دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق- کنترل

کنترل جایگزین‌پذیر مقاوم در برابر عیب در توربین بادی

به کوشش

امیر دالوند

استاد راهنما

دکتر علیرضا خیاطیان

شهریور ۱۳۹۳

بسم الله الرحمن الرحيم

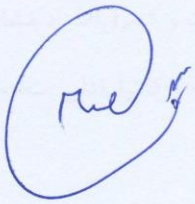
به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب امیر دالوند (۹۰۱۲۲۵) دانشجوی رشته‌ی مهندسی برق گرایش کنترل دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر بیان می‌دارم که این پایان‌نامه حاصل پژوهش خودم بوده و درجاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهار می‌کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه‌ام تکراری نیست و تعهد می‌نمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آیین نامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی : امیردالوند

تاریخ و امضا: ۹۳/۷/۹



به نام خدا

کنترل جایگزین پذیر مقاوم در برابر عیب در توربین‌های بادی

به کوشش:

امیر دالوند

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای

اخذ درجه

کارشناسی ارشد

در رشته:

مهندسی برق – کنترل

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه خیلی خوب:

دکتر علیرضا خیاطیان دانشیار بخش قدرت و کنترل(استاد راهنما).....

دکتر سید علی اکبر صفوی استاد بخش قدرت و کنترل(استاد مشاور).....

دکتر فریدون شعبانی نیا دانشیار بخش قدرت و کنترل(داور متخصص داخلی).....

شهریور۹۳

تقدیم به

روح پدرم و مادر مهربانم

تو مگو ما را بدان شه، بار نیست

با کریمان کارها دشوار نیست

سپاسگزاری

اکنون‌که به یاری خداوند این رساله به پایان رسیده است. بر خود لازم می‌دانم از تلاش‌های بی‌کران استاد گرامی جناب آقای **دکتر علیرضا خیاطیان** که راهنمایی‌های ایشان همواره راهگشای من بوده سپاسگزاری کنم. همچنین از استاد ارجمند جناب آقای **دکتر سید علی‌اکبر صفوی** که زحمت مشاوره این پایان‌نامه بر عهده ایشان بوده است و جناب آقای **دکترفریدون شعبانی نیا** که زحمت داوری این اثر را برعهده‌گرفته‌اند کمال تشکر را دارم. در پایان از زحمات خانواده خوبم و سایر کسانی که در تدوین این پایان نامه مرا یاری نمودند متشکرم و از خداوند منان سلامت و سعادت ایشان را خواستارم.

چکیده

کنترل جایگزین‌پذیرمقاوم در برابر عیب در توربین بادی

به کوشش

امیر دالوند

به دلیل اینکه توربین‌های بادی در مناطق دور نصب می‌شوند، روش کنترل مقاوم در برابر عیب و تشخیص عیب یک راه مناسب افزایش اطمینان از عملکرد آنها و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. در این پایان‌نامه به کنترل مقاوم در برابر عیب در توربین‌های بادی می‌پردازیم. مدلی که استفاده شده است مدل یک توربین بادی ۴/۸ مگاواتی سرعت-متغیر زاویه-متغیر (زاویه چرخش تیغه) می‌باشد. سناریوی عیب به دو صورت تعریف می‌شود:۱) تغییر مقدار هوا در روغن هیدرولیک عملگر تغییر زاویه پیچش تیغه که توسط تغییر پارامترهای سیستم مدل می‌شود (منشأ عیب معلوم است).۲) تغییر تأثیر عملکرد عملگر سیستم که توسط ضریبی در ورودی کنترل مدل می‌شود(منشأ عیب معلوم نیست). در هر دو صورت مدل غیرخطی سیستم بعد از خطی سازی در نقاط کار آن(بر اساس سرعت باد) و تقریب خطی به صورت یک مدل خطی با پارامتر متغیر[1] بدست می‌آید. برای مقابله با عیب از نوع اول که دینامیک سیستم را از طریق تغییر پارامترهای سیستم تغییر می‌دهد از تخمین پارامتر توسط فیلتر کالمن توسعه یافته و کنترلر LPV استفاده می‌شود. برای مقابله با عیب از نوع دوم از روش کنترل تأخیر زمان استفاده می‌شود اینطور که عدم قطعیتی که توسط عیب در سیستم ایجاد می‌شود تخمین زده می‌شود و این عدم قطعیت توسط کنترلر در کنترل سیستم در نظر گرفته می‌شود. عملکرد هردو روش با کنترلر PI و کنترلر معکوس به وسیله شبیه سازی در محیط نرم افزار متلب مقایسه شده است و نشان می‌دهد که هردو کنترلر در برابر عیب با حذف نوسانات حاصل از عیب در خروجی سرعت ژنراتور و توان ژنراتور به خوبی عمل کرده است.

