

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بررسی راه‌های افزایش بهره‌وری در سیستم‌های با بهره‌وری پایین

سمینار کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل

آذین آزاده

استاد راهنما

دکتر بهرام برزو

۱۳۹۴

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
سه	فهرست مطالب
۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه
۳	۱-۱ پیشینه تحقیق
۴	۲-۱ اهداف و دستاوردهای تحقیق
۵	۳-۱ ساختار گزارش
	فصل دوم: کنترل کننده بهینه H_2
۷	۱-۲ کنترل کننده بهینه H_2 برای سیستم های زمان پیوسته
۷	۲-۱-۱ تعریف نرم H_2 برای سیستم های زمان پیوسته
	پیوست اول: تبدیل دوخطی
۱۱	مراجع

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگزین کردن آن‌ها به جای سوخت‌های فسیلی در کشورهای توسعه‌یافته و صنعتی با رشد قابل توجهی همراه بوده است. یکی از این انرژی‌های تجدیدپذیر که بیشتر از سایر انرژی‌ها مورد استفاده قرار گرفته، انرژی باد است. توربین‌های بادی سیستم‌های الکترومکانیکی پیچیده‌ای هستند که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و از این رو بخش‌های مختلف توربین‌های بادی در معرض عیب‌های مختلفی قرار می‌گیرند. از آنجایی که زیرسیستم‌های مختلف توربین بادی با یکدیگر در ارتباط هستند، با ظهور عیب در یک زیرسیستم توربین بادی، امکان پخش شدن و اثرگذاری آن عیب در کل سیستم وجود دارد. از این رو برای جلوگیری و کاهش هزینه‌های ناشی از وقوع عیب در سیستم، نیازمند مکانیزمی هستیم که عیب را در لحظات ابتدایی وقوع در سیستم شناسایی کرده و به رفع اثر آن بپردازد. روش‌های تشخیص و جداسازی عیب در سیستم‌ها به دو دسته‌ی کلی مبتنی بر مدل و مبتنی بر سیگنال تقسیم می‌شوند. یکی از روش‌های مبتنی بر مدل برای شناسایی عیوب یک سیستم، استفاده از رویکردهای ورودی ناشناخته است. در این روش به کمک مدل سیستم، بانکی از رویکردها طراحی می‌شود که به وسیله‌ی آن‌ها سیگنال‌های مانده تولید شود. با پردازش مناسب مانده‌ها، زمان و مکانی که عیوب اتفاق می‌افتند پس از زمانی محدود شناسایی می‌شوند. در این تحقیق به تشخیص آنلاین عیوب حسگر سرعت روتور و ژنراتور و گشتاور ژنراتور توربین بادی با استفاده از بانک رویکردها پرداخته شده است. پس از شناسایی زمان و مکان عیب باید از مکانیزمی جهت رفع اثرات منفی ناشی از ظهور عیب در سیستم استفاده شود. این عمل از طریق کنترل‌کننده‌ی طراحی شده انجام می‌شود. در واقع پس از تشخیص عیب، با استفاده از سیگنال آشکارسازی عیب و تخمین حالت‌ها، پارامترهای کنترل‌کننده طوری تغییر داده می‌شوند که اثرات منفی ناشی از ظهور عیب در سیستم جبران شود.

کلمات کلیدی: تشخیص عیب، کنترل انعطاف‌پذیر توربین بادی، سازش با عیوب، رویکردهای ورودی ناشناخته.

فصل اول

مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگزین کردن آن‌ها به جای سوخت‌های فسیلی در کشورهای توسعه‌یافته و صنعتی با رشد قابل توجهی همراه بوده است. یکی از این انرژی‌های تجدیدپذیر که بیشتر از سایر انرژی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، انرژی باد است. توربین‌های بادی طی دو مرحله انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در مرحله‌ی اول روتور توربین بادی انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند و در مرحله‌ی دوم انرژی مکانیکی توسط ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. توربین‌های بادی سیستم‌های الکترومکانیکی پیچیده‌ای هستند و از این رو در معرض عیوب^۱ متنوعی در قسمت‌های مختلف همچون سیستم‌ها، محرک‌ها و حس‌گرها قرار می‌گیرند.

