نشریه علمی مهندسی و مدیریت انرژی
سال یازدهم، شمارهٔ سوم/ پاییز ۱۴۰۰/ صفحه ۲ـ۱۱

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۱۴

رؤیتگر گشتاور مد لغزشی دینامیکی مقاوم برای توربین بادی

مهنوش شجیعی[۱]، سید کمال حسینی ثانی[۲*]، سعید شمقدری[۳]، محمدباقر نقیبی سیستانی[۴]

[۱] دانشجوی دکترای دانشکده برق، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
ma.shajiee@gmail.com
[۲] دانشیار دانشکده برق، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
k.hosseini@um.ac.ir
[۳] استادیار دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
shamaghdari@iust.ac.ir
[۴] دانشیار دانشکده برق، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
naghibi@um.ac.ir

چکیده: در این پژوهش، روش جدیدی برای طراحی رؤیتگر غیرخطی برای مدل غیرخطی توربین بادی به‌منظور تخمین گشتاور ژنراتور پیشنهاد شده است. با استفاده از طراحی رؤیتگر مد لغزشی دینامیکی که تابه‌حال برای توربین بادی به کار نرفته است، ثابت لیپشیتز افزایش داده شد که معادل افزایش محدودهٔ کاری و افزایش مقاومت رؤیتگر نسبت به عامل غیرخطی است. نوآوری طرح، استفاده از بهرهٔ دینامیک در طراحی رؤیتگر مد لغزشی و تضمین شرط پایداری مجانبی توسط مسئلهٔ کنترل بهینه H_∞ است. درجهٔ آزادی اضافی پیشنهادی با این فرمول دینامیکی، برای مواجهه با عامل غیرخطی به کار می‌رود. با استفاده از رؤیتگر پایدار با بهرهٔ دینامیکی طراحی‌شده، رؤیتگر در مقابل عدم قطعیت غیرخطی مقاوم می‌شود و مقاومت بیشتر نسبت به رؤیتگرهای مرسوم با بهرهٔ ثابت و نیز رؤیتگر لوینبرگر دینامیکی حاصل می‌شود. در نهایت با استفاده از پروفایل باد واقعی روند طراحی بر روی مدل توربین صد کیلووات پژوهشکده هواخورشید پیاده‌سازی شد و همچنین نتایج حاصل با نرم‌افزار شبیه‌ساز توربین بادی (FAST) مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفت. همچنین به‌عنوان دستاورد دیگر مقاله با اضافه کردن نویز فرایند و نویز اندازه‌گیری به توربین، برتری الگوریتم پیشنهادی نسبت به رؤیتگرهای دیگر بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: رانشگر توربین بادی، رؤیتگر دینامیکی مقاوم، مد لغزشی، سنتز H_∞.

* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

توربین بادی از اجزای مختلفی تشکیل شده و دارای دینامیک پیچیده و به‌شدت غیرخطی در گشتاور آیرودینامیکی و توان خروجی است [۱]؛ در این تحقیق به طراحی رؤیتگر غیرخطی جدیدی برای آن پرداخته شده است.

در مرجع [۲] مدل‌سازی خطی ترکیب مدل ژنراتور و مدل رانشگر در نظر گرفته شده است. در مرجع [۳] به مدل‌سازی خطی پرداخته و از رؤیتگر لیونبرگر برای به‌دست‌آوردن سیگنال مانده در مسئلهٔ تشخیص عیب استفاده شده است. مدل پارامتر متغیر خطی توربین بادی و استفاده از رؤیتگر حالت تعمیم‌یافته در مرجع [۴] به کار رفته است. رؤیتگر مد لغزشی مرسوم استاتیکی برای تشخیص عیب در توربین بادی در مرجع [۵] استفاده شده است. به‌دلیل وجود ترم غیرخطی در معادلات خطای بین سیستم و رؤیتگر، طراحی مشاهده‌گر برای سیستم‌های دینامیکی غیرخطی نسبت به رؤیتگر خطی، پیچیدگی خاصی دارد. بعضی روش‌های کلاسیک طراحی رؤیتگر غیرخطی شامل پیدا کردن یک تبدیل [۶] است که سیستم را خطی می‌کند و سپس روش‌های طراحی رؤیتگر خطی به کار می‌رود. در این تحقیق پیچیدگی محاسبهٔ تبدیل فضای حالت وجود ندارد.

رؤیتگر حالت اولین بار، توسط لیونبرگر ابداع و پیاده‌سازی شد [۷]. روش‌های متداول در طراحی رؤیتگر غیرخطی شامل اعمال رؤیتگر خطی به سیستم غیرخطی مانند رؤیتگر لیونبرگر تعمیم‌یافته و فیلترکالمن خطی به سیستم‌های غیرخطی [۸]، رؤیتگر بهرهٔ بالا [۹]، رؤیتگر ورودی نامعلوم [۱۰] و مشاهده‌گر تطبیقی است. رؤیتگر مد لغزشی از رؤیتگرهای مهم مقاوم غیرخطی است که توسط اوتکین بیان شد [۱۱] و با توجه به موفقیت آن در فنون طراحی، این مقاله به مسئلهٔ طراحی رؤیتگر مد لغزشی دینامیکی [1] (DSMO) برای کلاس خاصی از سیستم‌های غیرخطی پرداخته است. این کلاس از سیستم‌های غیرخطی لیپشیتز، دستهٔ مهمی از سیستم‌های غیرخطی را نمایش می‌دهند و طراحی رؤیتگر برای آن‌ها را اولین بار، تاو مطرح کرد [۱۲]. شرایط پایداری در مرجع [۱۳] بسط داده شد و روند طراحی بر پایهٔ حل معادلات جبری ریکاتی بیان شد. حل کامل‌تر ابزار طراحی و تضمین پایداری مجانبی رؤیتگر توسط رجمانی [۱۴] بیان کرد. همچنین او ارتباط بین شرط پایداری و کمینه کردن نرم H_∞ سیستم در فرم استاندارد را به دست آورد. یک روش برای کم کردن محافظه‌کاری شرط پایداری بیان‌شده در مقالهٔ رجمانی، استفاده از ایدهٔ رؤیتگر بهره‌بالا می‌باشد [۱۵] بهرهٔ بزرگ برای همگرایی سریع حالت‌های تخمین‌زده‌شده است، اما با توجه به افزایش سرعت پاسخ، سیگنال کنترلی بزرگ‌تر نیاز می‌باشد و ممکن است اشباع و محدودیت فیزیکی و نیز افزایش اثر نویز و نیز پدیدهٔ اوج را به دنبال داشته باشد. روش دیگر، استفاده از رؤیتگر دینامیکی است که در این پژوهش، بر اساس تحلیل پایداری معادلات دینامیکی خطای رؤیتگر، یک الگوریتم کلی در تحلیل و طراحی رؤیتگر مد لغزشی دینامیکی بیان می‌شود؛ این تحلیل برخلاف طراحی‌های مرسوم، هم فرم کلی بخش خطی و هم ساختار بخش غیرخطی معادلات سیستم را در نظر می‌گیرد. استفاده از تعریف جدید ثابت لیپشیتز [2] در توربین بادی، که تابه‌حال به این تعریف برای توربین پرداخته نشده است، اولین بار توسط نویسندهٔ این مقاله مطرح شد [۲۸]. با کمک این تعریف می‌توان از بهرهٔ دینامیک به‌جای بهرهٔ استاتیک مرسوم در طراحی رؤیتگر لیونبرگر استفاده کرد که با استفاده از درجات آزادی اضافی آن می‌توان با عامل غیرخطی مواجه شد و با افزایش ثابت لیپشیتز در سیستم غیرخطی توربین بادی محافظه‌کاری کمتری داشت.