واژگان کلیدی: **توربین های بادی، عیب عملگر، سرعت ژنراتور، کنترلر با پارامتر خطی متغیر، کنترلر تأخیرزمان**

[1] Linear parameter varying(LPV)

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- انرژی باد و توربینهای بادی ۲

۱-۲- کنترل سیستم تولید انرژی باد ۲

۱-۲-۱- تکنیکهای جدول بندی بهره..... ۴

۱-۲-۲- کنترل مقاوم سیستم توربین بادی..... ۴

۱-۳- کنترل مقاوم در برابر عیب ۵

۱-۳-۱- کنترل مقاوم در برابر عیب در توربینهای بادی..... ۶

۱-۳-۲- تاریخچه کنترل مقاوم در برابر عیب در توربین بادی..... ۷

۱-۴- هدف پایان نامه ۸

۱-۵- گفتارهای پایان نامه ۸

فصل ۲- توربین‌های بادی و مدل‌سازی آنها

۲-۱- دسته بندی توربین های بادی و ساختمان یک توربین بادی ۱۰

۲-۱-۱- ساختمان توربین بادی..... ۱۰

۲-۲- استراتژی کنترل ۱۲

۲-۳- مدل توربین بادی ۱۵

۲-۳-۱- مدل باد..... ۱۶۱۶

۲-۳-۲- مدل آیرودینامیک..... ۱۷

۲-۳-۳- مدل انتقال قدرت..... ۱۹

۲-۳-۴- مدل زاویه پیچش تیغه ها..... ۲۰

۲-۴- راستی آزمایی مدل در حضور کنترلر PI ۲۱

۲-۵- جمع بندی..... ۲۶

فصل ۳- سیستم‌های کنترلر مقاوم در برابر عیب

۳-۱- عیب و روشهای مقاومت در برابر آن ۲۹

۳-۲- تخمین دینامیک سیستم تغییر زاویه ۳۵

۳-۳- کنترل تأخیرزمان ۴۱

۳-۳-۱- قانون کنترل تأخیرزمان..... ۴۲

۳-۳-۲- کنترل تأخیرزمان مقاوم در برابر عیب..... ۴۴

۳-۴- جمع بندی ۴۶

فصل ۴- کنترلر خطی با پارامتر متغیر مقاوم در برابر عیب در توربین بادی

۴-۱- کنترلر فعال مقاوم در برابر عیب ۴۹
۴-۱-۱- حالت معمولی ۴۹
۴-۱-۲- حالت Affine ۵۱
۴-۲- سنتز کنترلر LPV فعال مقاوم در برابر عیب ۵۲
۴-۳- کنترل LPV مقاوم در برابر عیب در توربین باد ۵۴
۴-۳-۱ شبیه سازی ۵۹
۴-۴- جمع بندی ۶۴

