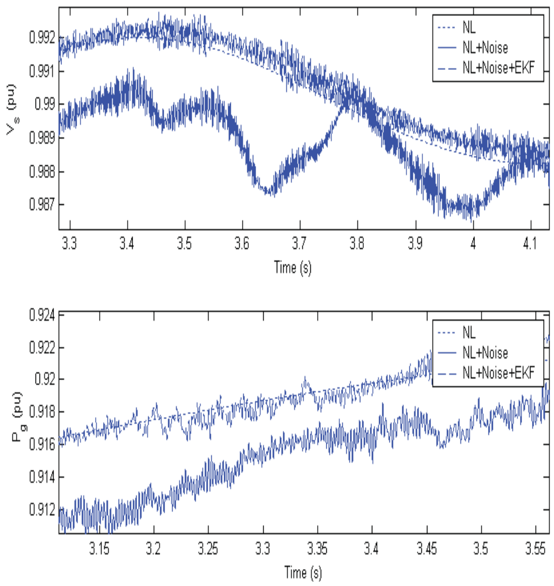
شکل (۸) نمودار تغییرات سرعت ژنراتور بادی بر حسب زمان



شکل (۹) نمودار تغییرات سرعت ژنراتور بادی بر حسب زمان (زوم شده)

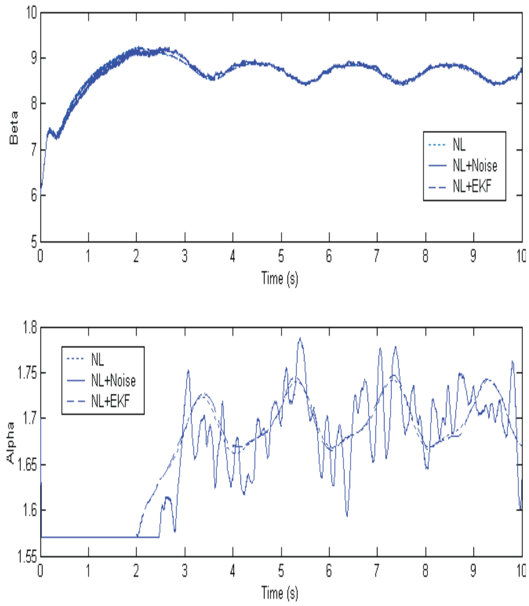


شکل (۱۰) نمودار تغییرات ولتاژ استاتور و توان ژنراتور بر حسب زمان

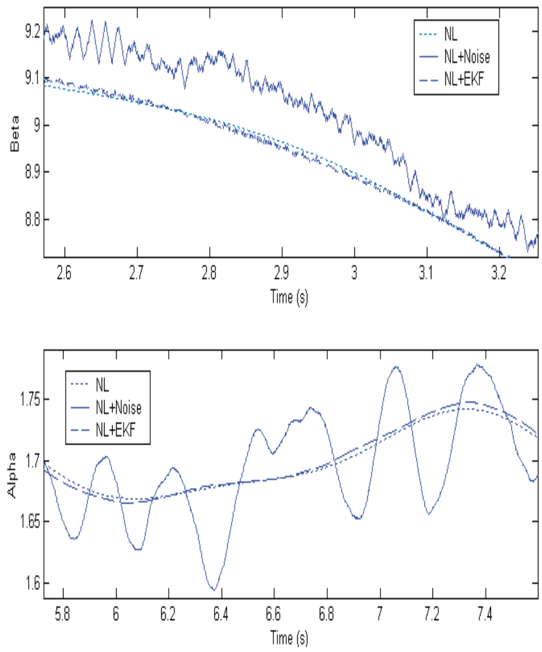


شکل (۱۱) نمودار تغییرات ولتاژ و توان ژنراتور بر حسب زمان

(زوم شده)



