



بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ



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 بروز



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:

دکتر بهرام بربزو

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر پوریا پرنیانی

۲- استاد مشاور پایان نامه

دکتر تهمتن ترابی

۳- استاد داور (اختیاری)

دکتر ثریا ثابی

۴- استاد داور (اختیاری)

دکتر جمشید جهانگیر

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

**تشکر و قدردانی**

پروردگار منان را سپاسگزارم .....

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

تقدیم به  
پدر و مادر عزیزم

# فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
	فهرست مطالب . . . . .
هشت	فهرست تصاویر . . . . .
نه	چکیده . . . . .
۱	
۲	<b>فصل اول : مقدمه</b>
۳	۱-۱ پیشنه تحقیق . . . . .
۴	۱-۲ اهداف و دستاوردهای تحقیق . . . . .
۵	۱-۳ ساختار پایان نامه . . . . .
۶	<b>فصل دوم : کنترل کننده بهینه <math>H_2</math></b>
۷	۱-۲ کنترل کننده بهینه $H_2$ برای سیستم های زمان پیوسته . . . . .
۷	۱-۱-۲ تعریف نرم $H_2$ برای سیستم های زمان پیوسته . . . . .
۹	<b>پیوست اول : تبدیل دوخطی</b>
۱۱	مراجع . . . . .
۱۲	چکیده انگلیسی . . . . .

## فهرست تصاویر

- ۱-۱ توربین بادی ۱۲ کیلووات (ساخته شده به وسیله‌ی چارلز فرانسیس براش) [۲].  
۳
- ۱-۲ یک سیستم زمان‌پیوسته . . . . .  
۷
- ۲-۲ یک سیستم زمان‌پیوسته 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 الکتروموکانیکی پیچیده‌ای هستند که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و از این رو بخش‌های مختلف توربین‌های بادی در معرض عیوب‌های مختلفی قرار می‌گیرند. از آنجایی که زیرسیستم‌های مختلف توربین بادی با یکدیگر در ارتباط هستند، با ظهور عیوب در یک زیرسیستم توربین بادی، امکان پخش شدن و اثرگذاری آن عیوب در کل سیستم وجود دارد. از این رو برای جلوگیری و کاهش هزینه‌های ناشی از وقوع عیوب در سیستم، نیازمند مکانیزمی هستیم که عیوب را در لحظات ابتدایی وقوع در سیستم شناسایی کرده و به رفع اثر آن بپردازد. روش‌های تشخیص و جداسازی عیوب 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 رویتگرها 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 می‌افتد پس از زمانی محدود شناسایی می‌شوند. در این پایان‌نامه به تشخیص آنلاین 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 عیوب باید از مکانیزمی جهت رفع اثرات منفی ناشی از ظهور عیوب در سیستم استفاده شود. این عمل از طریق کنترل کننده‌ی طراحی شده در پایان‌نامه انجام می‌شود. در واقع پس از تشخیص عیوب، با استفاده از سیگنال آشکارسازی عیوب و تخمین حالات، پارامترهای کنترل کننده طوری تغییر داده می‌شوند که اثرات منفی ناشی از ظهور عیوب در سیستم جبران شود.

**واژه‌های کلیدی:** ۱- تشخیص عیوب، ۲- کنترل انعطاف‌پذیر توربین بادی، ۳- سازش با عیوب، ۴- رویتگرها 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<sup>۱</sup> متنوعی در قسمت‌های مختلف همچون سیستم‌ها، محرک‌ها و حسگرهای قرار می‌گیرند.