نوآوری طرح شامل ارائهٔ رؤیتگر مد لغزشی دینامیکی ابداعی است که در آن از بهرهٔ دینامیک به‌جای بهرهٔ استاتیک مرسوم در طراحی رؤیتگر مد لغزشی استفاده شده است. سنتز این رؤیتگر توسط بهینه‌سازی H_∞ انجام شد. همچنین با استفاده از معیار H_2/H_∞ اثر نویز سیستم و نویز سنسور در توربین بررسی شد. روش H_∞ به‌کاررفته تعمیم طراحی به سیستم غیرخطی است. در واقع از نظر فنی، فیلتر غیرخطی $\mathcal{L}_2$ (انرژی به انرژی) است که به‌علت شباهت به سیستم خطی، به آن H_∞ غیرخطی گویند. در رؤیتگر پیشنهادی، جملهٔ غیرخطی به‌عنوان عدم قطعیت در نظر گرفته شده و از مسئلهٔ پایدارسازی در بحث مقاوم بودن استفاده شده است؛ مسئلهٔ پایدارسازی توسط روش H_∞ حل می‌شود. نوآوری‌های مقاله در گزارهٔ ۱ و قضیهٔ ۲ بیان شده است.

ساختار مقاله چنین است: در بخش ۲، مدل رانشگر توربین بادی، در قسمت ۳ بیان مسئله و مقداری پیش‌زمینه ارائه می‌شود. در قسمت بعد، رؤیتگر مد لغزشی دینامیکی جدید و اثبات شرط پایداری آن مطرح می‌شود. مسئلهٔ نویز نیز در بخش ۵ بیان می‌شود. در بخش ۶، شبیه‌سازی الگوریتم ارائه‌شده در مقاله و مقایسه‌ای با سایر رؤیتگرها انجام می‌گیرد. در نهایت، مقاله با نتیجه‌گیری و بیان دستاوردهای پژوهش به پایان می‌رسد.

1. Dynamic Sliding Mode Observer

2. Lipschitz Constant

۲. فضای حالت مدل رانشگر [۱]

در این قسمت به توصیف مکانیکی مدل رانشگر پرداخته می‌شود. با توجه به قانون نیوتن، معادلات فضای حالت غیرخطی تک‌جرم برای رانشگر [۱۶] به‌صورت زیر است:

$$\dot{w_r}(t) = \frac{1}{J}(T_r(t) - T_g(t))$$
$$\dot{T_g}(t) = \alpha_g(T_{gref}(t) - T_g(t))$$
$$\begin{bmatrix}\dot{w_r}\\ \dot{T_g}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & -{}^{1}/_{J}\\ 0 & -\alpha_g\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w_r\\ T_g\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ \alpha_g\end{bmatrix}T_{gref} + \begin{bmatrix}{}^{1}/_{J}\\ 0\end{bmatrix}T_r$$
$$\begin{bmatrix}w_r\\ w_g\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0\\ N_g & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}w_r\\ T_g\end{bmatrix} \quad (۱)$$

که w_r سرعت روتور، w_g سرعت ژنراتور، T_r گشتاور آیرودینامیک، T_g گشتاور ژنراتور است. گشتاور آیرودینامیک به رانشگر وارد و باعث افزایش سرعت چرخش روتور به سرعت بالاتر مورد نیاز توسط ژنراتور می‌شود. قسمت آیرودینامیکی توربین توسط گشتاور روتور که روی پره عمل می‌کند، مدل می‌شود. گشتاور آیرودینامیکی غیرخطی پره توسط رابطهٔ زیر بیان می‌شود [۱۷]:

$$T_r(t) = {}^{1}/_{2w_r(t)}\,\rho A V^3(t) C_P(\lambda(t), \beta(t)) \quad (۲)$$

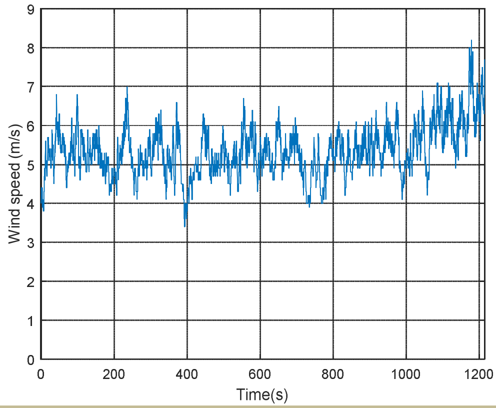
ضریب C_P توصیفگر ضریب توان آیرودینامیکی روتور و یک نگاشت غیرخطی از زاویهٔ گام و نسبت سرعت نوک است. V سرعت باد و A مساحتی است که توسط پره‌های توربین جاروب می‌شود. در منابع دیگر، گشتاور آیرودینامیک به‌عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده اما در این مقاله، این جمله به‌عنوان عامل غیرخطی در نظر گرفته شده است که در قالب معادلهٔ (۵) بیان شود و بتوان برای آن ثابت لیپشیتز تعریف کرد. پارامترها بر اساس مدل مرجع واقعی توربین ۱۰۰ کیلووات طبق جدول (۱) انتخاب شده‌اند.

جدول (۱): پارامترهای توربین ۱۰۰ کیلووات به‌کاررفته در پژوهشکده

نام	پارامتر	مقدار
ممان اینرسی	J	۷۴۰۶ $kg.m^2$
نسبت گیربکس	N_g	۶/۴۴
چگالی هوا	ρ	۱/۲۲۵kg/m^3
ضریب توان	C_{Pmax}	۰/۴۶
شعاع روتور	R	۱۲/۵ m
نسبت سرعت نوک	λ_{opt}	۶/۸
کارایی ژنراتور	η_g	۰/۹۵
پارامتر مدل ژنراتور	α_g	۱۰۰۰$1/s$
سرعت نامی ژنراتور	w_{gnom}	۳۵۰ rpm
سرعت نامی روتور	w_{rnom}	۵۴/۳rpm
توان نامی	P_g	۱۰۰ kw

1. Drivetrain

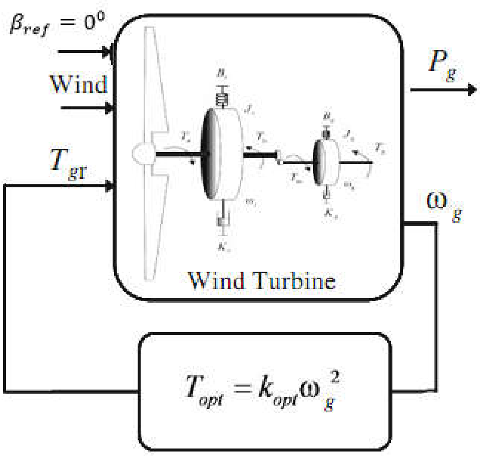
پروفایل باد واقعی شکل (۱) به‌دست‌آمده از نیروگاه بینالود برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. این داده، باد ناحیهٔ دو کاری را پوشش می‌دهد.