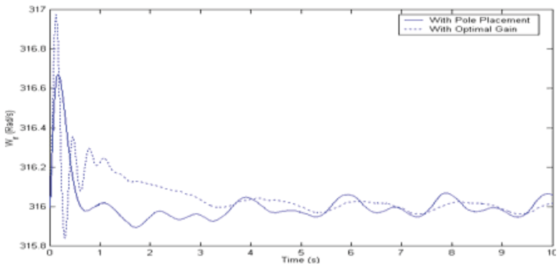
شکل (۱۲) نمودار تغییرات زاویهٔ آتش و زاویهٔ فراز پره‌های سیستم غیر خطی بر حسب زمان



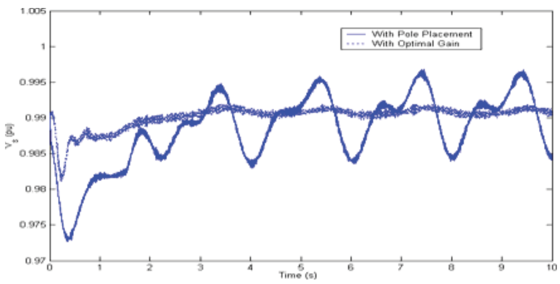
شکل (۱۳) نمودار تغییرات زاویهٔ آتش و زاویهٔ فراز پره های سیستم غیر خطی بر حسب زمان (زوم شده)

برای بیان عملکرد فیلتر کالمن و کنترل بهینه تصادفی در مواجه با سیستم آلوده به نویز، در شکل‌های زیر مقایسه‌ای بین سیستم غیرخطی آلوده به نویز با تخمین کالمن تعمیم یافته همراه بـا کنتـرل فیـدبک حالـت بـا جایـابی قطـب (مرجع [8]) و همان سیستم با کنترل فیـدبک حالـت بهینـه تصـادفی صـورت گرفته است. شکل موج خروجی‌های سیستم و ورودی‌های سیستم حلقه بسـته در شکل های (۱۴) تا (۱۹) نشان داده شـده اسـت. پاسـخ سیسـتم غیـر خطی حلقه بسته با کنترل بهینه تصادفی در مقایسه با فیلتر کالمن تعمیم یافته و کنترل فیدبک با جایابی قطب دارای میرایی و پایداری مطلوب می باشـد. بـه طـوری که برای توان نوسانات حالت دائم حدود ۲۵٪ و بـرای ولتـاژ اسـتاتور کـاهش ۶۰٪ در نوسانات در پیک اول و کاهش ۸۵٪ در نوسانات حالت دائم خـواهیم داشت. همچنین برای سرعت زاویه ای رتور نوسانات حالت دائم حـدود ۵۰٪ کاهش یافته اسـت. بـرای جریـان اسـتاتور نوسـانات حالـت دائـم حـدود ۴۰٪ کاهش یافته است.

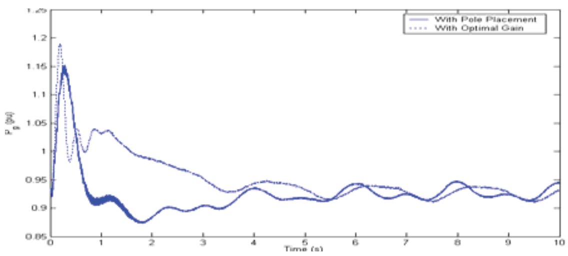
در مورد ورودی‌ها تفاوت‌ها بسیار زیاد است. به علت قرار دادن مـاتریس وزنی R برای سیگنال $u(t)$ نوسانات ورودی بسیار کاهش یافتـه اسـت. بـه طوری که برای زاویهٔ آتش، کاهش ۸۸٪ در نوسانات در پیک اول و کـاهش ۹۷٪ در نوسانات حالت دائم خواهیم داشت. همچنین برای زاویهٔ فراز تـوربین علاوه بر اینکه پاسخ گذرا در ۱ ثانیه اول بسیار بهتر شده است. در حالت دائم نیز نوسانات حول نقطهٔ کار جدید ۸۰٪ کاهش یافته است.