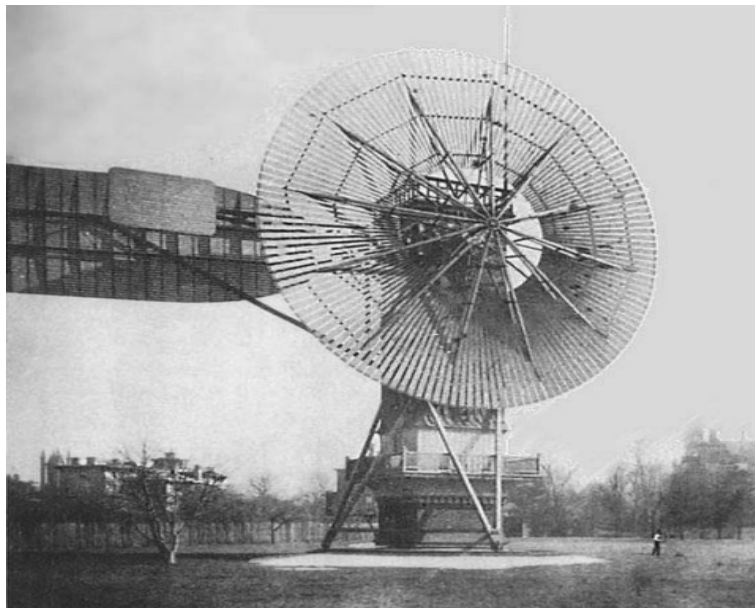
از طرف دیگر تشخیص نادرست و دیر هنگام این عیوب سبب می‌شود که عیوب در کل سیستم پخش شوند و حتی باعث خرابی^۲ و از کار افتادگی^۳ در قسمت‌های مختلف توربین شوند. بنابراین نیازمند مکانیزم کنترلی هستیم که بتواند عیب را در لحظات ابتدایی ظهورش در سیستم شناسایی^۴ کند و به جبران اثرات منفی عیب بپردازد. از آنجایی که استفاده از توربین‌های بادی در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است، بر روی

¹ Fault

² Failure

³ Downtime

⁴ Identification



شکل ۱-۱: توربین بادی ۱۲ کیلووات (ساخته شده به وسیله ی چارلز فرانسیس براش) [۲].

موضوعات مرتبط با توربین های بادی کارهای زیادی انجام گرفته است. در زمینه ی آشکارسازی عیوب^۱ و جداسازی^۲ آن ها مطالعات زیادی صورت گرفته و روش های متعددی ارائه شده است [۱]. همچنین برای جبران اثرات عیب، روش های سازش با عیب^۳ زیادی پیشنهاد شده اند.

۱-۱ پیشینه تحقیق

یک نمونه از توربین های بادی اولیه در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در [۳]، یک مدل معیار^۴ برای پیاده سازی و مقایسه ی روش های تشخیص و جداسازی عیب در توربین های بادی ارائه شده است. این مدل معیار، یک توربین بادی سه پره ی محور افقی با سرعت متغیر و توان مجاز $4/8$ مگاوات را که به کنترل گام^۵ (تغییر زاویه ی پره های توربین بادی حول محور طولی پره ها با اعمال فرامین کنترلی) نیز مجهز است، شبیه سازی می کند. هدف از ارائه ی این مدل، بوجود آوردن یک فضای مناسب برای مقایسه و آزمایش روش های مختلف تشخیص و جداسازی عیوب بر روی توربین است. از این مدل می توان برای مقایسه ی روش های سازش با عیب که در زمینه ی توربین بادی ارائه شده اند، استفاده کرد. تعداد زیادی از تحقیقاتی که در سال های گذشته در زمینه ی تشخیص و جداسازی عیب و همچنین سازش با عیب انجام گرفته است، طرح های پیشنهادی خود را بر روی این مدل آزمایش و مقایسه کرده اند.

¹ Fault Detection

² Fault Isolation

³ Fault Accomodation

⁴ Benchmark Model

⁵ Pitch Control

یکی از اجزای توربین بادی که در معرض عیب قرار دارد، محرک گام پره‌ی توربین می‌باشد. هر یک از پره‌های توربین بادی توسط یک محرک کنترل می‌شوند و با وقوع عیب در محرک گام هر پره، موقعیت گام آن پره با خطای زیادی مواجه می‌شود. برای حل این مساله، در [۴] یک روش جبران مبتنی بر تخصیص کنترل^۱ ارائه شده است. تخصیص کنترل، یکی از رایج‌ترین روش‌های کنترل انعطاف‌پذیر در برابر عیب است. در روش پیشنهادی، گشتاوری که بر اثر عیب یکی از محرک‌ها اتلاف می‌شود، توسط اعمال قانون کنترلی به دو محرک دیگر جبران می‌گردد و توان مطلوب توربین بادی قابل دستیابی است.

