

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بررسی راه‌های افزایش بهره‌وری در سیستم‌های با بهره‌وری پایین

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - کنترل

آذین آزاده

استاد راهنما

دکتر بهرام برزو



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق – کنترل خانم آذین آزاده
تحت عنوان

بررسی راه‌های افزایش بهره‌وری در سیستم‌های با بهره‌وری پایین

در تاریخ ۱۳۹۴/۱/۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

- | | |
|-------------------------------|--------------------|
| ۱ - استاد راهنمای پایان نامه | دکتر بهرام برزو |
| ۲ - استاد مشاور پایان نامه | دکتر پوریا پرنیانی |
| ۳ - استاد داور (اختیاری) | دکتر تهمتن ترابی |
| ۴ - استاد داور (اختیاری) | دکتر ثریا ثنایی |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر جمشید جهانگیر |

تشکر و قدردانی

پروردگار منّان را سپاسگزارم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق
موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه
صنعتی اصفهان است.

تقدیم به
پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
نه	فهرست تصاویر
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۳	۱-۱ پیشینه تحقیق
۴	۲-۱ اهداف و دستاوردهای تحقیق
۵	۳-۱ ساختار پایان نامه
۶	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
۹	پیوست اول: تبدیل دوخطی
۱۱	مراجع
۱۲	چکیده انگلیسی

فهرست تصاویر

- ۱-۱ توربین بادی ۱۲ کیلووات (ساخته شده به وسیله ی چارلز فرانسیس براش) [۲]. ۳
- ۱-۲ یک سیستم زمان پیوسته ۷
- ۲-۲ یک سیستم زمان پیوسته در فرم استاندارد ۷

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 رویتگرهای ورودی ناشناخته است. در این روش به کمک مدل سیستم، بانکی از رویتگرها 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 پایان‌نامه به تشخیص آنالاین عیوب حس‌گر سرعت روتور و ژنراتور و گشتاور ژنراتور توربین بادی با استفاده از بانک رویتگرها 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 در پایان‌نامه 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.

واژه‌های کلیدی: ۱- تشخیص عیب، ۲- کنترل انعطاف‌پذیر توربین بادی، ۳- سازش با عیوب، ۴- رویتگرهای 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.

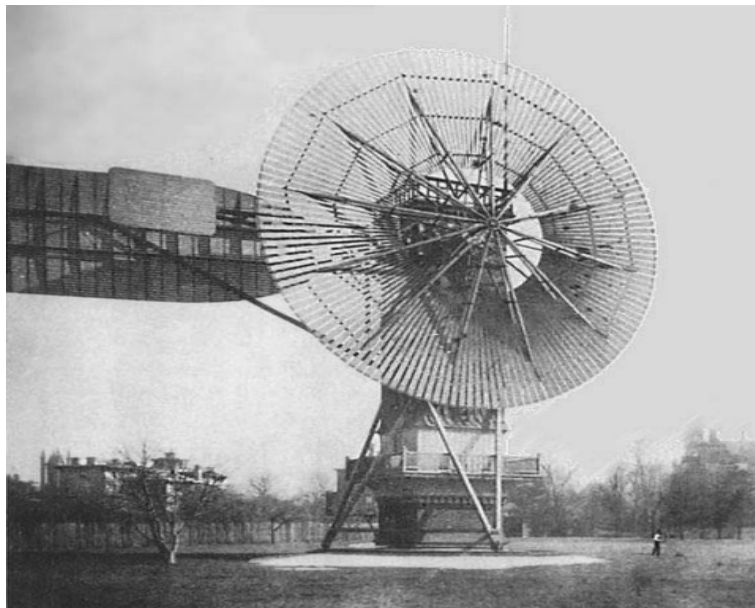
از طرف دیگر تشخیص نادرست و دیر هنگام این عیوب سبب می‌شود که عیوب در کل سیستم پخش شوند و حتی باعث خرابی^۲ و از کار افتادگی^۳ در قسمت‌های مختلف توربین شوند. بنابراین نیازمند مکانیزم کنترلی هستیم که بتواند عیب را در لحظات ابتدایی ظهورش در سیستم شناسایی^۴ کند و به جبران اثرات منفی عیب بپردازد. از آنجایی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

¹Fault

²Failure

³Downtime

⁴Identification



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 ۴/۸ 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.

¹Fault Detection

²Fault Isolation

³Fault Accomodation

⁴Benchmark Model

⁵Pitch 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 پایان‌نامه، 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 پایان‌نامه 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.

^۱Control Allocation

۱-۳ ساختار پایان نامه

در فصل دوم به طور مختصر با تاریخچه‌ی انرژی باد آشنا خواهیم شد. همچنین نحوه‌ی عملکرد توربین بادی و اجزای تشکیل دهنده‌ی 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 بیان نتایج پایان‌نامه و ارائه چند پیشنهاد پرداخته خواهد شد.

