

# طراحی کنترلگر فیدبک حالت برای سیستم غیرخطی توربین بادی دیزباد با استفاده از فیلتر کالمن تعمیم یافته

مسعود اکبری ثانی

کارشناسی ارشد کنترل دانشگاه فردوسی مشهد

makbarisani@yahoo.com

حمید خالوزاده

استادیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

h\_khaloozadeh@um.ac.ir

## ۱. مقدمه

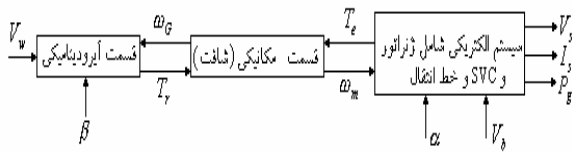
به علت ماهیت تغییرپذیری سرعت باد با زمان، کنترل سیستم غیرخطی توربین بادی مسأله ای مشکل جلوه می نماید. زیرا، علاوه بر تغییرات دائم سرعت باد، مسأله برش باد توسط پره ها نیز، ورودی کاملاً غیر یکنواخت به سیستم اعمال می کند. روش های گوناگونی برای حل این مشکل تاکنون پیشنهاد شده است. در [1] استفاده از یک سیستم 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 زاویه فراز، سرعت توربین در نزدیکی سرعت ثابت ژنراتور نگه داشته شده است. در [3] یک کنترلگر فازی برای کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون و زاویه آتش ترستور طراحی شده است. به علت قابلیت اطمینان بالاتر و هزینه 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 القائی 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 القائی به جای استفاده از ژنراتور سنکرون در سیستم تبدیل انرژی بادی، بیان شده است.

**چکیده:** در این مقاله، طراحی کنترلگر فیدبک حالت برای سیستم غیرخطی تبدیل انرژی بادی نیروگاه دیزباد صورت می گیرد. این سیستم شامل یک ژنراتور القائی است که از طریق گیربکس دور ثابت به رتور توربین بادی متصل شده است. برای تنظیم ولتاژ در ترمینال های ماشین القائی از یک جبران کننده توان رکتیو استاتیک، استفاده شده است. ماشین القائی از طریق یک خط انتقال دو سیمه به شبکه متصل شده است. توان ورودی به ماشین از طریق تغییر زاویه فراز پره ها و ولتاژ ترمینال ماشین از طریق تغییر زاویه آتش ترستور (SVC) کنترل می شود. با توجه به در دسترس نبودن حالتها و وجود نویز فرایند و اندازه گیری، برای کنترل خروجی ماشین، با استفاده از فیلتر کالمن تعمیم یافته<sup>۱</sup>، کنترلگر فیدبک حالت طراحی شده و عملکرد آن با پاسخ کنترلگر فیدبک حالت بدون نویز و همراه با نویز مقایسه می شود. پاسخ سیستم حلقه بسته با تخمین کالمن با این کنترلگر علاوه بر میرایی مطلوبی در برابر نوسانات باد، هم خوانی مناسبی با سیستم بدون نویز دارد. که مبین کارایی بالای فیلتر کالمن توسعه یافته است.

**واژه های کلیدی:** کنترلگر فیدبک حالت و خروجی، توربو ژنراتور بادی، جبران کننده توان رکتیو، فیلتر کالمن تعمیم یافته

<sup>۱</sup>Extended Kalman Filter (EKF)

سیستم سرعت باد  $V_w$  می باشد. همچنین ولتاژ شبکه باس بی نهایت  $V_b$  معلوم و ثابت فرض می شود. بلوک دیاگرام سیستم در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل (۲) بلوک دیاگرام کلی سیستم

### ۳. مدل خطی شده سیگنال کوچک

با توجه به زیر سیستم های موجود در یک سیستم تبدیل انرژی بادی (رتور توربین بادی، ژنراتور القایی، خط انتقال دو سیمه، گیربکس نسبت ثابت و جبران کننده 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:

$$\dot{X} = AX + Bu + \delta I \quad (1)$$

که در آن  $X, u, d$  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 نقطه کار و در دستگاه مرجع سنکرون در محورهای  $d, q$  هستند. ماتریس های  $A, B, \delta$  نیز در ضمیمه آمده است. بردار نقطه کار پایدار  $X_0$  شامل ۱۱ متغیر حالت و دو ورودی و یک اغتشاش به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$X_0 = [\varphi_{ds0}, \varphi_{qs0}, \varphi_{dr0}, \varphi_{qr0}, \omega_{r0}, V_{ds0}, V_{qs0}, i_{d0}, i_{q0}, i_{dTL0}, i_{qTL0}, \beta_0, \alpha_0, V_{w0}]^T$$

بردار عددی  $X_0$  به صورت زیر است.