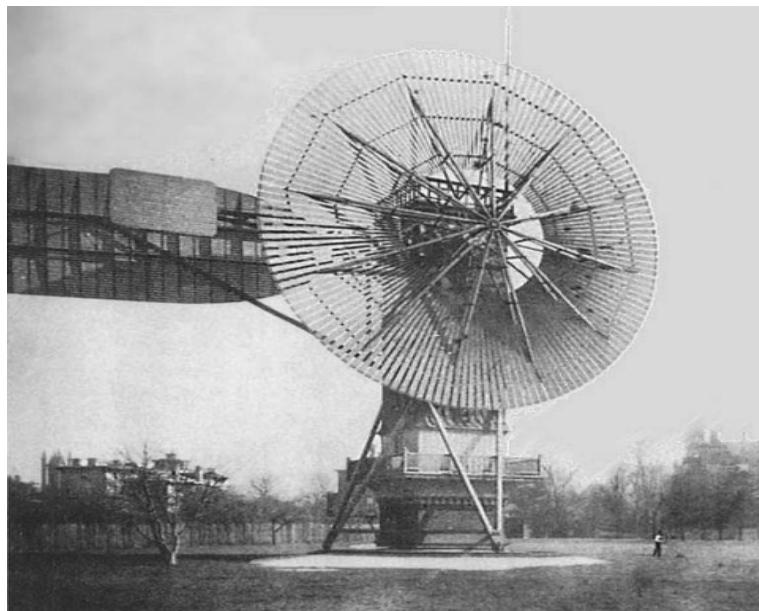
از طرف دیگر تشخیص نادرست و دیرهنگام این عیوب سبب می‌شود که عیوب در کل سیستم پخش شوند و حتی باعث خرابی<sup>۲</sup> و از کارافتادگی<sup>۳</sup> در قسمت‌های مختلف توربین شوند. بنابراین نیازمند مکانیزم کنترلی هستیم که بتواند عیوب را در لحظات ابتدایی ظهورش در سیستم شناسایی<sup>۴</sup> کند و به جبران اثرات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

<sup>1</sup>Fault

<sup>2</sup>Failure

<sup>3</sup>Downtime

<sup>4</sup>Identification



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

موضوعات مرتبط با توربین‌های بادی کارهای زیادی انجام گرفته است. در زمینه‌ی آشکارسازی عیوب<sup>۱</sup> و جداسازی<sup>۲</sup> آن‌ها مطالعات زیادی صورت گرفته و روش‌های متعددی ارائه شده است [۱]. همچنین برای جبران اثرات عیوب، روش‌های سازش با عیوب<sup>۳</sup> زیادی پیشنهاد شده‌اند.

### ۱ - ۱ پیشینه تحقیق

یک نمونه از توربین‌های بادی اولیه در شکل ۱ - ۱ نشان داده شده است. در [۳]، یک مدل معیار<sup>۴</sup> برای پیاده‌سازی و مقایسه‌ی روش‌های تشخیص و جداسازی عیوب در توربین‌های بادی ارائه شده است. این مدل معیار، یک توربین بادی سه پرهی محور افقی با سرعت متغیر و توان مجاز ۴/۸ مگاوات را که به کنترل گام<sup>۵</sup> (تغییر زاویه‌ی پره‌ها) حول محور طولی پره‌ها با اعمال فرامین کنترلی) نیز مجهز است، شبیه‌سازی می‌کند. هدف از ارائه‌ی این مدل، بوجود آوردن یک فضای مناسب برای مقایسه و آزمایش روش‌های مختلف تشخیص و جداسازی عیوب بر روی توربین است. از این مدل می‌توان برای مقایسه‌ی روش‌های سازش با عیوب که در زمینه‌ی توربین بادی ارائه شده‌اند، استفاده کرد. تعداد زیادی از تحقیقاتی که در سال‌های گذشته در زمینه‌ی تشخیص و جداسازی عیوب و همچنین سازش با عیوب انجام گرفته است، طرح‌های پیشنهادی خود را بر روی این مدل آزمایش و مقایسه کرده‌اند.

<sup>1</sup>Fault Detection

<sup>2</sup>Fault Isolation

<sup>3</sup>Fault Accommodation

<sup>4</sup>Benchmark Model

<sup>5</sup>Pitch Control

یکی از اجزای توربین بادی که در معرض عیب قرار دارد، محرک گام پرهی توربین می‌باشد. هر یک از پرهای 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<sup>۱</sup> 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.

## ۱-۲-۱ 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 خواهد 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 حسگرها 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 (حسگرها 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.

---

<sup>۱</sup>Control 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 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 بیان نتایج پایان نامه و ارائه چند پیشنهاد پرداخته خواهد شد.

## فصل دوم

### کنترل کننده بهینه $\mathcal{H}_2$

یک سیستم زمان‌پیوسته در شکل ۲ - ۱ نشان داده شده است. این سیستم را به فرم استاندارد نیز می‌توان نمایش داد. در این فرم که در شکل ۲ - ۲ نشان داده شده است، سیگنال  $w$  ورودی‌های خارجی سیستم نظیر ورودی مرجع<sup>۱</sup>، نویز و اختلال را شامل می‌شود.  $z$  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 می‌کند و به سیگنال کنترل معروف است. همچنین در این فرم به دلیل این‌که سیستم  $G$  دو ورودی و دو خروجی دارد، می‌توان 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

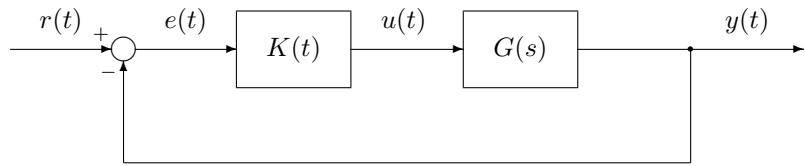
$$\begin{cases} z = G_{11}w + G_{12}u \\ y = G_{21}w + G_{22}u \end{cases}$$

بین ورودی‌ها و خروجی‌ها برقرار است.