شکل (۱): دادهٔ باد واقعی

در این مقاله، ناحیهٔ بار جزئی در نظر گرفته شد و توان بهینه از قرار دادن زاویهٔ گام برابر صفر درجه و نسبت سرعت نوک در مقدار بیشینه‌اش حاصل می‌شود. این زاویه گام بیشینهٔ ضریب توان برای نسبت سرعت نوک خاصی فراهم می‌کند. $w_{r,opt} = \frac{\lambda_{opt} V}{R}$ ضریب C_P باید در بیشترین مقدار خود قرار گیرد که λ_{opt} مقدار C_P را برای زاویهٔ گام صفر درجه بیشینه می‌کند. در این ناحیه، بهینه‌سازی توان گشتاور ژنراتور مرجع با کنترلر استاندارد زیر به دست می‌آید [۱۸] که K_{opt} بهرهٔ قانون کنترلی است:

$$T_{gr} = K_{opt} w_g^2 \quad (۳)$$
$$K_{opt} = \frac{1}{2}\rho A R^3 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3 N_g^3}$$



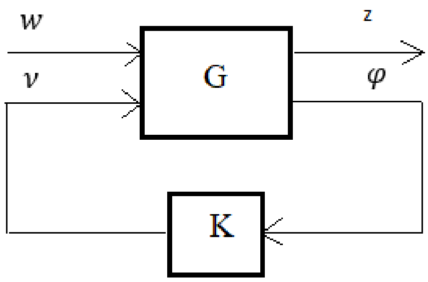
شکل (۲): کنترلر گشتاور ژنراتور در ناحیهٔ دو

توان تولیدی توسط ژنراتور با رابطهٔ $P_g = \eta_g w_g T_g$ بیان می‌شود. وقتی به توان نامی دستیابی پیدا شد، کنترلر به ناحیهٔ بار کامل می‌رود. با توجه به رابطهٔ (۱) قسمت غیرخطی به‌صورت $f(x,t) = \frac{1}{2J_r w_r(t)}\rho A V^3(t) C_{pmax}$ در نظر گرفته شد. با

توجه به اینکه کران بالا برای ثابت لیپشیتز توسط محاسبهٔ ماکزیمم $\|f(x)\|$ روی رنج کاری به دست می‌آید [۱۹]، مقدار آن برای قسمت غیرخطی رانشگر $\alpha =$ ۲/۵۹ حاصل شد.

۳. توصیف مسئله و تعاریف

برای مطرح کردن مسئلهٔ H_∞، نمایش استاندارد زیر در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳): نمایش استاندارد H_∞

در فرم استاندارد بالا، v نقش ورودی کنترل را ایفا می‌کند و هدف، طراحی v به‌گونه‌ای است که دینامیک خطا را که شامل جمله غیرخطی است، پایدار مجانبی کند. متغیرهای w هر سیگنال ناخواسته، z خروجی که باید رگوله شود مانند خطا و معیار عملکرد است، φ خروجی اندازه‌گیری‌شده و v سیگنال کنترل است. با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌ها در فرم استاندارد فضای حالت H_∞، فرایند تعمیم‌یافتهٔ G به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود [۲۰]:

$$G(S) = \left[\begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array}\right] \tag{۴}$$

در این تحقیق، اصول طراحی رؤیتگر برای سیستم زیر بیان می‌شود. سیستم غیرخطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = Ax + Bu + f(x,u), y = Cx \tag{۵}$$

تابع معلوم غیرخطی $f(x,u)$ شرط پیوستگی لیپشیتز زیر را برآورده می‌کند؛ که α ثابت لیپشیتز است [۱۹].

$$\|f(x,u) - f(\hat{x},u)\| \leq \alpha\|x - \hat{x}\| \tag{۶}$$

برای سیستم غیرخطی رؤیتگر لیونبرگر به فرم زیر است:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + f(\hat{x},u) + L(y - \hat{y}), \quad \hat{y} = C\hat{x} \tag{۷}$$

که $\hat{x}$ تخمینی از x می‌باشد. دینامیک خطای رؤیتگر با تعریف خطای تخمین حالت $e = x - \hat{x}$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{e} = (A - LC)e + f(x,u) - f(\hat{x},u) \tag{۸}$$

در مرجع [۱۳] با استفاده از روش بازگشتی و حل معادلهٔ ریکاتی، بهرهٔ رؤیتگر حالت (L) به دست آمد. اما ارتباط واضحی بین $(A - LC)$ و بخش غیرخطی بیان نشد. رجمانی با ارائهٔ تئوری زیر این نظریه را توسعه داد:

برای زوج رؤیت‌پذیر (A,C)، بهرهٔ رؤیتگر L دینامیک خطا (۸) را برای هر جملهٔ غیرخطی که شرط لیپشیتز (۶) را برآورده کند، پایدار می‌کند اگر چنان انتخاب شود که $(A - LC)$ پایدار شود به‌گونه‌ای که:

$$\min_{w\in R^+} \sigma_{min}(A - LC - jwI) > \alpha \tag{۹}$$

σ_{min} کمترین مقدار تکین ماتریس مربوط و α ثابت لیپشیتز است. اثبات آن با تبدیل رابطهٔ بالا به ماتریس همیلتونین و مقدار ویژه نداشتن این ماتریس روی محور موهومی و حل یک معادلهٔ ریکاتی انجام می‌گیرد.

اثبات: بیان‌شده در مرجع [۷].

رابطهٔ (۹) تمرکز بر بخش خطی و ثابت لیپشیتز بخش غیرخطی دارد؛ که کران بالای ثابت لیپشیتز در تحلیل پایداری معادلهٔ خطای رؤیتگر را می‌دهد. با استفاده از نتایج تئوری H_∞ شرط پایداری (۹) معادل است با کمینه کردن نرم H_∞ سیستم حلقه بسته. برای محاسبهٔ بهرهٔ رؤیتگر حالت از الگوریتم مبتنی بر معیار H_∞ در پایداری تابع انتقال و محدود کردن نرم بی‌نهایت آن استفاده می‌شود.

برای سیستم غیرخطی (۵) رؤیتگر مد لغزشی مرسوم به فرم زیر است:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + f(\hat{x},u) + L(y - \hat{y}) + G_n V \tag{۱۰}$$

جملهٔ ناپیوستهٔ کلیدزنی[1] به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = \begin{cases} -\rho \dfrac{Fe_y}{F\|e_y\|}, e_y \neq 0 \\ 0 \qquad\qquad o.w \end{cases} \tag{۱۱}$$

ایدهٔ طراحی رؤیتگر دینامیکی و استفاده از تئوری کنترل مقاوم برای رؤیتگر لیونبرگر (۷) در مرجع [۲۲] ارائه شد. در بخش زیر ایدهٔ تعمیم ساختار رؤیتگر کلاسیک مد لغزشی (۱۰) به چهارچوب دینامیکی بیان می‌شود که نوآوری و هستهٔ اصلی این مقاله است.

۴. ایدهٔ طراحی رؤیتگر دینامیکی مد لغزشی جدید

در این تحقیق، ایدهٔ به‌کاررفته شامل استفاده از بهرهٔ دارای دینامیک

1. Switching

به‌جای بهرهٔ استاتیک L و G_n در رؤیتگر (۱۰) است. فرم دینامیکی پیشنهادی برای رؤیتگر به‌صورت ساختار مد لغزشی دینامیکی زیر در نظر گرفته شد:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + f(\hat{x},u) + m_1 + m_2 \tag{۱۲}$$
$$= A\hat{x} + BT_{gref} + \frac{1}{2\hat{w}_r}\rho AV^3 C_{Pmax} + m_1 + m_2$$

که m_1 و m_2 با اعمال جبران‌سازهای دینامیکی با درجهٔ دلخواه به دست می‌آیند و از تبدیل بهره‌های استاتیک رؤیتگر (۱۰) به معادل دینامیکی آن‌ها به فرم زیر حاصل می‌شوند:

$$G_n: \begin{cases} \dot{\zeta}_1 = A_F\zeta_1 + B_F\frac{(y-\hat{y})}{\|(y-\hat{y})\|} \\ m_1 = C_F\zeta_1 + D_F\frac{(y-\hat{y})}{\|(y-\hat{y})\|} \end{cases} \tag{۱۳}$$

$$L: \begin{cases} \dot{\zeta}_2 = A_L\zeta_2 + B_L(y-\hat{y}) \\ m_2 = C_L\zeta_2 + D_L(y-\hat{y}) \end{cases} \tag{۱۴}$$

دینامیک اضافی، درجهٔ آزادی بیشتری در طراحی فراهم می‌کند و انتخاب بهرهٔ رؤیتگر انعطاف بیشتری خواهد داشت.