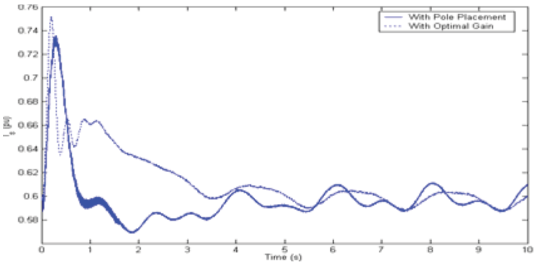
شکل (۱۴) نمودار تغییرات سرعت ژنراتور بادی بر حسب زمان



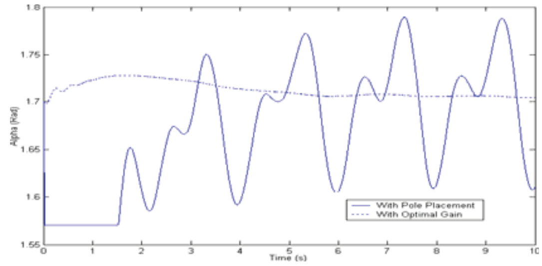
شکل (۱۵) نمودار تغییرات ولتاژ استاتور بر حسب زمان



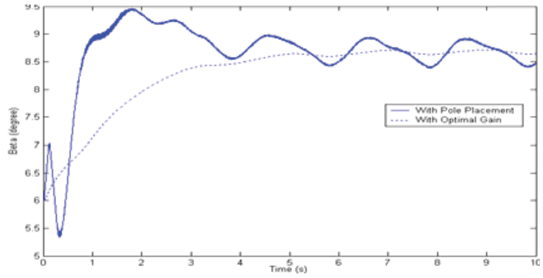
شکل (۱۶) نمودار تغییرات توان ژنراتور بر حسب زمان



شکل (۱۷) نمودار تغییرات جریان استاتور ژنراتور بر حسب زمان



شکل (۱۸) نمودار تغییرات زاویهٔ آتش سیستم غیر خطی بر حسب زمان



شکل (۱۹) نمودار تغییرات زاویهٔ فراز پره های سیستم غیر خطی بر حسب زمان

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلسازی غیرخطی نسبتا دقیقی از یک سیستم پیچیده و مرکب توربین- ژنراتور نیروگاه بادی دیزباد شامل توربین بادی، ژنراتور القایی، شافت انتقالی، خازن استاتیکی توان راکتیو و خط انتقال انجام شد که در مجموع معادلات فضای حالت غیرخطی با ۱۳ متغیر حالت را تشکیل می دهد.

سپس بر اساس مدلسازی انجام شده، طراحی کنترلگر فیدبک بهینهٔ تصادفی برای تنظیم ولتاژ در ترمینال های ماشین القایی با استفاده از یک جبران کنندهٔ توان راکتیو استاتیک و نیز تنظیم توان الکتریکی با استفاده از کنترل زاویهٔ فراز در رنج وسیعی از نقاط کار انجام شد. با توجه به در دسترس نبودن حالتها و وجود نویز فرایند، برای کنترل خروجی ماشین، یک تخمین بهینهٔ تصادفی و یک کنترلر بهینهٔ تصادفی با توجه به تابع هزینه برای سیستم توربوژنراتور بادی طراحی گردید و عملکرد آن با فیلتر کالمن تعمیم یافته، همراه با کنترلر فیدبک حالت با جایابی قطب مقایسه شد.

پاسخ سیستم حلقه بسته با کنترل بهینه تصادفی در مقایسه با تخمین کالمن، با جایابی قطب میرایی قطب مطلوبی در برابر نوسانات باد دارد که مبین کارائی بالای کنترلگر بهینهٔ تصادفی است و نیز موید این نکته است که چون سیستم مورد مطالعه دارای مولفه های تصادفی است انتخاب کنترلگر بر مبنای تئوری کنترل بهینه تصادفی موجه است.

