

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش کنترل

تشخیص عیب مقاوم توربین بادی به روش سنتز  $\mu$

نگارنده:

عارف عبدالهی جلودار

استاد راهنما:

دکتر محمدعلی صدرنیا

تیرماه ۱۳۹۷

تقدیم به پدر و مادر عزیزم:

خدای را بی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادر فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان میسایم و از ریشه آن شاخ و

برک گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی

است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند، دستم را گرفته اند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر

از فراز و نشیب آموختند. آموزگاری که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند...

بوسه بردستان پرمهرتان

شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا بر نتهای همت خود کامران شدم

و به مصداق «من لم یسکر المخلوق لم یسکر الخالق» بسی شایسته است

از استاد فرهیخته ام دکتر محمد علی صدرنیا برای زحمات گرانقدر و

راهنمایی های کارسازشان بی نهایت سپاسگذار باشم

از اساتید دانشگده مهندسی برق و رباتیک

از تمام اساتید و دوستان عزیز می که علشان رابی منت می بخشند

...

بهترین های زندگی من

مادر و پدر فداکار و خواهر و برادر دلسوزم

از مصمیم قلب سپاسگزارم

## تعهد نامه

اینجانب عارف عبدالهی جلودار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق (کنترل) دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تشخیص عیب مقاوم در توربین بادی به روش سنتز II تحت راهنمایی دکتر محمد علی صدرنیا متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

عارف عبدالهی جلودار

تابستان ۹۷

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

با توجه به محدود بودن انرژی‌های فسیلی و نیاز روزافزون جهان به انرژی، ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر بیش‌ازپیش نمایان شده است. در این بین استفاده از انرژی بادی با توجه به ظرفیت بالای نیروگاهی، این نوع انرژی‌های تجدید پذیر مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل اینکه توربین‌های بادی در مناطق دور نصب می‌شوند، تشخیص عیب مقاوم یک‌راه مناسب افزایش اطمینان عملکرد آن‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. در این تحقیق به تشخیص و شناسایی مقاوم در برابر عیب در توربین‌های بادی با استفاده از روش سنتز  $\mu$  پرداخته شده است. سیستم‌های واقعی همواره شامل نامعینی یا عدم قطعیت‌هایی می‌باشند که این نامعینی‌ها می‌تواند ناشی از عدم قطعیت در حضور اغتشاش باشد. سیستم با وجود این عدم قطعیت‌ها برای عملکرد مناسب باید انعطاف‌پذیری لازم را داشته باشد. در این تحقیق برای طراحی سیستم تشخیص خطا از روش مقاوم با استفاده از سنتز  $\mu$  استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی این روش تفاضل خروجی سیستم را با خروجی مدل که سیگنال باقیمانده می‌باشد با استفاده از شبیه‌سازی مشاهده و تحلیل کرده تا کارایی لازم را برای ادامه کار سیستم تضمین کند. هدف اصلی ارائه یک سیستم تشخیص و شناسایی عیب (FDI)<sup>1</sup> به روش مقاوم با استفاده از سنتز  $\mu$  می‌باشد به گونه‌ای که تأثیر خطا روی مدل را بیشینه کند تا عیب را به وسیله سیگنال باقیمانده تشخیص دهد و سیستم در مقابل اغتشاش مقاوم باشد تا به کار خود ادامه دهد و در آخر نتایج این روش با روش‌های دیگر مانند  $H_{\infty}$  مقایسه می‌شود. روش مقاوم با استفاده از سنتز  $\mu$  یکی از روش‌هایی است که کارایی سیستم را در حضور اغتشاش و عدم قطعیت‌های مختلف تضمین می‌کند.

واژگان کلیدی: توربین بادی، سنتز  $\mu$ ، تشخیص و شناسایی عیب (FDI)، نامعینی،  $H_{\infty}$ .

---

<sup>1</sup> Fault Detection and Isolation

## فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه	۱
۱-۱- پیشینه کار	۲
۲-۱- اتوماسیون فرآیند و نظارت بر آن	۴
۳-۱- اصطلاحات علمی	۶
۴-۱- مدل های خطا	۱۰
۵-۱- مدل های پایه ای خطا	۱۰
۶-۱- نمونه هایی از مدل های خطا	۱۱
۷-۱- تشخیص عیب	۱۳
۸-۱- عیب یابی	۱۵
۹-۱- روش های تشخیص خطا مبتنی بر مدل	۱۵
۱۰-۱- روش های تشخیص خطا مبتنی بر سیگنال	۲۲
۱۱-۱- اهداف تحقیق	۲۴
۱۲-۱- ساختار پایان نامه	۲۴
فصل ۲ توربین های بادی	۲۵
۱-۲- تاریخچه	۲۶
۲-۲- پارامترهای مهم در انتخاب توربین بادی	۲۸
۳-۲- محدودیت های انرژی باد و استفاده از توربین بادی	۲۹
۴-۲- اجزای توربین بادی	۲۹