۱-۲ اهداف و دستاوردهای تحقیق

از آنجایی که کنترل‌کننده‌ی توربین بادی برای تعیین ناحیه‌ی کنترلی و اعمال دستورات کنترلی مناسب، از اطلاعات حاصل از حس‌گرها استفاده می‌کند؛ وقوع عیب در حس‌گرها می‌تواند سبب تغذیه‌ی اشتباه کنترل‌کننده‌ی توربین شود. در صورتی که کنترل‌کننده‌ی توربین از اطلاعات اشتباه حس‌گرها استفاده کند، دستورات کنترلی که به محرک‌ها اعمال می‌کند اشتباه خواهند بود. این امر سبب می‌شود تا با گذشت زمان، کل سیستم تحت تاثیر قرار گرفته و از حالت بدون عیب فاصله بگیرند.

در این تحقیق، طرحی پیشنهاد شده است که باعث جلوگیری از کاهش راندمان سیستم، در صورت وجود عیب در حس‌گرهای اطراف پیشرانه‌ی توربین بادی خواهد شد. در این تحقیق، تشخیص زمان و مکان وقوع عیب، شدت عیب و جداسازی عیب‌ها از یکدیگر به صورت آنلاین مورد بررسی قرار گرفته است. با فرض این که حس‌گرهای سرعت روتور و ژنراتور و همچنین گشتاور ژنراتور (حس‌گرهای اطراف پیشرانه‌ی توربین بادی) دچار عیب شوند، با مدل‌سازی مناسب پیشرانه، رویتگرهایی را برای تخمین حالت و تولید مانده طراحی کرده و با کمک این رویتگرها (که از نوع رویتگرهای ورودی ناشناخته هستند)، برای هر یک از حس‌گرها به طور جداگانه سیگنال آشکارسازی عیب تولید می‌کنیم.

آشکارسازی آنلاین و سازش با عیوب حس‌گر که در این تحقیق ارائه شده است، بر روی مدل معیار توربین بادی پیاده‌سازی شده و با روش‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی، بهبود عملکرد سیستم را در صورت بکارگیری روش پیشنهادی نشان خواهد داد.

¹ Control Allocation

۳-۱ ساختار گزارش

در فصل دوم به طور مختصر با تاریخچه‌ی انرژی باد آشنا خواهیم شد. همچنین نحوه‌ی عملکرد توربین بادی و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی توربین را نیز در این فصل بررسی خواهیم کرد. در پایان این فصل با انواع تقسیم‌بندی‌های توربین‌های بادی از نظر مکان نصب و نحوه‌ی اتصال به شبکه و قرارگیری روتور توربین به طور مختصر آشنا خواهیم شد.

در فصل پایانی به نتیجه‌گیری کارهای انجام شده در این تحقیق پرداخته خواهد شد و پیشنهاداتی برای تقویت و بهبود طرح پیشنهادی ارائه می‌شود.

فصل دوم

کنترل کننده بهینه \mathcal{H}_2

یک سیستم زمان پیوسته در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. این سیستم را به فرم استاندارد نیز می توان نمایش داد. در این فرم که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، سیگنال w ورودی های خارجی سیستم نظیر ورودی مرجع^۱، نویز و اختلال را شامل می شود. z سیگنالی است که قرار است کنترل شود و معمولاً خطای سیستم (اختلاف بین خروجی مطلوب و خروجی واقعی) است. y ورودی کنترل کننده و u نیز سیگنالی است که کنترل کننده آن را تولید می کند و به سیگنال کنترل معروف است. هم چنین در این فرم به دلیل این که سیستم G دو ورودی و دو خروجی دارد، می توان آن را به چهار بخش به صورت

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}$$

تقسیم کرد. در این صورت روابط

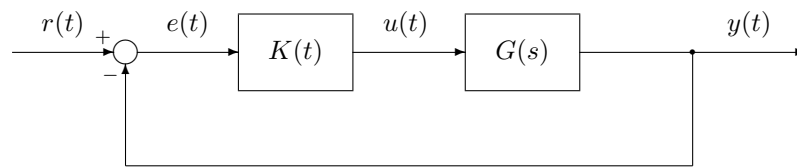
$$\begin{cases} z = G_{11}w + G_{12}u \\ y = G_{21}w + G_{22}u \end{cases}$$

بین ورودی ها و خروجی ها برقرار است.