مراجع

[۱] بطحایی سید محمد تقی ؛ پرخو مسعود « کنترل ولتاژ فرکانس یک نیروگاه کوچک ترکیبی باد-دیزل مستقل از شبکه به روش ساختار متغیر». ششمین کنفرانس مهندسی برق ۲۲-۲۴ اردیبهشت ۱۳۷۷ ، صفحهٔ ۲۳۷-۲۴۲

[2] J. R. Winkelman and S. H. Javid, "Control design and performance analysis of a 6MW wind turbine generator," *IEEE Trans on PAS,* Vol. 102, No. 5, pp. 1340-1347, May 1983.

[3] R. Chedid and F. Morad and M. Basm , "Intelligent Control of a Class of Wind Energy Conversion Systems," *IEEE Trans on energy conversion, Vol. 14, No. 4, Dec 1999.*

[4] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Dynamic response of a stand-alone Wind Energy Conversion Systems with battery energy storage to a wind gust," *IEEE Trans on Energy Conversion,* Vol. 12, No. 1, pp. 73-78, Mar 1997.

[5] H.D. Battista, R. J. Mantz, "Sliding mode control of torque ripple in wind energy conversion systems with slip power recovery," *IEEE* 1998.

[6] Y. H. Song, A. T. Johns, "Nonlinear thyristor-controlled static VAR compensation," The European Power Electronics Association, Brighton, Sept. 13-16, 1993.

[۷] خالوزاده حمید، اکبری ثانی مسعود، « طراحی کنترلگر فیدبک خروجی برای سیستم دینامیکی غیرخطی توربین بادی دیزباد». هیجدهمین کنفرانس بین المللی برق ایران، تهران، مهر ۱۳۸۲.

[۸] اکبری ثانی مسعود،خالوزاده حمید، « طراحی کنترلگر فیدبک حالت سیستم دینامیکی غیرخطی توربین بادی دیزباد »، دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران (ICEE 2004)، مشهد، اردیبهشت ۱۳۸۳.

[9] M. S. Grewal, A. P. Andrews, "Kalman filtering: theory and practice", *John Wiley, Press 2001.*

[۱۰] خالوزاده حمید، اکبری ثانی مسعود، طراحی کنترلگر فیدبک بهینهٔ تصادفی برای سیستم دینامیکی غیرخطی توربین بادی دیزباد، نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق ایران، تهران، مهر ۱۳۸۳.

[11] A.E. Bryson, Y.C. Ho, *Applied Optimal Control*, Hemisphere, 1975.

ضمیمه:

لیست متغیرهای به کار رفته:

$\varphi_{ds},\varphi_{qs}$ شار نشتی استاتور در راستای محورهای d,q برحسب pu

$\varphi_{dr},\varphi_{qr}$ شار نشتی رتور در راستای محور های d,q برحسب pu

i_{ds},i_{qs} جریان استاتور در راستای محور های d,q برحسب pu

i_{dr},i_{qr} جریان رتور در راستای محور های d,q برحسب pu

i_{dc},i_{qc} جریان خازن در راستای محور های d,q برحسب pu

i_{dL},i_{qL} جریان تریستور در راستای محور های d,q برحسب pu

i_{dTL},i_{qTL} جریان خط انتقال در راستای محور های d,q برحسب pu

I_s,V_s ولتاژ و جریان استاتور برحسب pu

P_{ref} توان نامی ژنراتور القایی برحسب pu

P_g توان ژنراتور القایی برحسب pu

R_s,R_r مقاومت رتور واستاتور برحسب pu

R_{TL},X_{TL} مقاومت و راکتانس خط انتقال برحسب pu

$X_L.X_C$ اندوکتانس و راکتانس SVC برحسب pu

V_{ds},V_{qs} ولتاژ استاتور در راستای محور های d,q برحسب pu

V_{db},V_{qb} ولتاژ باس بی‌نهایت در راستای محورهای d,q برحسب pu

V_{ref} ولتاژ نامی استاتور برحسب pu

ω_b سرعت نامی (314rad/s)

ω_r سرعت رتور ژنراتور بادی (rad/s)

مقادیر پایه برای تبدیل (pu)

توان پایه : $660KVA$ برای تمام سیستم

ولتاژ پایه : $690V$ برای تمام سیستم

جبران کنندهٔ توان راکتیو (SVC):