۴. ۱. فرموله‌سازی H_∞ مسئلهٔ طراحی رؤیتگر گشتاور برای توربین بادی

جبران‌ساز K در شکل (۳)، برای حداقل کردن تأثیر سیگنال خارجی w روی سیگنال کنترل‌شده z به کار می‌رود که برای پایدار کردن دینامیک خطای رؤیتگر با حل H_∞ به دست می‌آید و پایداری رؤیتگر، معادل کمینه کردن نرم H_∞ سیستم است. در این تحقیق، هدف طراحی گین دینامیک رؤیتگر K به گونه‌ای است که:

$$\|T_{zw}\|_\infty < \frac{1}{\alpha} \tag{۱۵}$$

α ثابت لیپشیتز برای تابع غیرخطی معادلهٔ (۵) است؛ که K از کمینه کردن نرم H_∞ تابع حلقه بسته از w به z محاسبه می‌شود ($T_{zw} = F_l(G,K)$). واضح است که این هدف، مسئلهٔ استاندارد بهینه‌سازی H_∞ می‌باشد و جواب این مسئله تخمین حالت را تضمین می‌کند. با توجه به ساختار مسئله متغیرها به فرم استاندارد به‌صورت زیر انتخاب شد:

$$w = \tilde{f} = f(x,u) - f(\hat{x},u),\ z = e = x - \hat{x}$$
$$\varphi = y - \hat{y}, v = K(y-\hat{y}) \tag{۱۶}$$

در این بخش، به بررسی شرایطی پرداخته می‌شود که پایداری رؤیتگر پیشنهادی اثبات شود.

گزارهٔ ۱: دینامیک خطای غیرخطی رؤیتگر پیشنهادی (۱۲) برای سیستم (۵) پایدار مجانبی است اگر شرایط طراحی زیر برآورده شود:

$$\left.\begin{aligned} A_F &= A_L \\ B_F &= B_L C \\ C_F &= -C_L \\ D_F &= A - D_L C \end{aligned}\right\} \text{پایدار باشد با } \begin{bmatrix} A_F & B_F \\ C_F & D_F \end{bmatrix}$$

اثبات گزارهٔ ۱: با استفاده از (۱۲) به‌عنوان رؤیتگر سیستم (۵) داریم:

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ae + f(x) - f(\hat{x}) - m_1 - m_2$$

که m_1 و m_2 از (۱۳) و (۱۴) حاصل می‌شوند.

$$\dot{e} = Ae + \tilde{f} - C_F\zeta_1 - D_F\frac{(y-\hat{y})}{\|(y-\hat{y})\|} - C_L\zeta_2 - D_L(y-\hat{y})$$

با تعریف $B_F = B_L C$ و $\zeta = \zeta_2 - \zeta_1$ داریم:

$$\dot{\zeta} = \dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_1 = A_L\zeta_2 + B_L(y-\hat{y}) - A_F\zeta_1 - B_F\frac{(y-\hat{y})}{\|(y-\hat{y})\|} = A_F\zeta + B_F e - B_F\frac{(y-\hat{y})}{\|(y-\hat{y})\|}$$

برای مشکل حضور ترم ناپیوسته در دینامیک خطا ایدهٔ اختیار کردن $\sigma(y,\hat{y}) = \frac{(y-\hat{y})}{\|(y-\hat{y})\|}$ به‌عنوان ورودی دوم به کار رفت. دینامیک خطای رؤیتگر پیشنهادی به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\zeta} = A_F\zeta + B_F e + B_F\sigma \tag{۱۷}$$
$$\dot{e} = C_F\zeta + D_F e + \tilde{f} - D_F\sigma$$
$$= Ae - \big(C_L\zeta + D_L(y-\hat{y})\big) + \tilde{f} - D_F\sigma$$

که می‌توان آن را با تابع تبدیل بین w به z به فرم استاندارد زیر نشان داد:

$$\dot{e} = [A]e + [[I_n \quad -D_F] \quad -I_n]\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}\tilde{f}\\ \sigma\end{bmatrix}\\ v\end{bmatrix} \tag{۱۸}$$
$$\begin{bmatrix} z \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n \\ C \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} [0_n \quad 0_n] & 0_n \\ [0_{pn} \quad 0_{pn}] & 0_{pn} \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}\tilde{f}\\ \sigma\end{bmatrix}\\ v\end{bmatrix}$$

بهرهٔ دینامیکی K از روی روابط به‌دست‌آمده به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$K = \left[\begin{array}{c|c} A_L & B_L \\ \hline C_L & D_L \end{array}\right] \tag{۱۹}$$

برآورده شدن (۱۹) معادل یافتن ضرایب $A_L,\ B_L, C_L$ و D_L به گونه‌ای است که ماتریس زیر پایدار باشد.

$$\begin{bmatrix} A_L & B_L C \\ -C_L & A - D_L C \end{bmatrix}$$

با توجه به معادلات خطا (۱۷) و این نکته که $\begin{bmatrix} A_F & B_F \\ C_F & D_F \end{bmatrix}$ از شرط گزارهٔ ۱ پایدار است و $\tilde{f}$ و σ کراندار هستند، با توجه به

تحلیل اغتشاش[1] در مرجع [۱۹] دینامیک خطا پایدار مجانبی است. اینک با حل یک مسئلهٔ استاندارد زیر بهینهٔ کنترل H_∞ می‌توان بهرهٔ رؤیتگر دینامیکی را به دست آورد. در مرجع [۲۳] ایدهٔ رؤیتگر دینامیکی رؤیتگر ورودی نامعلوم به کار رفته است؛ این رؤیتگر با توجه به الزام برآورده کردن شرط رتبه دارای محدودیت است. در رؤیتگر مد لغزشی ترم ناپیوسته در دینامیک خطا ظاهر می‌شود که ایدهٔ به کار بردن این جمله به‌صورت ورودی دوم در فرم استاندارد به کار رفت.

۴. ۲. الگوریتم طراحی بهرهٔ رؤیتگر K

هدف به دست آوردن فیلتر دینامیکی K مورد نیاز برای پایدارسازی دینامیک خطا با توجه به قضیه ۲ است. برای یک مقدار ثابت α الگوریتم جست‌وجوی باینری برای به دست آوردن گین دینامیک توسط قضیه زیر اجرا می‌شود.

تعریف ۱: حوزهٔ ریکاتی $dom(Ric)$ فضایی متشکل از ماتریس‌های همیلتونین دارای دو خاصیت است [۲۱]. $Ric(N_\infty)$ پاسخ منفرد معادلهٔ مرتبط با ریکاتی N_∞ است.

اگر بهرهٔ K به‌نحوی انتخاب شود که $\|T_{zw}\|_\infty < 1/\alpha$ شود، آنگاه دینامیک خطا پایدار مجانبی است [۲۲].