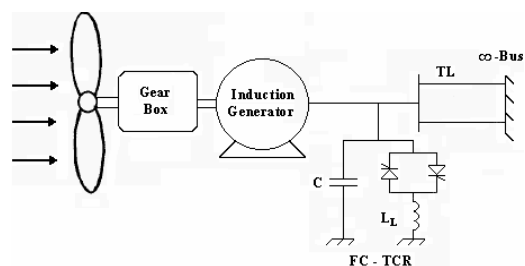
$$X_0 = [0.80, 0.10, 0.74, 0.233, 323.58, -0.09, 0.80, 0.17, 0.02, -0.35, 0.61, 6.1, 6.6, 12.5]^T$$

جزئیات مربوط به چگونگی انتخاب بردار  $X_0$  در [7] آمده است.

در این مقاله، برای کنترل و ردیابی توان و ولتاژ ماشین، یک کنترلگر فیدبک حالت به همراه انتگرالگیر بر پایه مدل خطی شده، طراحی می شود. سپس 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 حالت های نویزدار طراحی شده و پس از اعمال، پاسخ آن با سیستم بدون نویز و نویزدار بدون تخمین مقایسه می شود. پاسخ ها همگی قابلیت فیلتر کالمن تعمیم یافته را در حذف نویز نشان می دهد. پاسخ های سیستم، به پاسخ های مشاهده شده از سیستم غیرخطی بدون نویز با فیدبک حالت نزدیکی زیادی دارند.

### ۲. ساختار سیستم ژنراتور بادی

شکل (۱) ساختار سیستم تبدیل انرژی بادی را نشان می دهد. 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 کننده توان راکتیو استاتیک (SVC) استفاده شده است. این جبران کننده شامل یک خازن ثابت و یک سلف متغیر است که به کمک تغییر زاویه آتش تریستور اندوکتانس آن تغییر می کند.



شکل (۱) ساختار سیستم تبدیل انرژی بادی

ورودی های سیستم فوق شامل زاویه آتش تریستور SVC و زاویه انحراف پره توربین می باشد. متغیرهای قابل اندازه گیری سرعت ژنراتور  $\omega_m$  و ولتاژ و توان و جریان آن  $(P_g, V_s, I_s)$  می باشد. ورودی اغتشاش

#### ۴. طراحی کنترلر فیدبک حالت

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

$$\dot{z} = \Phi z + \Gamma u + E d \quad (2)$$

که در آن پارامترها به صورت زیر تعریف می شود.

$$z_{13 \times 1} = \begin{bmatrix} X_{11 \times 1} \\ \gamma_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \quad \gamma = \left[ \int (\Delta P_{ref} - \Delta P_g) dt, \int (\Delta V_{ref} - \Delta V_s) dt \right]$$

$$\Phi_{13 \times 13} = \begin{bmatrix} A_{11 \times 11} & 0 \\ -D_{2 \times 11} & 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma_{13 \times 1} = \begin{bmatrix} B_{11 \times 2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_{13 \times 1} = \begin{bmatrix} \delta_{11 \times 1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

قطب های سیستم حلقه باز خطی شده در جدول (۱) نشان داده شده است:

جدول (۱) قطب های سیستم حلقه باز

$-23.4 \pm j2888.4, -27.28 \pm j2134.4, -22.04 \pm j375.08$
$-0.34 \pm j377, -37.14 \pm j9.59, -0.42, 0$

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

$$u = -K_s z \quad (3)$$

با انتخاب قطب های حلقه بسته در مکان های مشخص شده در

جدول (۲) ماتریس  $K_s$  به صورت زیر حاصل می شود:

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

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

جدول (۲) قطب های سیستم حلقه بسته

$-23.4 \pm j2888.4, -27.28 \pm j2134.4, -22.04 \pm j375.08$
$-30 \pm j377, -37.14 \pm j9.59, -40, -5.5, -0.8$

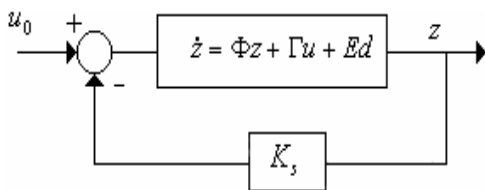
بردار خروجی  $y$  را می توان به صورت زیر نوشت.

$$y_{6 \times 1} = C_{6 \times 13} z_{13 \times 1} \quad (4)$$

که در آن بردار  $y$  به صورت رابطه (۵) تعریف می شود.

$$y = [\Delta P_g, \Delta V_s, \Delta I_s, \Delta \omega_r \int (\Delta P_{ref} - \Delta P_g) dt, \int (\Delta V_{ref} - \Delta V_s) dt]^T \quad (5)$$

شکل زیر بلوک دیاگرام کنترلر فیدبک حالت را نشان می دهد.