فصل ۵- کنترل تأخیرزمان توربین بادی مقاوم در برابر عیب عملگر

۵-۱- کنترلر معکوس ۶۶
۵-۲- کنترلر تأخیرزمان ۶۸
۵-۳- جمع بندی ۷۴

فصل ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری ۷۶
۶-۲- پیشنهادات ۷۷

فهرست شکل ها

صفحه

شکل ۲-۱- ساختار یک توربین بادی [۲۳] ۱۳

شکل ۲-۲- ناحیه های تولید انرژی توسط توربین بر اساس سرعت باد[۲۳] ۱۴

شکل ۲-۳- نمودار توان بر حسب سرعت روتور برای سرعتهای متفاوت باد[۱] ۱۴

شکل ۲-۴- نمودار استراتژی کنترل توربین در دوناحیه کاری[۲۳] ۱۵

شکل ۲-۵- بلوک دیاگرام کنترل دو وضعیتی یک توربین بادی[۲۳] ۱۶

شکل ۲-۶- زیر سیستم های کنترل یک توربین بادی[۲۳] ۱۷

شکل ۲-۷- ضریب جذب توان روتور بر اساس زاویه تیغه و **TSR** [۲۳] ۱۹

شکل ۲-۸- دیاگرام معادل برای مدل سازی قسمت انتقال قدرت توربین بادی[۲۳] ۲۰

شکل ۲-۹- دیاگرام سخت افزاری کنترل زاویه پیچش تیغه توربین بادی[۲۳] ۲۱

شکل ۲-۱۰- مقدار زاویه تیغه توربین بر اساس سرعت باد[۲۴] ۲۲

شکل ۲-۱۱- خروجی سرعت ژنراتور با اعمال کنترلر **PI** ۲۴

شکل ۲-۱۲- سیگنال باد اعمال شده به مدل برای راستی آزمایی با کنترلر **PI** ۲۴

شکل ۲-۱۳- سرعت ژنراتور حاصل از کنترلر **PI** گسسته شبیه سازی شده با **Simulink** ۲۵

شکل ۲-۱۴- نمودار تغییرات زاویه تیغه جهت کنترل سرعت ژنراتور توسط کنترلر **PI** گسسته شبیه سازی شده با **Simulink** ۲۵

شکل ۲-۱۵- نمودار سرعت ژنراتور با کنترلر **PI** شبیه سازی شده در مقاله[۲۴] ۲۵

شکل ۲-۱۶- نمودار تغییر زاویه تیغه حاصل از کنترل با کنترلر **PI** شبیه سازی شده در مقاله[۲۴] ۲۶

شکل ۳-۱- بلوک دیاگرام یک سیستم کنترل مقاوم در برابر خطا از نوع غیر فعال[۲۶] ۳۰

شکل ۳-۲- بلوک دیاگرام یک سیستم کنترل مقاوم در برابر خطا از نوع فعال[۲۶] ۳۰

شکل ۳-۳- دیاگرام طبقه بندی و روش های موجود اجرای واحد FDD [۱۱] ۳۱
شکل ۳-۴- طبقه بندی روشهای FDD بر پایه چهار حالت متداول ۳۳
شکل ۳-۵- طبقه بندی کلی روشهای موجود FTC [۱۱] ۳۵
شکل ۴-۱- بلوک دیاگرام سیستم کنترل LPV مقاوم در برابر عیب ۵۴
شکل ۴-۲- منحنی $\partial T_a / \partial \beta$ بر حسب سرعت باد (m/s) و تقریب خطی آن ۵۶
شکل ۴-۳- منحنی $\partial T_a / \partial \omega_r$ برحسب سرعت باد(m/s) و تقریب خطی آن ۵۶
شکل ۴-۴- منحنی $\partial T_a / \partial V_r$ برحسب سرعت باد(m/s) و تقریب خطی آن ۵۶
شکل ۴-۵- تقریب affine تغییرات پارامتر سیستم تغییر زاویه نسبت به ω_n^2. خطوط بریده تقریب مورد نظر میباشد ۵۷
شکل ۴-۶- سیگنال باد استفاده شده برای شبیه سازی با کنترلر LPV ۶۰
شکل ۴-۷- سیگنال سرعت ژنراتور حاصل از کنترلر LPV هنگامی که سیستم سالم میباشد. ۶۰
شکل ۴-۸- سیگنال عیب از نوع *آنی* برای شبیه سازی با کنترلر LPV ۶۱
شکل ۴-۹- سیگنال سرعت ژنراتور حاصل از کنترلر LPV با عیب از نوع *آنی* ۶۱
شکل ۴-۱۰- سیگنال عیب از نوع *مدتی* برای شبیه سازی با کنترلر LPV ۶۱
شکل ۴-۱۱- سیگنال سرعت ژنراتور حاصل از کنترلر LPV با عیب از نوع *مدتی* ۶۲
شکل ۴-۱۲- سیگنال عیب از نوع *متناوب* برای شبیه سازی با کنترلر LPV ۶۲
شکل ۴-۱۳- سیگنال سرعت ژنراتور حاصل از کنترلر LPV با عیب از نوع *متناوب* ۶۲
شکل ۴-۱۴- سیگنال عیب تزریقی برای مقایسه کنترلر PI و LPV هنگام رخداد عیب ۶۳
شکل ۴-۱۵- سیگنال خروجی سرعت ژنراتور حاصل از کنترلرهای LPV و PI هنگام رخداد عیب ۶۳
شکل ۵-۱- سیگنال باد برای شبیه سازی با کنترلر معکوس و کنترلرتأخیر زمان ۷۰
شکل ۵-۲- سیگنال عیب ضربشونده و جمع شونده برای شبیه سازی با کنترلر ۷۰
شکل ۵-۳- خروجی سرعت ژنراتور با کنترلر معکوس و تأخیر زمان هنگامی ۷۱