کنترل کننده بهینه \mathcal{H}_2 ، یک کنترل کننده علی و مناسب^۲ است که سیستم را به طور داخلی پایدار کند و هم چنین

^۱Reference Input

^۲Proper



شکل ۱-۲: یک سیستم زمان پیوسته

به وسیله آن نرم \mathcal{H}_2 تابع تبدیل از z به w (T_{zw}) مینیمم شود. به طور معادل می توان گفت کنترل کننده ای است که نرم دو پاسخ ضربه سیگنال z را مینیمم کند [۶]. در صورتی که سیستم متغیر با زمان باشد، تابع تبدیل مفهومی ندارد و از پاسخ ضربه باید استفاده کرد.

۱-۲ کنترل کننده بهینه \mathcal{H}_2 برای سیستم های زمان پیوسته

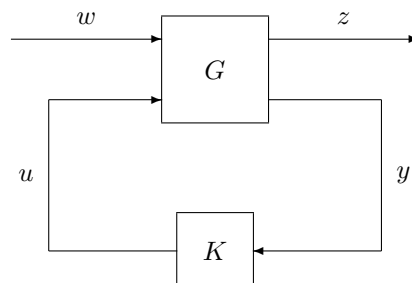
در این قسمت روش طراحی کنترل کننده بهینه \mathcal{H}_2 برای یک سیستم زمان پیوسته بیان می شود. بدین منظور ابتدا به تعریف نرم \mathcal{H}_2 برای سیستم های زمان پیوسته می پردازیم و پس از آن روش طراحی کنترل کننده را بیان می کنیم.

۱-۱-۲ تعریف نرم \mathcal{H}_2 برای سیستم های زمان پیوسته

برای یک سیستم خطی، تغییرناپذیر با زمان و پایدار G که زمان پیوسته و تک ورودی-تک خروجی است، نرم \mathcal{H}_2 به صورت

$$\|\hat{g}(s)\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{g}(j\omega)|^2 d\omega} \quad (1-2)$$

تعریف می شود. در این رابطه $\hat{g}(j\omega)$ پاسخ فرکانسی سیستم است. بر اساس خاصیت پارسوال^۱، نرم \mathcal{H}_2 یک سیستم پایدار، با نرم دو پاسخ ضربه آن برابر است. اگر $\hat{g}(s)$ تابع تبدیل یک سیستم زمان پیوسته پایدار و $G\delta(t)$



شکل ۲-۲: یک سیستم زمان پیوسته در فرم استاندارد

^۱Parseval

پاسخ ضربه آن باشد، آن گاه رابطه

$$\|\hat{g}(s)\|_2 = \|G\delta(t)\|_2 = \sqrt{\int_0^\infty |G\delta(t)|^2 dt} \quad (2-2)$$

برقرار است.

برای سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی روابط کمی پیچیده‌تر می‌شوند. فرض کنید سیستم G ، m ورودی و p خروجی داشته باشد. در این صورت ماتریس انتقال آن، p سطر و m ستون دارد. نرم \mathcal{H}_2 برای چنین سیستمی به صورت

$$\|\hat{g}(s)\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{trace} [\hat{g}^*(j\omega) \hat{g}(j\omega)] d\theta}$$

تعریف می‌شود. در این رابطه، $\hat{g}(s)$ ماتریس انتقال سیستم است. هم‌چنین طبق خاصیت پارسوال اگر سیستم پایدار باشد رابطه

$$\|\hat{g}(s)\|_2 = \sum_{i=1}^m \|G\delta(t)e_i\|_2 \quad (3-2)$$

نیز برای آن برقرار است. در این رابطه e_i بردارهای پایه استاندارد در فضای \mathbb{R}^m هستند. $\delta(t)e_i$ تابع ضربه‌ای است که به ورودی i ام اعمال شده و $G\delta(t)e_i$ خروجی مربوط به آن است.