قضیهٔ ۱: فرض کنید زوج (A,C) آشکارپذیر باشد. به‌ازای ثابت لیپشیتز α بهرهٔ دینامیک K (۱۹) با ویژگی $\|T_{zw}\|_\infty <\alpha^{-1}$ وجود دارد اگر و تنها اگر وجود داشته باشد $\epsilon,\beta > 0$ و به‌طوری که

۱) $N_\infty \in dom(Ric), X_\infty = Ric(N_\infty)$

۲) $J_\infty \in dom(Ric), Y_\infty = Ric(J_\infty)$

۳) $\rho(X_\infty Y_\infty) < \alpha^{-2}$

ρ شعاع طیفی است و دو ماتریس همیلتونین (۲۰) بر اساس معادلهٔ ریکاتی محاسبه‌شده از روی معادلات به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N_\infty = \begin{bmatrix} A & \alpha^2 I_n - \beta^{-2} I_n \\ -I_n & -A^T \end{bmatrix}$$

$$J_\infty = \begin{bmatrix} A^T & \alpha^2 I_n - \epsilon^{-2} C^T C \\ -I_n & -A \end{bmatrix} \qquad (۲۰)$$

بهره دینامیک رؤیتگر حالت زیر از پاسخ مثبت معین معادلات ریکاتی متناظر با ماتریسهای همیلتونین بالا حاصل می‌شود [۱۴]. در صورت برآورده شدن شرایط قضیه ۱، بهره دینامیکی K (۱۹) از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$K = \begin{bmatrix} A_\infty & -Z_\infty L_\infty \epsilon^{-1} \\ \beta^{-1} F_\infty & 0 \end{bmatrix} \qquad (۲۱)$$

$$A_\infty = A + \alpha^2 X_\infty + \beta^{-1} F_\infty + \epsilon^{-1} Z_\infty L_\infty C$$
$$F_\infty = -\beta^{-1} X_\infty\ , \quad L_\infty = -\epsilon^{-1} Y_\infty C'$$
$$Z_\infty = (I - \alpha^2 Y_\infty X_\infty)^{-1}$$

اثبات: نتیجهٔ مستقیم [۲۲].

۴. ۳. تحلیل پایداری رؤیتگر ابداعی

قضیهٔ زیر جواب کلی به مسئلهٔ طراحی رؤیتگر دینامیکی را تأمین می‌کند.

قضیهٔ ۲: برای سیستم غیرخطی (۵) و با برآورده شدن شرط لیپشیتز (۶) با ثابت لیپشیتز α حالت رؤیتگر (۱۲) به حالت سیستم اصلی همگرا می‌شود اگر بهرهٔ رؤیتگر K (۱۹) چنان انتخاب شود که شرط پایداری زیر برقرار باشد:

$$sup_{w\in R}\sigma_{max}[T_{zw}(jw)] < {}^{1}/_{\alpha} \qquad (۲۲)$$

شرط پایداری بالا را می‌توان با نرم H_∞ در رابطهٔ $\|T_{zw}\|_\infty < 1/\alpha$ نشان داد.

اثبات: با استفاده از ماتریس‌های به‌دست‌آمدهٔ (۱۹) و تعاریف متغیرهای (۱۶)، T_{zw} به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$T_{zw} = \left[\begin{array}{cc|c} A - D_L C & -C_L & \begin{bmatrix} I_n & -D_F \end{bmatrix} \\ B_L C & A_L & \begin{bmatrix} 0_{pn} & 0_p \end{bmatrix} \\ \hline I_n & 0_n & \begin{bmatrix} 0_n & 0_{np} \end{bmatrix} \end{array}\right] \qquad (۲۳)$$

به‌نحوی است که با توجه به (۲۲)، بهرهٔ $\mathcal{L}_2$ آن $\gamma(T_{zw}) < {}^{1}/_{\alpha}$ است. خطای تخمین e از اتصال فیدبکی T_{zw}، Δ_1 و Δ_2 نشان داده‌شده در شکل (۳) به دست می‌آید. که Δ عملگر متغیر بازمان غیرخطی استاتیک است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta(t): e \to \tilde{f} = f(x,u,t) - f(\hat{x},u,t)$$
$$= f(e + \hat{x},u,t) - f(\hat{x},u,t)$$

به‌خاطر شرط لیپشیتز (۶)، $\gamma(\Delta_1) \le \alpha$؛ در نتیجه

$$\gamma(\Delta_1) = \sup_{e} \frac{\|\tilde{f}\|_{L_2}}{\|e\|_{L_2}} \le \frac{\sqrt{\int_0^\infty \alpha^2 \|x - \hat{x}\|^2 \, dt}}{\sqrt{\int_0^\infty \|x - \hat{x}\|^2 \, dt}} \le \alpha$$

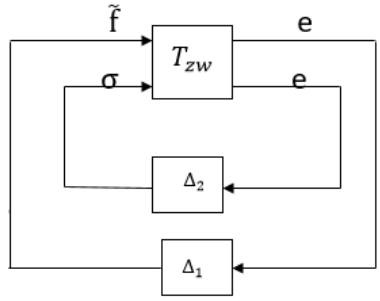
$$\Rightarrow \gamma(\Delta_1) \le \alpha$$

که دارای بهرهٔ $\mathcal{L}_2$ محدود است. با استفاده از کران روی بهرهٔ $\mathcal{L}_2$ عملگرهای T_{zw}، Δ_1 و Δ_2 و با استفاده از بحث اتلافی بودن[2] نشان داده می‌شود هر عملگر با توجه به نرخ تغذیهٔ[3] آن اتلافی

1. Perturbation Analysis
2. Dissipativity
3. Supply rate

است.

تعریف ۲: پایدار بهرهٔ محدود[1]: سیستم پایدار بهرهٔ محدود است اگر و فقط اگر اتلافی باشد [۱۹].



شکل (۴): اتصال فیدبکی

برای بلوک اول نرخ تغذیه به‌صورت

$$W_T = \sum_{i=1}^{n}\{\gamma(T_{zw})^2\|w_i\|^2 - \|z_i\|^2\} = \gamma(T_{zw})^2\|\tilde{f}\|^2 - \|e\|^2 + \gamma(T_{zw})^2\|\sigma\|^2 - \|e\|^2$$

در نظر گرفته شد؛ که $\gamma(T_{zw})$ با کنترلر و از طریق بهینه‌سازی به دست آمده است. سیستم دارای بهرهٔ محدود و پایدار بهرهٔ محدود است و طبق تعریف ۲ اتلافی است. Δ_1 اتلافی با نرخ تغذیه $W_{\Delta_1} = \gamma(\Delta_1)^2 e^T e - \tilde{f}^T\tilde{f} = \alpha^2 e^T e - \tilde{f}^T\tilde{f}$ است.

تعریف ۳: اگر عدم قطعیت دارای بهرهٔ محدود باشد، آن را Q اتلافی گویند اگر

$$\begin{bmatrix}\Delta\\ I\end{bmatrix}^T Q_i \begin{bmatrix}\Delta\\ I\end{bmatrix} \leq 0$$

باشد [۲۴]. عدم قطعیت کران محدود[2]، $\{\gamma^2 I, 0, I\}$ اتلافی است.

$$\begin{bmatrix}\Delta\\ I\end{bmatrix}^T \begin{bmatrix}-\gamma^2 I & 0\\ 0 & I\end{bmatrix} \begin{bmatrix}\Delta\\ I\end{bmatrix} \leq 0$$

$$-\gamma^2 I + \Delta^T\Delta \leq 0 \Longrightarrow \|\Delta\| \leq \gamma$$

$$w_\Delta = \Delta z_\Delta \Longrightarrow \|w_\Delta\| \leq \gamma\|z_\Delta\|$$

عدم قطعیت Δ_2 طبق تعریف ۳ با نرخ تغذیهٔ زیر اتلافی است:

$$W_{\Delta_2} = \gamma(\Delta_2)^2 e^T e - \sigma^T\sigma$$

$$(\Delta_2) = \sup_{e} \frac{\|\sigma\|_{L_2}}{\|e\|_{L_2}} \leq \frac{1}{\sqrt{\int_0^\infty \|e\|^2\,dt}} \leq \frac{1}{\|e\|_{L_2}}$$