شکل (۳) کنترلر فیدبک حالت

#### ۵. طراحی فیلتر کالمن تعمیم یافته

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.

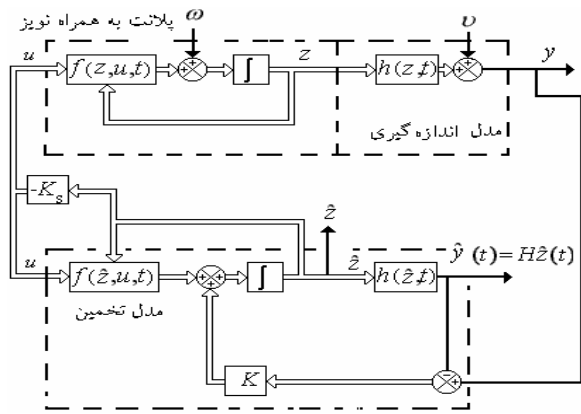
مسئله تخمین برای سیستم های غیرخطی در حالت کلی یک کار دشوار است. برای دستیابی به یک الگوریتم محاسبه ای برای سیستم های غیرخطی، برخی تقریب ها اعمال شده است که در نهایت به فیلتر کالمن تعمیم یافته منجر می شود. مدل سیستم و مدل اندازه گیری به صورت زیر است:

$$\dot{z} = f(z, u, t) + G(t)w$$

$$y = h(z, t) + v \quad (6)$$

$$z(0) \approx N(\bar{z}_0, p_0), w \approx N(0, Q), v \approx N(0, R)$$

که در آن  $z$  متغیر تصادفی با متوسط و واریانس در لحظه صفر برابر  $(\bar{z}_0, p_0)$  و  $f(x, u, t)$  تابع غیر خطی سیستم و  $u$



شکل (۴) بلوک دیاگرام سیستم غیر خطی حلقه بسته آورده به نویز و تخمین به کمک فیلتر کالمن تعمیم یافته

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

## ۶. شبیه سازی

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 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 می‌شود. 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 نقطه دیگر که بالاتر از مقدار اولیه است می‌رود، در حالی که یک سری نوسانات سینوسی با دوره تناوب ۲ ثانیه و دامنه تغییرات ۱/۴ متر بر ثانیه به عنوان اثر برش باد توسط پره‌های توربین روی آن قرار دارد. شکل موج تندباد، خروجی سیستم و ورودی‌های سیستم حلقه بسته در شکل‌های (۵) تا (۱۱) با اندازه واقعی و به صورت زوم شده نشان داده شده است. برای بیان عملکرد فیلتر کالمن تعمیم یافته در مواجهه

ورودی سیستم و  $w$  نویز فرایند و  $G$  ماتریس وزنی متغیر با زمان نویز و  $y$  خروجی قابل اندازه‌گیری و  $v$  نویز اندازه‌گیری می‌باشد.

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

$$P(0) = p_0, \hat{z}(0) = \bar{z}_0 \quad (7)$$

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

$$\dot{P} = A(\hat{z}, t)P + PA^T(\hat{z}, t) + GQG^T - PH^T(\hat{z}, t)R^{-1}H(\hat{z}, t)P \quad (8)$$

که در آن ژاکوبین‌ها به صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{cases} A(z, t) = \frac{\partial f(z, u, t)}{\partial z} \\ H(z, t) = \frac{\partial h(z, t)}{\partial z} \end{cases} \quad (9)$$

پس از حل معادله ریگاتی و مشخص شدن ماتریس کواریانس خطای  $P(t)$  بهره کالمن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K(t) = P(t)H^T(\hat{z}, t)R^{-1} \quad (10)$$