شکل ۵-۴- توان خروجی ژنراتور با هردو کنترلر معکوس و تأخیر زمان هنگامی..... ۷۱

شکل ۵-۵- خروجی سرعت ژنراتور با کنترلر معکوس در دو حالت سیستم معیوب و سالم..... ۷۲

شکل ۵-۶- خروجی توان ژنراتور با کنترلر معکوس در دو حالت سیستم معیوب و سالم ۷۲

شکل ۵-۷- خروجی سرعت ژنراتور در حالت سیستم معیوب با هر دو کنترلر..... ۷۲

شکل ۵-۸- خروجی توان ژنراتور در حالت سیستم معیوب با هر دو کنترلر معکوس ۷۳

شکل ۵-۹- خروجی سرعت ژنراتور در حالت سیستم معیوب و سالم با کنترلرتأخیر زمان..... ۷۳

شکل ۵-۱۰- سیگنال کنترل حاصل از هردو کنترلر در حالت سیستم سالم ۷۳

شکل ۵-۱۱- سیگنال کنترل حاصل از هر دو کنترلر هنگامی که سیستم معیوب است..... ۷۴

فهرست جدول‌ها صفحه

جدول ۳-۱- مقادیر پارامترهای سیستم تغییر زاویه در هنگام بروز عیبهای احتمالی..... ۳۶
جدول ۴-۱- انتخابهای ممکن برای ماتریسهای X ,Y و ماتریسهای مناسب M , N ۵۳

فصل ۱-

مقدمه

مقدمه

۱-۱-انرژی باد و توربین‌های بادی

از زمان‌های قدیم از انرژی باد استفاده‌های گوناگونی شده است که عمده آنها برای پمپ کردن آب و آسیاب کردن بوده است. با روند رو به رشد صنعتی شدن دنیا، انرژی باد جایگزین سوخت‌های فسیلی شد. در قرن بیستم طراحی‌های جدید تولید انرژی در مقیاس-های کوچک را برای شارژ باتری ممکن ساخت. بعد از سال ۱۹۷۰ تکنولوژی باد انقلابی را تجربه کرد که دلیل آن گران شدن نفت بود. در نتیجه توربین‌های بادی مدرن توسعه داده شد که شروع تولید انرژی الکتریکی به وسیله توربین باد در مقیاس بزرگ بود. در دهه‌های اخیر رشد نگرانی‌های مربوط به محیط زیست و جهت‌گیری های مختلف بازار انرژی سلیقه-ها را به سمت به کارگیری انرژی باد هدایت نموده است.

امروزه سرعت رشد استفاده از انرژی باد از سایر انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار بیشتر است. اینطور که در قاره اروپا رشد استفاده از انرژی بادی سالانه بیشتر از ۳۰ درصد می‌باشد[۱]. از سال ۱۹۸۰به بعد هزینه استفاده از انرژی باد به خاطر پیشرفت تکنولوژی و تولید در مقیاس بزرگ کاهش یافت و توربین‌ها با بازده و قابلیت اطمینان بیشتری تولید شدند[۲].