نرخ تغذیهٔ سیستم T_{zw} با W_T نمایش داده می‌شود.

$$W_T = \sum_{i=1}^{n}\{\gamma(T_{zw})^2\|w_i\|^2 - \|z_i\|^2\} = \gamma(T_{zw})^2\|\tilde{f}\|^2 - \|e\|^2 + \gamma(T_{zw})^2\|\sigma\|^2 - \|e\|^2 \qquad (۲۴)$$

با توجه به اینکه Δ_i دارای بهرهٔ محدود کمتر یا مساوی γ_i هستند، به دست آورده می‌شود:

$$\int_0^T (W_T + \sum_{i=1}^{n} a_i W_{\Delta_i})dt \geq 0 \qquad a_i > 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} a_i W_{\Delta_i} = a_1 W_{\Delta_1} + a_2 W_{\Delta_2}$$

نرخ تغذیهٔ کل به‌صورت

$$W_c = W_T + a_1 W_{\Delta_1} + a_2 W_{\Delta_2} \qquad (۲۵)$$

$$\begin{aligned} W_c &= \gamma(T_{zw})^2\|\tilde{f}\|^2 - \|e\|^2 + \gamma(T_{zw})^2\|\sigma\|^2 - \|e\|^2 \\ &+ a_1\left(\alpha^2\|e\|^2 - \|\tilde{f}\|^2\right) + a_2(\gamma(\Delta_2)^2\|e\|^2 - \|\delta\|^2) \\ &= (\gamma(T_{zw})^2 - a_1)\|\tilde{f}\|^2 + (\gamma(T_{zw})^2 - a_2)\|\delta\|^2 \\ &+ (a_2\gamma(\Delta_2)^2 - 1)\|e\|^2 + (a_1\alpha^2 - 1)\|e\|^2 \end{aligned}$$

تابع ذخیره[3] $S > 0$ را در نظر بگیرید. با توجه به اتلافی بودن Δ_i و رابطهٔ $\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial x}\dot{x} \leq W(u,y)$ تابع ذخیره S_{Δ_i} که شرط $\dot{S}_{\Delta_i} \leq W_{\Delta_i}$ و همچنین $\dot{S}_T \leq W_T$ را برآورده کند وجود دارد. در سیستم خودگردان بین سیستم اتلافی و تابع لیاپانف ارتباط وجود دارد [۲۵]. تابع لیاپانف کلی سیستم به شکل زیر در نظر گرفته شد.

$$S_c = S_T + \sum_{i=1}^{n} a_i S_{\Delta_i} \qquad (۲۶)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_c \leq W_T + \sum_{i=1}^{n} a_i W_{\Delta_i} &\leq (\gamma(T_{zw})^2 - a_1)\|\tilde{f}\|^2 \\ &+ (\gamma(T_{zw})^2 - a_2)\|\delta\|^2 + (a_2 k^2 - 1)\|e\|^2 \\ &+ (a_1\alpha^2 - 1)\|e\|^2 \end{aligned}$$

با توجه به $\gamma(T_{zw})\gamma(\Delta_i) < 1$، $a_i\gamma(\Delta_i)^2 - 1 < 0$ و $\gamma(T_{zw})^2 - a_i < 0$ و اختیار کردن $a_i = \gamma(T_{zw})^2 + \varepsilon_i$ که $\gamma(T_{zw})^2 + \varepsilon_i = 1/\gamma(\Delta_i)^2$ است، پایداری مجانبی سیستم ترکیبی فیدبکی حاصل می‌شود.

۵. بررسی نویز پروسه و اندازه‌گیری توربین با رؤیتگر ترکیبی H_2 و H_∞

برای تضمین پایداری نسبت به جملهٔ غیرخطی، شرط (۱۵) بر اساس نرم بی‌نهایت باید محقق شود. برای کاهش اثر نویز، نرم دو تابع انتقال ورودی نویز و خروجی z در نظر گرفته شد؛ که این نرم برای حداقل کردن تأثیر نویز بر خطای تخمین مناسب‌تر است [۲۶]. کنترلر پایدارساز دینامیکی K به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که دو معیار زیر در نظر گرفته شود. نرم بی‌نهایت بین ورودی w_1 و خروجی از مقدار γ

1. Finite-gain-stable
2. Nom bounded uncertainty
3. Storage Function

کمتر باشد و نرم دو تابع انتقال بین ورودی w_0 و خروجی کمینه گردد؛ که w_0 سیگنال تصادفی با توان محدود و چگالی طیفی $S_{w_0} = I$ است. معادلات سیستم (۵) با در نظر گرفتن نویز حالت n_1 و نویز اندازه‌گیری n_2 به‌صورت زیر می‌شود:

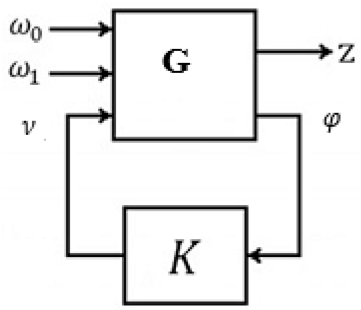
$$\dot{x} = Ax + Bu + f(x,u,t) + n_1 \qquad (۲۷)$$
$$y = Cx + n_2$$

با استفاده از رؤیتگر (۱۲) معادلهٔ خطای تخمین به‌صورت زیر است:

$$y - \hat{y} = Ce + n_2$$
$$\dot{e} = Ae - \left(C_L\zeta + D_L(y-\hat{y})\right) + \tilde{f} - D_F\sigma + n_1 \qquad (۲۸)$$

تحلیل عملکرد سیستم با ورودی‌های زیر در رؤیتگر ترکیبی مانند شکل (۵) بررسی می‌شود.

$$w_0 = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix},\ w_1 = \begin{bmatrix} \tilde{f} \\ \sigma \end{bmatrix}$$



شکل (۵): نمایش استاندارد رؤیتگر ترکیبی

در معادلهٔ خطا هر دو نوع نویز ظاهر می‌شوند. معادلهٔ خطای تخمین بالا را در حالت رگوله‌شده و با در نظر گرفتن نویز می‌توان با معادلات فضای حالت زیر نشان داد.

$$\dot{e} = [A]e + \begin{bmatrix}[I_n \quad 0_{np}] & [I_n \quad -D_F \quad 0_{np}] & -I_n\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \tilde{f} \\ \sigma \\ d \end{bmatrix} \\ v\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} z \\ \beta v \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n \\ 0_n \\ C \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0_n & 0_p \\ 0_n & 0_p \\ 0_{pn} & I_p \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0_n & 0_n & 0_{np} \\ 0_n & 0_n & 0_{np} \\ 0_{pn} & 0_{pn} & \epsilon I_p \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0_n \\ \beta I_n \\ 0_{pn} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix}\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \tilde{f} \\ \sigma \\ d \end{bmatrix} \\ v\end{bmatrix}$$

طراحی ترکیبی از بین مجموعه کنترلرهای پایدارساز که شرط (۱۵) را برآورده می‌کنند، کنترل‌کننده‌ای را برمی‌گزینند که نرم دو تابع انتقال را نیز حداقل کند.