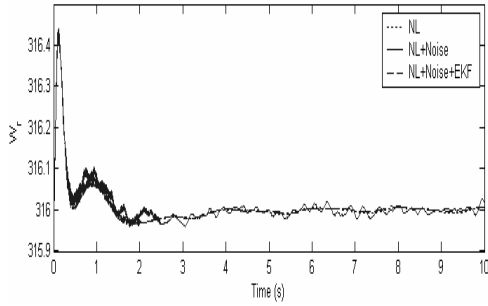
در نهایت، معادله دیفرانسیل تخمین به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} &= f(\hat{z}, u, t) + K(y - h(\hat{z}, t)) \\ \hat{y} &= h(\hat{z}, t) \end{aligned} \quad (11)$$

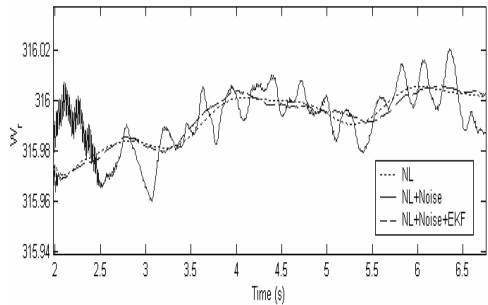
ثابت می‌شود که تخمین فوق، بهترین تخمین برای سیگنال غیر قابل دسترس و نویزدار  $z$  از نظر کمترین کواریانس خطا می‌باشد. برای سیستم خطی نیروگاه بادی همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، ۱۳ متغیر حالت و ۶ خروجی و ۲ ورودی وجود دارد. نویز فرایند به صورت یک بردار  $13 \times 1$  نویز تصادفی گوسی با میانگین صفر و قدرت  $-30db$  مدل می‌کنیم. از آنجایی که همگی حالت‌ها دارای یک نویز مشابه نمی‌باشند، می‌توان ماتریس وزنی  $G$  را صورت یک ماتریس قطری به صورت زیر در نظر گرفت:

$$G = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 5 \ 4 \ 4 \ 3 \ 3 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10]$$

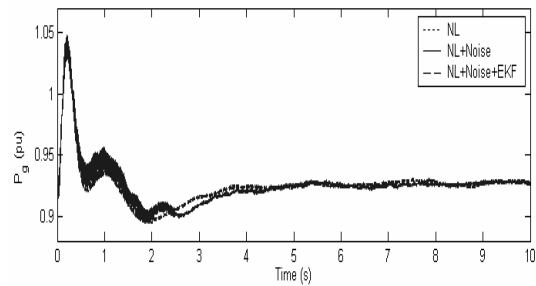
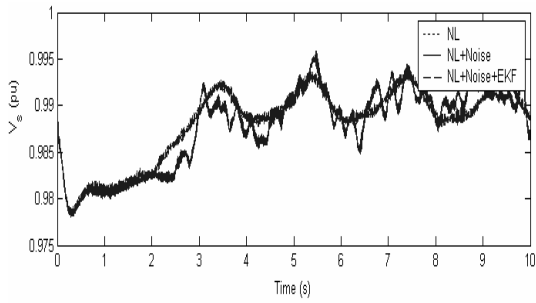
همچنین نویز اندازه‌گیری را به صورت یک بردار نویز  $6 \times 1$  تصادفی گوسی با میانگین صفر و قدرت  $-30 db$  مدل کرده و فرض می‌کنیم که در اندازه‌گیری نویزها مشابه می‌باشند.



شکل (۶) نمودار تغییرات سرعت ژنراتور بادی بر حسب زمان



شکل (۷) نمودار تغییرات سرعت ژنراتور بادی بر حسب زمان (زوم شده)

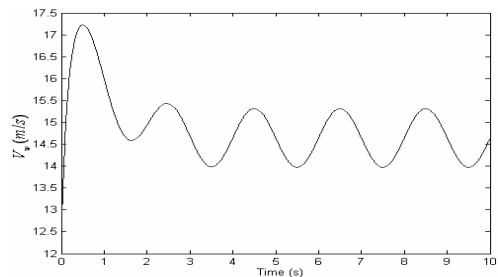


شکل (۸) نمودار تغییرات ولتاژ استاتور و توان ژنراتور بر حسب زمان

با سیستم غیرخطی آلوده به نویز، در شکل‌های زیر مقایسه‌ای بین سیستم حلقه 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 شکل‌ها نشان می‌دهند، پاسخ سیستم حلقه بسته دارای میرایی و پایداری مطلوب بوده و نوسانات سرعت و ولتاژ و توان توربین در حداقل مقدار می‌باشند. 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 می‌دهد، همخوانی نزدیکی با پاسخ سیستم غیرخطی بدون نویز دارد. همان طور که شکل موج‌ها نشان می‌دهند، با استفاده از فیلتر کالمن تعمیم یافته در سیستم غیرخطی می‌توان نوسانات ناشی از نویز را جبران نمود.

## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تنظیم ولتاژ در ترمینال‌های ماشین القایی با استفاده از یک جبران کننده توان راکتیو استاتیک و نیز تنظیم توان الکتریکی با استفاده از کنترل زاویه فراز در رنج وسیعی از نقاط کار انجام شد. برای کنترل خروجی ماشین، کنترلگر فیدبک حالت همراه با انتگرالگیر برای این مسأله طراحی شده است. سپس با توجه به دینامیک واقعی سیستم، نویزهای فرایند و اندازه‌گیری برای سیستم در نظر گرفته شده و فیلتر کالمن تعمیم یافته برای این سیستم در جهت تخمین غیرخطی حالت‌های نویزدار طراحی شده و پس از اعمال، پاسخ آن با سیستم بدون نویز و نویز دار بدون تخمین مقایسه گردید. پاسخ‌ها همگی قابلیت فیلتر کالمن تعمیم یافته را در حذف نویز فرایند و نویز اندازه‌گیری نشان می‌دهد.



شکل (۵) نمودار تغییرات سرعت باد بر حسب زمان

## مراجع

[1] 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، صفحه 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. Mrad 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] Hernan De Battista & Ricardo Julian 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

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

## ضمیمه

### لیست متغیرهای به کار رفته

شار نشستی استاتور در راستای محورهای  $d, q$   $\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$

بر حسب  $PU$

شار نشستی رتور در راستای محورهای  $\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$

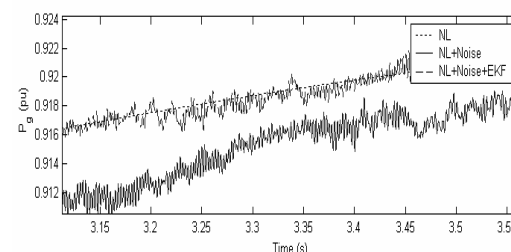
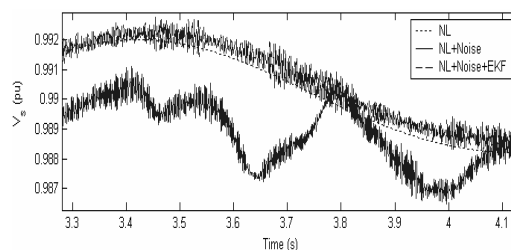
$d, q$  بر حسب  $PU$

جریان استاتور در راستای محورهای  $i_{ds}, i_{qs}$

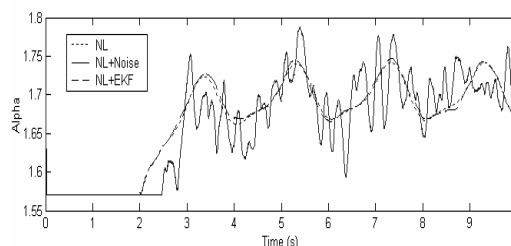
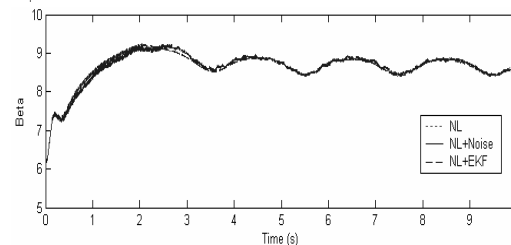
$d, q$  بر حسب  $PU$

جریان رتور در راستای محورهای  $i_{dr}, i_{qr}$

$d, q$  بر حسب  $PU$

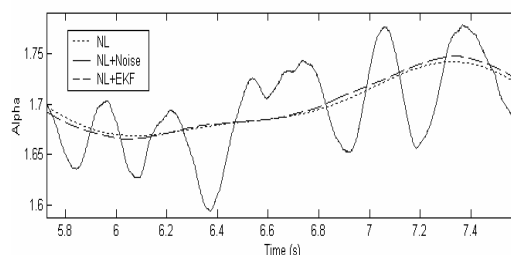
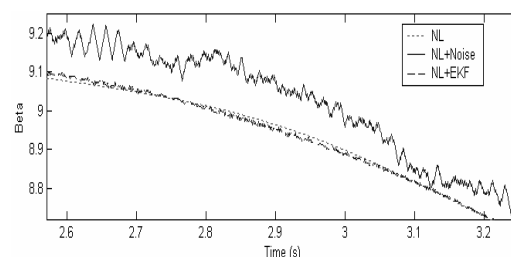