۱-۲- کنترل سیستم تولید انرژی باد

علم کنترل در سیستم‌های تولید انرژی باد نقش مهمی بازی می‌کند. در واقع کنترل توربین باد استفاده از یک توربین باد را به دلیل حذف بار[1]های مکانیکی و آیرودینامیکی بهبود می‌دهد. به علاوه با امکان تولید در مقیاس بزرگ که خروجی توان در نرخ نیروگاه‌های مرسوم قرار دارد کنترل توان برای کاهش تأثیر معکوس روی شبکه در اثر اتصال توربین به شبکه نیاز می‌باشد که این خود تأثیر بر قیمت انرژی باد می‌گذارد. همچنین عملکرد مطلوب بالا و اطمینان از عملکرد کنترلرها برای رقابت تکنولوژی در توربین بادی لازم می-باشد. سیستم تبدیل انرژی باد[2] باید با تغییرات سرعت و فصلی باد سازگار باشد. به همین

[1] Load
[2] Wind energy conversion system(WECS)

علت این سیستم‌ها دارای مکانیزمی برای محدود کردن توان حاصل از باد در سرعت‌های بالا به منظور جلوگیری از اضافه بار[1] می‌باشند. یکی از روش‌های این عمل کاهش نیروی گرفته شده از باد توسط تیغه‌ها می‌باشد. اینطور که توربین از تغییر زاویه تیغه توسط یک سیستم الکترومکانیکی یا هیدرولیکی بهره می‌برد. این روش، روش بر پایه کنترل زاویه پیچش[2] می‌باشد.

در گذشته ژنراتور سیستم تبدیل انرژی بادی که به طور مستقیم به شبکه وصل می‌شد بیشتر مورد استفاده قرار می‌گرفت. در این نوع سیستم‌ها سرعت چرخشی به وسیله فرکانس شبکه تعیین میگردد و اگرچه قابل اطمینان و کم هزینه می‌باشد، تطبیق این ساختار سرعت ثابت به تغییرات سرعت باد مشکل می‌باشد. در واقع چون ماکزیمم توان در نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد[3] بهینه بدست می‌آید سیستم سرعت-ثابت فقط در یک سرعت باد با بازده بهینه کار می‌کند. برای استفاده بهتر از توربین، سیستم با سرعت متغیر توسعه داده شد. این سیستم‌ها شامل کانورتور[4]های رابط بین ژنراتور و شبکه برق می‌باشند که فرکانس شبکه را از سرعت چرخش جدا[5] می‌کند. این سیستم‌ها همچنین دارای کنترل سرعت به منظور دنبال کردن TSR بهینه تا سرعت خاصی از باد می‌باشند. به علاوه کانورتورها طوری قابل کنترل هستند که می‌توانند بر اساس نیاز شبکه تولیدکننده و یا مصرف کننده توان راکتیو باشند[۳].

اخیرا به دلیل بزرگی توربین‌ها و کیفیت توان درخواستی ساختارهای کنترل فعال مطلوب می‌باشد. از طرفی سیستم‌های سرعت متغیر نه تنها به خاطر جذب انرژی بیشتر بلکه به دلیل انعطاف‌پذیری آنها در بهبود کیفیت توان و کم کردن بار روی سیستم انتقال قدرت، بهتر می‌باشند. همچنین علاقه به ساختار با کنترل تیغه در توربین‌های با سایز بزرگ به دلیل نگرانی از استرس‌های مکانیکی که با سایز توربین نسبت مستقیم دارد بیشتر شده است. بنابراین توربین‌های سرعت-متغیر[6] و زاویه تیغه-متغیر[7] در توان‌های متوسط تا بزرگ امروزه ترجیح داده می‌شود. لازم به ذکر است که مزیت‌های کنترلی آن‌ها(مثل کیفیت توان بهتر، بازده تبدیل انرژی و عمر بیشتر) سبب پیچیدگی سیستم و سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر در توربین‌های سرعت-متغیر زاویه تیغه-متغیر شده است[۱].