قضیهٔ ۳: فرض کنید زوج (A,C) آشکارپذیر باشد. به‌ازای ثابت لیپشیتز α بهرهٔ دینامیک K (۱۹) با ویژگی $\|T_{zw_1}\|_\infty < \alpha^{-1}$ و $\|T_{zw_0}\|_2$ کمینه وجود دارد اگر و تنها اگر وجود داشته باشد $\epsilon, \beta > 0$ و $N_\infty \in dom(Ric), X_\infty = Ric(N_\infty) \geq 0$ و ماتریس‌های L_0، $Y \geq 0$ و $P > 0$ به‌طوری که معادلات زیر همزمان برقرار باشند:

$$A_r'Y + YA_r + \alpha^2 Y[I_n \quad L_0][I_n \quad L_0]'Y + F_\infty' F_\infty = 0 \qquad (۱$$
$$A_p P + PA_p' + [I_n \quad \epsilon L_0][I_n \quad \epsilon L_0]' = 0 \qquad (۲$$
$$Y(\epsilon^{-2}L_0 + \epsilon^{-1}PC' + \alpha^2 PYL_0 = 0 \qquad (۳$$

$$A_r = A + \alpha^2 X_\infty + \epsilon^{-1}L_0 C$$
$$A_p = A_r + \alpha^2[I_n \quad L_0][I_n \quad L_0]'Y$$

که L_0 با الگوریتم جست‌وجو برای کمینه کردن تابع هدف زیر به دست می‌آید:

$$Z = Y(\varepsilon^{-2}L_0 + \varepsilon^{-1}PC' + \alpha^2 PYL_0), \qquad J_{L_0} = Z'Z$$
$$\min_{L_0} J_{L_0}\ s.t\ 1),2)\ and\ 3)$$

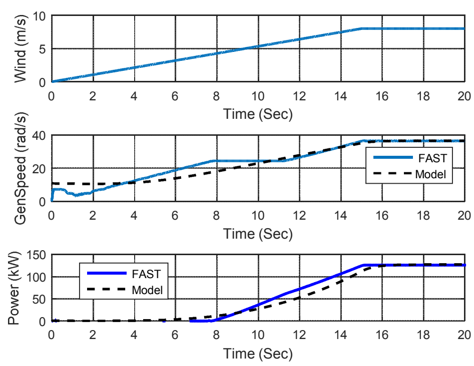
در صورت برآورده شدن شرایط بالا، بهرهٔ دینامیکی ترکیبی K_{MC} از رابطهٔ زیر حاصل می‌شود.

$$K_{MC} = \begin{bmatrix} A_r + \beta^{-1}F_\infty & -\epsilon^{-1}L_0 \\ \beta^{-1}F_\infty & 0 \end{bmatrix} \qquad (۲۹)$$

اثبات: نتیجهٔ مستقیم الگوریتم طراحی [۲۷].

۶. نتایج شبیه‌سازی

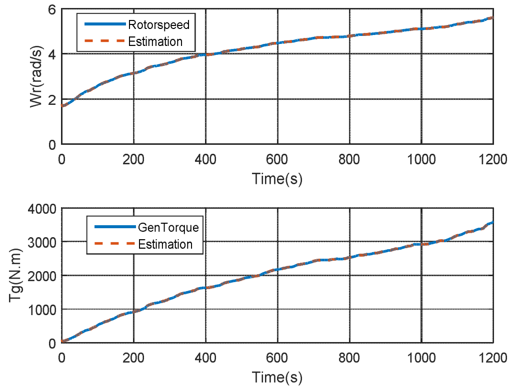
روش ابداعی بر روی مدل غیرخطی رانشگر که در بخش ۲ بیان شد، با باد واقعی شکل (۱) از سایت بینالود پیاده‌سازی شد. در ابتدا برای تست و اعتبارسنجی طراحی، مدل در نرم‌افزار FAST شبیه‌سازی شد. این نرم‌افزار یک شبیه‌ساز غیرخطی مختص توربین بادی در حوزهٔ زمان است که ترکیبی از فرمولاسیون دینامیک چندجسمی و مودال است.



شکل (۶): مقایسهٔ مدل در متلب با FAST

شکل (۶) منطبق بودن مدل شبیه‌سازی‌شده با MATLAB را با نرم‌افزار شبیه‌سازی FAST نشان می‌دهد که نشان از سازگاری نتایج دارد. سرعت ژنراتور به ۳۶/۶ rad/s معادل ۳۵۰ rpm نامی

رسیده است. پس از اعتبارسنجی، شبیه‌سازی و طراحی رؤیتگر در MATLAB به‌صورت زیر انجام شد:



شکل (۷): تخمین با رؤیتگر $H_\infty DSMO$

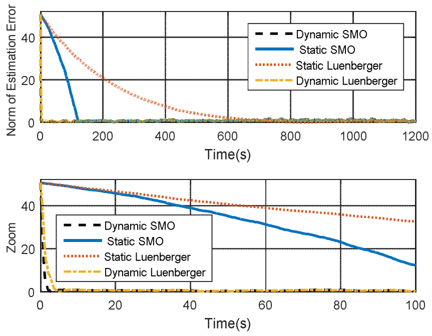
تخمین حالت‌های سرعت روتور و گشتاور ژنراتور توسط DSMO در شکل (۷) نمایش داده شده که حاکی از تخمین دقیق گشتاور ژنراتور و رسیدن به مقدار نامی ۳/۲ kN.m است. شرایط اولیه [۱/۶۷ ، ۰] و برای رؤیتگر [۱/۸، ۰/۱] انتخاب شد.

شکل (۸) عملکرد سیستم را با چهار رؤیتگر حالت مختلف مقایسه می‌کنند: رؤیتگر لیونبرگر با بهرهٔ استاتیک و دینامیک [۲۲]، رؤیتگر مد لغزشی با بهرهٔ استاتیک [۲ و ۵] و بهرهٔ دینامیک (۱۲). همان طور که در شکل (۸) دیده می‌شود، رؤیتگر دینامیکی مد لغزشی ابداعی نسبت به رؤیتگرهای دیگر و حتی رؤیتگر دینامیکی لیونبرگر [۲۲] عملکرد بهتر و سریع‌تری را ارائه می‌دهد که نقطهٔ قوّت مقاله و از مزایای طرح پیشنهادی است. به‌علاوه برای نشان دادن برتری الگوریتم پیشنهادی، میانگین مجذور مربعات خطا نیز در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مقایسهٔ رؤیتگرها

نوع رؤیتگر	RMSE
لیونبرگر استاتیکی	۱۰/۶۷۹۸
لیونبرگر دینامیکی	۱/۰۳۳۹
مد لغزشی استاتیکی	۷/۲۸۷۰
مد لغزشی دینامیکی	۰/۳۳۲۲

به بررسی اثر نویز در رانشگر نیز پرداخته شد. نرم دو توابع انتقال به ازا دو بهره دینامیک الگوریتم طراحی ترکیبی H_2/H_∞، مقدار $\|T_{zw_0}\|_2$ =۳۱/۹ و الگوریتم H_∞ به‌صورت ۳۶/۲ = $\|T_{zw_0}\|_2$ به دست آمد که نشان از کاهش تاثیر نویز بر تخمین حالت در روش ترکیبی دارد.



شکل (۸): مقایسهٔ خطاهای تخمین رؤیتگرهای متفاوت

با استفاده از دستور متلب "$hinfsyn$" کمترین مقدار ۰/۱۰۷۷ = $\gamma = {}^1/_\alpha$ برای به‌دست‌آوردن کنترلر بهینهٔ H_∞ حاصل می‌شود. اما با استفاده از مراحل طراحی قضیهٔ ۱ با انتخاب ۰/۰۰۷۸۱۲۵ = $\epsilon = \beta$ توسط الگوریتم تکرار، مقدار $\alpha =$ ۱۵ که متناسب با $\gamma =$ ۰/۰۶۶۷ می‌باشد، به دست می‌آید که نشان‌دهندهٔ افزایش ثابت لیپشیتز با استفاده از گین دینامیک است. همچنین بر اساس سخت‌افزار واسط $PLC\ Beckhoff$ الگوریتم طراحی اجرا و کامپایل شد که حاکی از اجرای بلادرنگ برنامهٔ ما داشت و همگرایی به مقدار واقعی در کمتر از ۶ ثانیه اتفاق افتاد.