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

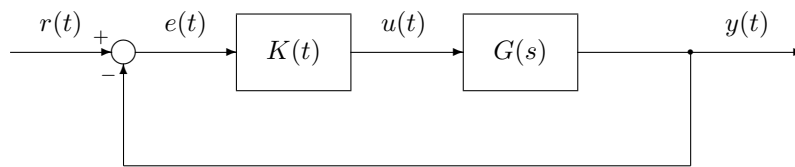
$$\begin{cases} z = G_{11}w + G_{12}u \\ y = G_{21}w + G_{22}u \end{cases}$$

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 ۲-۱: 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

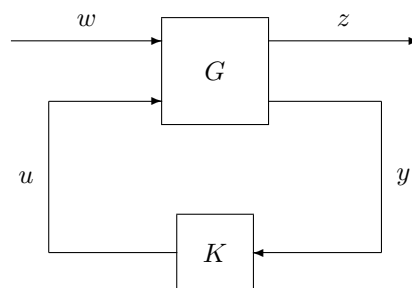
در این قسمت روش طراحی کنترل کننده بهینه \mathcal{H}_2 برای یک سیستم زمان پیوسته بیان می شود. بدین منظور ابتدا به تعریف نرم \mathcal{H}_2 برای سیستم های زمان پیوسته می پردازیم و پس از آن روش طراحی کنترل کننده را بیان می کنیم.

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

$$\|\hat{g}(s)\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{g}(j\omega)|^2 d\omega} \quad (۱-۲)$$

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

$$\|\hat{g}(s)\|_2 = \|G\delta(t)\|_2 = \sqrt{\int_0^\infty |G\delta(t)|^2 dt} \quad (۲-۲)$$

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

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

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

$$\|\hat{g}(s)\|_2 = \sum_{i=1}^m \|G\delta(t)e_i\|_2 \quad (۳-۲)$$

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 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 دوخطی

یکی از روش‌های گسسته‌سازی یک سیستم زمان‌پیوسته روش تبدیل دوخطی 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 $1-\bar{A}$ 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، $2-\bar{A}$ 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 $3-\bar{A}$ می‌توان برای تبدیل یک سیستم زمان‌پیوسته به یک سیستم زمان‌گسسته استفاده کرد.

¹Tustin

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 ۲۷-۳۴، ۱۳۶۱.

Increasing Efficiency in Low-Efficiency Systems

Azin Azadeh

azin.azadeh@ec.iut.ac.ir

March 21, 2015

Department of Electrical and Computer Engineering
Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

Degree: M.Sc.

Language: Farsi

Supervisor: Prof. Bahram Borzou (bahram.borzou@cc.iut.ac.ir)

Abstract

In most applications, because of numerous advantages it offers, digital technology (computer, PLC, microcontroller etc.) is used to control industrial plants. These types of systems, where the process under control is continuous-time but the controller is digitally implemented, are called sampled-data systems. Faults can occur in sampled-data systems like any other control system. In order to prevent performance degradation, physical damage or failure, faults should be promptly detected. In this thesis fault diagnosis in sampled-data systems is studied. The sampled-data design can be carried out using direct or indirect design approaches. Direct design, emphasized in this research, does not involve any approximations.

Normally, to design a robust fault detection and isolation (FDI) scheme, a performance index which is a measure of the sensitivity of the FDI to faults and its robustness to unknown inputs and disturbances is defined and optimized. Different performance indices based on norms are considered. Using the direct design approach and the so-called norm invariant transformation, it is shown that a sampled-data FDI problem can be converted to an equivalent discrete-time problem. This will form the foundation of a unifying framework for optimal sampled-data residual generator design.

Multirate systems are also abundant in industry. Here, several methods of residual generation based on multirate sampled data are developed. The key feature of such residual generators is that they operate at a fast rate for prompt fault detection. The lifting technique is used to convert the multirate problem into an equivalent single-rate discrete-time problem with causality constraints.

It is generally believed that the optimal multirate design performs better than the optimal slow-rate and worse than the optimal fast-rate designs. This conjecture is theoretically proved in this thesis for general multirate control systems with norms of the closed-loop system as performance indices. However, it is shown that the common performance indices in FDI design do not satisfy this property. To resolve this, an alternative performance index is defined after formulating the FDI problem as a standard control problem.

Key Words: Fault Detection, Wind Turbine Control, Fault Accommodation, Unknown Input Observers



Isfahan University of Technology

Department of Electrical and Computer Engineering

Increasing Efficiency in Low-Efficiency Systems

A Thesis

Submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Science

by

Azin Azadeh

Evaluated and Approved by the Thesis Committee, on March 21, 2015

1. Bahram Borzou, Prof. (Supervisor)
2. Poorya Parniani, Assoc. Prof. (Advisor)
3. Tahamtan Trabi, Prof. (Examiner)
4. Soraya Sanaei, Assist. Prof (Examiner)

Jamshid Jahangir, Department Graduate Coordinator