---

[1] Overload
[2] Pitch control
[3] Tip speed ratio(TSR)
[4] Convertor
[5] Decouple
[6] Variable speed
[7] Variable pitch

۱-۲-۱- تکنیک‌های جدول بندی بهره

در تکنیک کلاسیک جدول‌بندی بهره سیستم غیرخطی یا متغیر با زمان حول نقطه‌های کار خطی می‌شود و کنترلر خطی برای هر نقطه کار طراحی می‌گردد. سپس کنترلر جدول-بندی بهره از یک خانواده کنترلر خطی به وسیله الگوریتم‌های سوییچینگ یا درون‌یابی به دست می‌آید. تکنیک‌های جدول‌بندی بهره به صورت وسیعی استفاده شده است و در کاربردهای زیادی می‌توان آنها را مشاهده کرد.(برای مثال به مرجع[۴] رجوع شود)

ذکر این نکته که پایداری، مقاوم بودن و عملکرد سیستم با کنترلر جدول بندی بهره را نمی‌توان از خواص فیدبک یک خانواده از سیستم‌های کنترل LTI با دقت بررسی نمود.

در سال ۱۹۹۰ شاما[1] و آتانس[2] [۵] سیستم‌های با تغییر خطی پارامتر[3] را معرفی کردند. مدل‌های LPV معمولا از طریق نوعی بازنویسی خطی فرمول‌های غیرخطی یا متغیر با زمان بدست می‌آیند که دینامیک آنها وابسته به یک بردار پارامتر متغیر با زمان با منشأ خارجی است. ایده سیستم‌های LPV سنتز کنترلر جدول‌بندی بهره را ساده کرد. اینطور که طراحی به مسأله بهینه‌سازی محدب[4] با نامساوی ماتریسی خطی[5] تبدیل می‌شود[۶-۹]. این بهینه‌سازی با وجود روش‌های مؤثر عددی در حل گستره‌ی وسیعی از مسائل کنترلی کارآمد می‌باشد[۱]. در بسیاری از حالات طراحی کنترلر روندی مشابه طراحی کنترلر H_∞ دارد با این تفاوت که کنترلر وابسته به پارامتر برنامه‌ریزی می‌باشد.

۱-۲-۲-کنترل مقاوم سیستم توربین بادی

مسأله کلیدی دیگر در طراحی کنترل توربین بادی مقاوم بودن است. توربین‌های بادی سیستم‌های با پیچیدگی بسیار می‌باشند که در یک میدان بادی با سه بعد قرار می‌گیرند. علاوه بر این، نیروهای آیرودینامیکی حاصل از انرژی باد که به روتور منتقل می‌شوند بسیار غیرخطی می‌باشند. این ماهیت غیرخطی منجر به تغییرات قابل توجهی در رفتار دینامیکی سیستم در فضای کاری می‌شود. پس مدل کردن آنها چالش برانگیز می‌باشد. برای اهداف کنترلی مدل‌های ساده دینامیکی مرسوم می‌باشد که با شناسایی بدست می‌آید. مدل‌های مناسب مدل‌هایی هستند که در بردارنده دینامیک مؤثر بر پایداری و عملکرد سیستم باشند. یکی از روش‌های شناسایی روش جعبه سیاه[6] می‌باشد که مرتبه سیستم از قبل مشخص

[1] Shamma
[2] Athans
[3] Linear parameter varying(LPV)
[4] Convex
[5] LMI
[6] Black box

نشده است. روند شناسایی، مرتبه و پارامتر مدل را که بهترین تطابق با دینامیک توربین دارد در هر نقطه کار مشخص می‌نماید. چون نقاط کاری توسط سرعت باد که ورودی غیرقابل کنترل است مشخص می‌گردند، لازم است اندازه‌گیری‌هایی انجام شود. این اندازه-گیری‌ها در شناسایی مدل خطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین یک خانواده از سیستم‌های خطی بدست می‌آید. روش دیگر بر اساس توصیف مکانیکی سیستم می‌باشد. سیستم انتقال قدرت و ساختار آن توسط قطعاتی به هم وصل شده‌اند و با نیروی آیرودینامیکی تحریک می‌شوند. چون اجزای مدل ارتباط مستقیمی با قطعات مکانیکی ندارند لازم است که با شناسایی یا ارزیابی مدل پارامترهای سیستم چنان تنظیم شوند که با دینامیک واقعی سیستم بیشترین مطابقت را داشته باشند. هر دو روش مدلسازی در معرض عدم قطعیت می‌باشد. اگرچه کنترلرهای گوناگونی برای توربین بادی طراحی شده است، معمولا خطای مدل‌سازی در آنها در نظر گرفته نشده است. یکی از استثناها در[۱۰] می-باشد که از ابزار کنترل مقاوم خطی برای مقابله با عدم قطعیت و دینامیک های غیرخطی استفاده کرده است. حتی کنترلرهای متداول جدول بندی بهره نیز به ندرت مسأله مقاوم بودن را در خود جای داده‌اند.