۷. نتیجه گیری

طراحی رؤیتگر مد لغزشی دینامیکی جدید برای سیستم غیرخطی توربین بادی انجام شد. از مزایای روش پیشنهادی این است که نیاز به تبدیل مختصات، تبدیل کانونی یا تقریب برای خطی‌سازی ندارد. در این مقاله، استراتژی جبران‌ساز دینامیکی که دارای درجهٔ آزادی بیشتری است، مورد توجه قرار گرفت. الگوریتم طراحی برای محاسبهٔ بهرهٔ دینامیکی رؤیتگر در قالب ساختار H_∞ و حل معادلهٔ ریکاتی بیان شد، به‌طوری که بخش خطی و همچنین ثابت لیپشیتز بخش غیرخطی معادلات سیستم در آن نقش ویژه‌ای داشت. سنتز رؤیتگر لیپشیتز در قالب رؤیتگر دینامیکی و توسط بهینه‌سازی H_∞ انجام شد که توسط نرم‌افزارهای موجود قابل پیاده‌سازی است. با افزایش ثابت لیپشیتز سیستم توربین بادی توسط مشاهده‌گر دینامیکی با یک کنترلر ثابت، ناحیهٔ کاری وسیع‌تری پوشش داده شد. اگر سرعت روتور زیاد شود، کنترل و پایداری از دست داده نمی‌شود و بازه تغییرات کنترلی بیشتر می‌شود و نیاز به ترمز نیست. ماکزیمم ثابت لیپشیتز به‌دست‌آمده با رؤیتگر پیشنهادی، بزرگ‌تر از رؤیتگر با بهرهٔ استاتیک است که از مزایای متد پیشنهادی می‌باشد. به کار بردن متد طراحی برای سیستم‌های نامعین غیرخطی یا دارای عیب و همچنین استفاده از حل LMI به‌جای ریکاتی را می‌توان به‌عنوان تحقیق آینده انجام داد.

مراجع

[1] Odgaard, P.F., "*A Benchmark Evaluation of Fault Tolerant Wind Turbine Control Concepts*", IEEE Trans. Control Syst. Technol, Vol. 23, No. 3, pp. 1221-1228, 2014.

[2] Rahnavard, M., Ayati, M., Hariri Yazdi M. R. and Mousavi, M., "*Finite Time Estimation of Actuator Faults, States, and Aerodynamic Load of a Realistic Wind Turbine*", Renewable Energy, Vol. 1, No. 130, pp. 256-267, 2019.

[3] Cohal, A. and Mirea, L., "*Fault Detection and Isolation of a Wind Turbine*", CEAI, Vol. 19, No. 3, pp. 107-118, 2017.

[4] Shi, F. and Patton R., "*An Active fault tolerant control approach to an offshore wind turbine model*", Renewable Energy, Vol. 1, No. 75, pp. 788-798, 2015.

[5] Rahnavard, M., Hariri Yazdi M. R. and Mousavi, M., "*On the Development of a Sliding Mode Observer-based Fault Diagnosis Scheme for a Wind Turbine Benchmark Model*", Energy Equip. Sys. Vol. 5. No.1, pp. 13-26, 2017.

[6] He, J. and Zhang, C., "*Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems*", Mathematical Problems in Engineering 2012.

[7] Luenberger, D., "*An introduction to observers*", IEEE Transactions on Automatic Control Vol. 16, No. 6, pp. 596 – 602, 1972.

[8] Ekramian, M., Hosseinnia, S. and Sheikholeslam, F., "*A General Framework in Designing Luenberger-like Nonlinear Observer*", IET Control Theory and Applications, 2013.

[9] Farza, M., Sboui, a., Cherrier, E. and M'Saad, M., "*High-gain observer for a class of time-delay nonlinear systems*", International Journal of Control, Taylor & Francis, Vol. 83, No. 2, pp. 273-280, 2010.

[10] Zarei, J. and Poshtan, J., "*Design of Nonlinear Unknown Input Observer for Process Fault Detection*", Ind. Eng.Chem.Res, Vol. 49, pp. 11443–11452, 2010.

[11] Utkin, V.I., "*Sliding Modes in Control Optimization*", Springer-Velag, Berlin, 1992.

[12] Thau, E.F., "*Observing the state of nonlinear dynamic systems*", International Journal of Control, Vol. 17, pp. 471-479. 1973.

[13] Raghavan, S. and Hedrick, J., "*Observer design for a class of nonlinear systems*", Int. J. Control, Vol. 59, pp. 515-528, 1994.

[14] Rajamani, R., "*Observers for Lipschitz Nonlinear Systems*", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 43, No. 3, 1998.

[15] Khalil, H.K. and Praly, L., "*High gain observers in nonlinear feedback control*", International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 24, No, 6, pp. 993-1015, 2014.

[16] Odgaard, P.F., Stoustrup, J., Nielsen, R. and Damgaard, C., "*Observer Based Detection of Sensor Faults in Wind Turbines*", European Wind Energy Conference, pp. 4421-4430, 2009.

[17] Sloth, C., Esbensen, T., Niss, M. O.K., Stoustrup, J. and Odgaard, P.F., "*Robust LMI-Based Control of Wind Turbines with Parametric Uncertainties*", 18th IEEE International Conference on Control Applications, Russia, pp. 776-781 2009.

[18] Odgaard P.F., Stoustrup, J. and Kinnaert, M., "*Fault-tolerant control of wind turbines: A benchmark model*", IEEE Trans. Control Syst. Technol.,V. 21, No. 4, pp. 1168–1182, 2013.

[19] Marquez, H.J, "*Nonlinear Control Systems: Analysis and Design*", John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersy, 2003.

[20] Doyle, J., Glover, K., Khargonekar P. and Francis, B., "*State- Space Solutions to Standard H2 and H∞ Control Problems*", IEEE Trans. Auto Ctrl, Vol. 34, No. 8, pp. 831-847, 1989.

[21] Zhou K, J. C. Doyle, "*Essentials of Robust Control*", Prentice-Hall, NY, 1998.

[22] Pertew, A., Marquez, H. and Zhao, Q., "*H_∞ Observer Design for Lipschitz Nonlinear Systems*", IEEE Trans. Auto. Ctrl, Vol 51, No. 7, pp. 1211-1216, 2006.

[23] Pertew, A., Marquez, H. and Zhao, Q., "*H_∞ synthesis of unknown input observers for non-linear Lipschitz systems*", *International Journal of Control* Vol. 78, No. 15, pp. 1155-1165, 2005.

[24] Van der Schaft, A., "Chapter 3, in *L2-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Contro*l", Springer International Publishing, 2017, DOI: 10.1007/978-3-319-49992-5.

[25] Arcak, M., Meissen, C. and Packard, A., "*Networks of Dissipative Systems Compositional Certification of Stability, Performance, and Safety*", Springer 2018.

[26] Zhou, K., "*Comparison between H_2 and H_∞ controllers*", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 37, pp. 1261–1265, 1992,

[27] Doyle, J. C., Zhou, K., Glover, K. and Bodenheimer, B., "*Mixed H_2 and H_∞performance objectives II: optimal control*", IEEE Trans. Auto. Ctrl., Vol. 39, No. 8, pp. 1575–1587, 1994.

[۲۸] شجیعی، مهنوش، حسینی، سید کمال، نقیبی، محمدباقر، «**رؤیتگر دینامیکی برای سیستم غیرخطی و کاربرد در توربین بادی**»، بیست‌وهفتمین کنفرانس مهندسی برق ایران، یزد، اردیبهشت ۹۸.