کنترل کننده بهینه  $\mathcal{H}_2$ ، یک کنترل کننده علی و مناسب<sup>۲</sup> است که سیستم را به طور داخلی پایدار کند و همچنین

<sup>1</sup> Reference Input

<sup>2</sup> Proper



شکل ۱-۲: یک سیستم زمان‌پیوسته

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

## ۲-۱ کنترل کننده بهینه $\mathcal{H}_2$ برای سیستم‌های زمان‌پیوسته

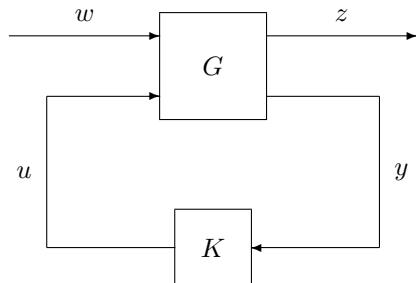
در این قسمت روش طراحی کنترل کننده بهینه  $\mathcal{H}_2$  برای یک سیستم زمان‌پیوسته بیان می‌شود. بدین منظور ابتدا به تعریف نرم  $\mathcal{H}_2$  برای سیستم‌های زمان‌پیوسته می‌پردازیم و پس از آن روش طراحی کنترل کننده را بیان می‌کنیم.

### ۲-۱-۱ تعریف نرم $\mathcal{H}_2$ برای سیستم‌های زمان‌پیوسته

برای یک سیستم خطی، تغییرناپذیر با زمان و پایدار  $G$  که زمان‌پیوسته 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 می‌شود. در این رابطه  $(j\omega)\hat{g}$  پاسخ فرکانسی سیستم است. بر اساس خاصیت پارسوال<sup>۱</sup>، نرم  $\mathcal{H}_2$  یک سیستم پایدار، با نرم دو پاسخ ضربه آن برابر است. اگر  $(j\omega)\hat{g}$  تابع تبدیل یک سیستم زمان‌پیوسته پایدار و  $G\delta(t)$



شکل ۲-۲: یک سیستم زمان‌پیوسته در فرم استاندارد

<sup>۱</sup>Parseval

پاسخ ضربه آن باشد، آنگاه 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

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

تعريف می‌شود. در این رابطه،  $(s)\hat{g}$  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  $e_i$ ‌ها 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<sup>۱</sup> است. همچنین برای محدود بودن نرم  $\mathcal{H}_2$  سیستم زمان‌پیوسته،  $D$  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<sup>۲</sup> ( $AL + LA^T + BB^T = 0$ ) 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

<sup>1</sup>Hurwitz

<sup>2</sup>Continuous-time Lyapunov Equation

## پیوست اول

### تبدیل دوخطی

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

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

بین ورودی و خروجی سیستم برقرار است. با گسسته‌سازی آ-۱ به رابطه

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

می‌رسیم. اگر از تقریب ذوزنقه‌ای برای محاسبه انتگرال استفاده کنیم، آ-۲ به صورت

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

در می‌آید. از رابطه تقریبی آ-۳ می‌توان برای تبدیل یک سیستم زمان‌پیوسته به یک سیستم زمان‌گسسته استفاده کرد.

---

<sup>1</sup>Tustin

سیستم زمان‌پیوسته خطی و تغییرناپذیر با زمان  $G = (A, B, C, D)$  را در نظر بگیرید. اگر این سیستم را با دوره تناوب  $h$  گسسته‌سازی کنیم، مدل فضای حالت  $G_d = (A_d, B_d, C_d, D_d)$  به دست می‌آید که در آن

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

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

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

$$D_d = D + CB_d$$

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.
- [7] عالمی، ح، ”اثر اغتشاش در سیستم‌های مخابراتی“، استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۵، ۱۳۶۱، ۳۴-۲۷ صص.

# 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](mailto: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