۱-۳-کنترل مقاوم در برابر عیب

در سه دهه گذشته تقاضا برای امنیت[۱]، قابلیت اطمینان[۲]، کارکرد صحیح سیستم ها و حفظ زندگی بشر در مقابل خطرات احتمالی در مکان‌های صنعتی و حتی خانگی رشد چشمگیری داشته است. این موضوع باعث ایجاد انگیزه تحقیق در زمینه رفع موانع موجود در راه رسیدن به این هدف شده است. این موضوع در علم کنترل باعث تحقیق در زمینه‌ای به نام آشکارسازی خطا[۳](عیب) و از کارافتادگی عناصر یک سیستم و شناسایی آن شده است.

از نقطه نظر تاریخی و جنبه عملی مثال‌های زیر می‌تواند اهمیت این موضوع را نشان دهد[۱۱].

۱) در پرواز ۱۰۸۰ Delta Flight بالابرنده (elevator) در زاویه ۱۹ درجه قفل می‌شود و خلبان بدون اطلاع از این قضیه، با تجربه خود و استفاده از اجزای باقی مانده سیستم کنترل، هواپیما را با موفقیت به زمین می نشاند.

[1].Safety
[2] .Reliability
[3] .Fault detection

۲) در تصادف هواپیمای ۱۹۱ در American Airlines DC-10 در شیکاگو تحقیقات بعدی نشان می‌دهد که حادثه به خوبی می‌توانست با تدبیری در سیستم کنترل مهار شود.
۳) حادثه انفجار در نیروگاه اتمی چرنوبیل.
مثال های بیشتر در [۱۱]آورده شده است.

به سیستم‌های کنترل که دارای خاصیت و پتانسیل مقابله با این مشکل می‌باشند سیستم‌های مقاوم در برابر خطا[1] می‌گویند[۱۲]. این روش به ویژه برای سیستم‌هایی که حفظ امنیت در آنها یک موضوع حیاتی می‌باشد مانند جنگنده‌های هوایی، فضاپیماها، نیروگاه‌های اتمی و واحدهای صنعتی مرتبط با مواد شیمیایی خطرناک بسیار پرکاربرد است[۱۱]. یک خطای کوچک در عملکرد این نوع تأسیسات می تواند منجر به خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری شود.

به سیستم های کنترل حلقه بسته که پایداری و حتی الامکان عملکرد[2] صحیح و مورد انتظار را در هنگام رخداد خطا و از کار افتادگی(نقص فنی) عناصری از سیستم حفظ می-نمایند سیستم های کنترل مقاوم در برابر خطا[3] (FTC) می گویند[۱۱].

۱-۳-۱- کنترل مقاوم در برابر عیب در توربین‌های بادی

همانطور که گفته شد امروزه تقاضا برای سیستم های کنترل دارای امنیت بالا و عملکرد مطلوب که دارای بازدهی بالا می‌باشند بسیار رشد داشته و موجب استفاده از این ایده (علاوه بر سیستمهای امنیت-حیاتی) در بسیاری از کاربردهای مهندسی شده است. توربین-های بادی از جمله این سیستم‌هاست[۱۱]. توربین‌های بادی به دلیل استفاده نکردن از سوخت‌های فسیلی و منبع انرژی پایان‌ناپذیر و تجدیدپذیر باد بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به ساختار پیچیده و پرهزینه تولید و طراحی و نگهداری آنها تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است. دسترسی سخت برای تعمیر و نگهداری آنها به دلیل قرار گرفتن در ارتفاعات و حتی مناطق دور از دسترس مانند دریاها و اقیانوس‌ها زمینه انجام این تحقیق را بوجود آورده است. قابل کنترل نبودن انرژی باد (سرعت باد) و ساختمان پیچیده تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی و در معرض بودن توربین‌های بادی در برابر شرایط سخت آب و هوایی و به دنبال آن ایجاد خطاهای بسیار در سیستم که با روشهای سنتی حفظ و نگهداری و کنترل قابل جبران نیستند زمینه‌ای برای تمرکز تحقیق می‌باشد. *تا به اینجا که حتی تغییر طول تیغه توربین بادی به وسیله صاعقه می‌تواند خطایی برای این*