در صورتی که سیستم پایدار باشد، می‌توان از فضای حالت سیستم نیز برای محاسبه نرم \mathcal{H}_2 استفاده کرد. فرض کنید معادلات فضای حالت یک سیستم پایدار به صورت

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

باشد که x بردار حالت سیستم، u بردار ورودی و y بردار خروجی است. A نیز یک ماتریس هرویتز^۱ است. هم‌چنین برای محدود بودن نرم \mathcal{H}_2 سیستم زمان‌پیوسته^۲، D باید صفر باشد. در این صورت برای محاسبه نرم \mathcal{H}_2 سیستم، می‌توان از روش زیر استفاده کرد [۵]:

۱. حل معادله لیاپانوف زمان‌پیوسته^۲ ($AL + LA^T + BB^T = 0$) و یافتن ماتریس نامعلوم L .

باید دقت شود که در صورت هرویتز بودن ماتریس A ، معادله لیاپانوف حل یکتا دارد.

۲. محاسبه نرم \mathcal{H}_2 از طریق رابطه $\|\hat{g}\|_2 = \sqrt{\text{trace}(CLC^T)}$.

^۱Hurwitz

^۲Continuous-time Lyapunov Equation

پیوست اول

تبدیل دوطبی

یکی از روش‌های گسسته‌سازی یک سیستم زمان‌پیوسته روش تبدیل دوطبی است. این روش که به روش توس‌تین^۱ نیز معروف است، یک روش انتگرال‌گیری عددی به کمک تقریب ذوزنقه‌ای است. سیستمی با ورودی $u(t)$ ، خروجی $y(t)$ و تابع تبدیل $\frac{1}{s}$ در نظر بگیرید. رابطه

$$y(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau \quad (1-\bar{A})$$

بین ورودی و خروجی سیستم برقرار است. با گسسته‌سازی \bar{A} -۱ به رابطه

$$y[(k+1)h] = y(kh) + \int_{kh}^{(k+1)h} u(\tau) d\tau \quad (2-\bar{A})$$

می‌رسیم. اگر از تقریب ذوزنقه‌ای برای محاسبه انتگرال استفاده کنیم، \bar{A} -۲ به صورت

$$y[(k+1)h] \simeq y(kh) + \frac{h}{2} (u(kh) + u[(k+1)h]) \quad (3-\bar{A})$$

در می‌آید. از رابطه تقریبی \bar{A} -۳ می‌توان برای تبدیل یک سیستم زمان‌پیوسته به یک سیستم زمان‌گسسته استفاده کرد.

^۱Tustin

سیستم زمان پیوسته خطی و تغییرناپذیر با زمان $G = (A, B, C, D)$ را در نظر بگیرید. اگر این سیستم را با

دوره تناوب h گسسته سازی کنیم، مدل فضای حالت $G_d = (A_d, B_d, C_d, D_d)$ به دست می آید که در آن

$$A_d = (I - \frac{h}{2}A)^{-1}(I + \frac{h}{2}A)$$

$$B_d = \frac{h}{2}(I - \frac{h}{2}A)^{-1}B$$

$$C_d = C(I + A_d)$$

$$D_d = D + CB_d$$

است.

مراجع

- [1] Isermann, R., *Fault Diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer, Berlin, 2006.
- [2] Shea, K., and Howard, B.C., *Build Your Own Small Wind Power System*, McGraw-Hill Professional, 2011.
- [3] Odgaard, P. F., Stoustrup, J., and Kinnaert, M., “Fault-tolerant control of wind turbines: A benchmark model”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 1168–1182, 2013.
- [4] Jiyeon, K., and Yang, I., “Control allocation based compensation for faulty blade actuator of wind turbine”, in *8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, pp. 355–360, 2012.
- [5] Zhou, K., and Doyle, J.C., *Essentials of Robust Control*, Prentice-Hall, 1998.
- [6] Hespanha, J.P., Naghshtabrizi, P., and Xu, Y., “A survey of recent results in networked control systems”, *IEEE Proceedings*, Vol. 95, No. 1, pp. 138-162, 2007.
- [۷] عالمی، ح، “اثر اغتشاش در سیستم‌های مخابراتی”، *استقلال*، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۵، صص ۳۴-۲۷، ۱۳۶۱.