$X_C = 3.8pu$ و $X_L = 4.0pu$

خطوط انتقال:

مقاومت: $R_{TL} = 0.015pu$ ، راکتانس: $X_{TL} = 0.15pu$

مشخصات فنی توربین بادی دیزباد

نوع توربین	سه پره ای ، محور افقی
قطر رتور	۴۳ متر
تنظیم توان	تنظیم با پدیدهٔ قطع (Stall)
سرعت قطع پایین باد	۴-۳ متر بر ثانیه
سرعت نامی باد	۱۲ متر بر ثانیه
سرعت قطع بالای باد	۲۵ متر بر ثانیه
توان نامی ژنراتور	۶۶۰ کیلووات
سرعت سنکرون ژنراتور	۱۵۰۰ دور بر دقیقه
ثابت زمانی	۱۹/۷۵
ضریب گیربکس	1:56

مشخصات فنی ژنراتور بادی

ولتاژ نامی(ولت)	۶۹۰	ارتفاع دماغه (متر)	۶۰
فرکانس نامی (هرتز)	۵۰	ضریب توان نامی	۰/۹۱
راکتانس مغناطیس کننده (pu)	۲/۸۸	سرعت سنکرون (RPM)	۱۵۰۰
مقاومت استاتور (pu)	۰/۰۰۶۳	مقاومت رتور (pu)	۰/۰۰۵۹
راکتانس استاتور (pu)	۰/۰۴۸۹	راکتانس رتور (pu)	۰/۰۰۵۸

$$A=\begin{bmatrix}
-\frac{\omega_b R_{ss} X_{ss}}{D} & \omega_b & \frac{\omega_b R_{ss} X_M}{D} & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
-\omega_b & -\frac{\omega_b R_{ss} X'_{rr}}{D} & 0 & \frac{\omega_b R_{ss} X_M}{D} & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0\\
\frac{\omega_b R'_{rr} X_M}{D} & 0 & -\frac{\omega_b R_{ss} X_{ss}}{D} & (\omega_b-\omega_{m0}) & -\phi_{qr0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & \frac{\omega_b R'_{rr} X_M}{D} & -(\omega_b-\omega_{m0}) & -\frac{\omega_b R'_{rr} X_{ss}}{D} & \phi_{dr0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
-\frac{\omega_b X_M \phi_{qr0}}{2H_A D} & \frac{\omega_b X_M \phi_{dr0}}{2H_A D} & \frac{\omega_b X_M \phi_{qs0}}{2H_A D} & -\frac{\omega_b X_M \phi_{ds0}}{2H_A D} & \frac{\omega_b}{2H_A}\cdot\frac{\partial T_m}{\partial \omega_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
-\frac{\omega_b X_c X'_{rr}}{D} & 0 & \frac{\omega_b X_c X_M}{D} & 0 & 0 & 0 & \omega_b & -\omega_b X_c & 0 & -\omega_b X_c & 0\\
0 & -\frac{\omega_b X_c X_M}{D} & 0 & \frac{\omega_b X_c X_M}{D} & 0 & -\omega_b & 0 & 0 & -\omega_b X_c & 0 & -\omega_b X_c\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b}{X_{TCR0}} & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b}{X_{TCR0}} & -\omega_b & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b}{X_{TL}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\omega_b R_{TL}}{X_{TL}} & \omega_b\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b}{X_{TL}} & 0 & 0 & -\omega_b & -\frac{\omega_b R_{TL}}{X_{TL}}
\end{bmatrix}$$

$$B=\begin{bmatrix}
0 & 0\\
0 & 0\\
0 & 0\\
0 & 0\\
\frac{\omega_b}{2H}\cdot\frac{\partial T_m}{\partial \beta} & 0\\
0 & 0\\
0 & 0\\
0 & \frac{\partial f}{\partial \alpha}\\
0 & \frac{\partial g}{\partial \alpha}\\
0 & 0\\
0 & 0
\end{bmatrix}$$