[1] .Fault tolerant
[2] .Performance
[3] .Fault tolerant control systems

سیستم تعریف گردد که با روشهای کنترل مقاوم در برابر عیب می‌توان از اثر توقف تولید انرژی آن و یا از بین رفتن توربین جلوگیری کرد و یا حتی الامکان آن را به تعویق انداخت.

۱-۳-۲-تاریخچه کنترل مقاوم در برابر عیب در توربین بادی

روش‌های متفاوتی برای آشکارسازی عیب در قسمت‌های مختلف توربین بادی انجام شده است. روش‌های برپایه سیگنال برای مانیتورینگ وضعیت و اهداف حفظ و نگهداری از پیش تعیین شده استفاده شده است. تست لرزش[1] قطعات چرخان، آنالیز انتشار آکوستیک قسمت‌های مکانیکی و آنالیز دما از مثال‌های این روش می‌باشد که از آنها استفاده شده است. سنسورهای اضافی در بسیاری از روش‌های ارائه شده پیشنهاد داده شده است. به دلیل اینکه در این پایان‌نامه روش‌های کنترل مقاوم مورد بحث قرار می‌گیرد روش‌های بر پایه مدل مورد توجه قرار می‌گیرند. برای اطلاعات بیشتر از روش‌های بر پایه سیگنال به مراجع [۱۳-۱۵] رجوع شود.

در[۱۶] روش تشخیص عیب سنسور تیغه‌ها با سنسور اضافی و فیلتر کالمن انجام شده است. عیب جمع شونده و ضرب شونده در نظر گرفته شده است. در[۱۷] روش آشکارسازی دو عیب تأخیر عملگر تغییر زاویه تیغه و تغییرگین آن بر اساس مدل خطی از توربین بادی انجام شده است. سه فیلتر کالمن مورد مطالعه قرار گرفته است که مشخص می‌کند فیلتر کالمن گسسته-زمان عملکرد بهتری برای تشخیص پارامتری دارد که در خطی بودن سیستم تأثیر دارد. ایده کنترل جایگزین‌پذیر برای بار اول در این کار ارائه گردید. در[۱۸] مشاهده‌گر ورودی ناشناخته[2] طراحی گردیده که آشکارسازی سه نوع عیب سنسور که در مدل مرجع [۱۹] مشخص شده است را انجام می‌دهد. مجموعه عیب‌ها شامل عیب مقدار ثابت خروجی سنسور سرعت روتور، گین در اندازه‌گیری سرعت روتور و ژنراتور و آفست[3] در گشتاور کانورتور-ژنراتور می‌باشد. در [۲۰] تشخیص عیب عملگر و سنسور تغییر زاویه تیغه با روش تولید مانده[4] انجام شده است. مقالات گفته شده عیب در سیستم کلی توربین بادی را بررسی کرده‌اند. روش‌های آشکارسازی عیب در زیرسیستم‌های توربین نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در [۲۱] روش مدل-پایه برای تشخیص عیب سنسور ژنراتور تغذیه دوبل استفاده شده است. عیب‌های مورد مطالعه شامل عیب در سنسور موقعیت روتور، جریان رتور و استاتور و ولتاژ استاتور می‌باشد. در [۲۲] تخمین پارامتر برای آشکارسازی عیب در استاتور و رتور ماشین القایی قفس سنجابی ارائه گردیده است.

---

[1] Vibration test
[2] Unknown input observer
[3] Offset
[4] Residual