شکل (۹) نمودار تغییرات ولتاژ و توان ژنراتور بر حسب زمان (زوم شده)



شکل (۱۰) نمودار تغییرات زاویه آتش و زاویه فراز پره های سیستم

غیر خطی بر حسب زمان



شکل (۱۱) نمودار تغییرات زاویه آتش و زاویه فراز پره های سیستم

غیر خطی بر حسب زمان (زوم شده)

### خطوط انتقال

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

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

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\omega_b R_{s3} X_{s3}}{D} & \omega_b & \frac{\omega_b R_{s3} X_M}{D} & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_b & \frac{\omega_b R_{s3} X_{r1}}{D} & 0 & \frac{\omega_b R_{s3} X_M}{D} & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\omega_b R_{r1} X_M}{D} & 0 & \frac{\omega_b R_{s3} X_{s3}}{D} & (\omega_b - \omega_{d0}) & -\phi_{d0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_b R_{r1} X_M}{D} & -(\omega_b - \omega_{d0}) & \frac{\omega_b R_{r1} X_{s3}}{D} & \phi_{d0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\omega_b X_M \phi_{q0}}{2H_A D} & \frac{\omega_b X_M \phi_{d0}}{2H_A D} & \frac{\omega_b X_M \phi_{q0}}{2H_A D} & \frac{\omega_b X_M \phi_{d0}}{2H_A D} & \frac{\omega_b}{2H_A} \frac{\partial T_m}{\partial \omega_m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\omega_b X_c X_{r1}}{D} & 0 & \frac{\omega_b X_c X_M}{D} & 0 & 0 & 0 & \omega_b & -\omega_b X_c & 0 & -\omega_b X_c & 0 \\ 0 & \frac{\omega_b X_c X_M}{D} & 0 & \frac{\omega_b X_c X_M}{D} & 0 & -\omega_b & 0 & 0 & -\omega_b X_c & 0 & -\omega_b X_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b}{X_{TCR0}} & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b}{X_{TCR0}} & -\omega_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b}{X_{TL}} & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b R_{TL}}{X_{TL}} & \omega_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\omega_b}{X_{TL}} & 0 & 0 & -\omega_b & \frac{\omega_b R_{TL}}{X_{TL}} \end{bmatrix}$$

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

جریان خازن در راستای محور های  $d, q$  بر حسب  $PU$   $i_{dc}, i_{qc}$

جریان تریستور در راستای محور های  $i_{dL}, i_{qL}$

$d, q$  بر حسب  $PU$

جریان خط انتقال در راستای محور  $i_{dTL}, i_{qTL}$

های  $d, q$  بر حسب  $PU$

ولتاژ و جریان استاتور بر حسب  $PU$   $I_s, V_s$

توان نامی ژنراتور القایی بر حسب  $PU$   $P_{ref}$

توان ژنراتور القایی بر حسب  $PU$   $P_g$

مقاومت رتور و استاتور بر حسب  $PU$   $R_s, R_r$

مقاومت و راکتانس خط انتقال بر حسب  $PU$   $R_{TL}, X_{TL}$

اندوکتانس و راکتانس  $SVC$  بر حسب  $PU$   $X_L, X_C$

ولتاژ استاتور در راستای محور های  $V_{ds}, V_{qs}$

$d, q$  بر حسب  $PU$

ولتاژ باس بی نهایت در راستای  $V_{db}, V_{qb}$

محورهای  $d, q$  بر حسب  $PU$

ولتاژ نامی استاتور بر حسب  $PU$   $V_{ref}$

سرعت نامی (314rad/s)  $\omega_b$

سرعت رتور ژنراتور بادی (rad/s)  $\omega_r$

### مقادیر پایه برای تبدیل (pu)

توان پایه :  $660 KVA$  برای تمام سیستم

ولتاژ پایه :  $690V$  برای تمام سیستم

مشخصات فنی توربین بادی دیزباد

نوع توربین	سه پره ای ، محور افقی
قطر رتور	۴۳ متر
تنظیم توان	تنظیم با پدیده قطع (Stall)
سرعت قطع پایین باد	۳-۴ 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 گبریکس	۱:۵۶

### جبران کننده توان راکتیو (SVC)

$X_C = 3.8 pu$  و  $X_L = 4.0 pu$