۳۲	انواع توربین های بادی.....	۵-۲
۳۴	انواع ژنراتور توربین بادی.....	۶-۲
۳۴	دسته بندی خطاهای امکان پذیر در توربین بادی.....	۷-۲
۳۵	مدل سازی توربین بادی.....	۸-۲
۳۷	فصل ۳ تشخیص عیب مقاوم.....	
۳۸	روش $H_{\infty}$ .....	۱-۳
۴۰	سنتز $\mu$ .....	۲-۳
۴۵	فصل ۴ شبیه سازی.....	
۴۷	معادلات فضای حالت.....	۱-۴
۴۸	ماتریس های فضای حالت.....	۲-۴
۴۹	نامعینی های سیستم.....	۳-۴
۴۹	استفاده از سنتز $\mu$ .....	۴-۴
۵۳	سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش.....	۵-۴
۵۵	سیگنال باقیمانده با اعمال خطا.....	۶-۴
۵۸	مقایسه با روش $H_{\infty}$ .....	۷-۴
۵۹	فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها.....	
۶۰	نتیجه گیری.....	۱-۵



٥-٢- .....پیشنهادها ٦٠

.....منابع ومراجع ٦١

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- طراحی ساده از یک سیستم اتوماسیون..... ۵
- شکل ۱-۲- گسترش خرابی و بدعمل کردن در اثر عیب..... ۷
- شکل ۱-۳- رفتار خطا با توجه به زمان..... ۱۱
- شکل ۱-۴- ساختار پایه‌ای تشخیص خطا..... ۱۶
- شکل ۱-۵- سیستم تشخیص خطا با رویتگر حالت..... ۱۸
- شکل ۱-۶- سیستم تشخیص خطا با استفاده از رویتگر خروجی..... ۱۹
- شکل ۱-۷- تولید باقیمانده با استفاده از معادلات توازن..... ۲۱
- شکل ۱-۸- بررسی حدود: مقادیر مطلق  $Y(t)$ ..... ۲۳
- شکل ۲-۱- اجزای توربین بادی..... ۲۹
- شکل ۲-۲- توربین‌های بادی با محور افقی و عمودی..... ۳۳
- شکل ۱-۳- نمایش تابع انتقال عمومی  $FDI$ ..... ۳۶
- شکل ۲-۳- نمایش تابع انتقال سنتز  $\mu$ ..... ۳۹
- شکل ۱-۴- طرح بلوکی توربین بادی..... ۴۲
- شکل ۲-۴- سیستم تشخیص خطا همراه با نامعینی..... ۴۹
- شکل ۳-۴- عملکرد مقاوم در مرحله ۱ طراحی..... ۵۰

- شکل ۴-۴- عملکرد مقاوم در مرحله ۴ طراحی ..... ۵۰
- شکل ۴-۵- مقادیر ویژه هنکل ..... ۵۱
- شکل ۴-۶- خروجی سیستم (V) ..... ۵۲
- شکل ۴-۷- خروجی روی تگر (yt) ..... ۵۲
- شکل ۴-۸- سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاشات ( $\Delta v = 1V, \Delta u = 2 m/s$ ) ..... ۵۳
- شکل ۴-۹- سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاشات ( $\Delta v = 2V, \Delta u = 4 m/s$ ) ..... ۵۴
- شکل ۴-۱۰- سیگنال باقیمانده در حضور خطای پله ( $\Delta v = 1V, \Delta u = 2 m/s$ ) ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۱- سیگنال باقیمانده در حضور خطای پله ( $\Delta v = 1V, \Delta u = 1 m/s$ ) ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۲- سیگنال باقیمانده در حضور خطای شیب ( $\Delta v = 1V, \Delta u = 2 m/s$ ) ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۳- سیگنال باقیمانده در حضور خطای شیب ( $\Delta v = 1V, \Delta u = 1 m/s$ ) ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۴- سیگنال باقیمانده در حضور خطای پالس ( $\Delta v = 1V, \Delta u = 2 m/s$ ) ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۵- سیگنال باقیمانده در حضور خطای پالس ( $\Delta v = 1V, \Delta u = 1 m/s$ ) ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۶- سیگنال باقیمانده به روش  $H_{\infty}$  ..... ۵۸



## فصل ۱

### مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائلی که مهندسين کنترل با آن مواجه می‌باشند، طراحی سیستم‌های کنترلی نسل آینده می‌باشد تا در مواقعی که با رویدادهای غیرطبیعی روبرو می‌شوند بتوانند تصمیمات مناسب را به کمک اپراتورها اتخاذ نمایند. توقف‌های برنامه‌ریزی نشده به خاطر خرابی‌ها در اکثر صنایع می‌تواند تأثیرات غیرقابل جبرانی را به دلیل زمان بالای توقف یا هزینه‌های بالای فرایند داشته باشد.

تشخیص ندادن به موقع عیب در تجهیزات می‌تواند منجر به از بین رفتن و صدمه دیدن بخش‌های قابل توجهی از اطلاعات و امکانات و در برخی موارد نیروهای انسانی شود. به دلیل وسعت علت‌های مختلف پدید آمدن این شرایط غیرطبیعی و همچنین پیچیدگی سامانه‌ها و تجهیزات جدید، تنها تکیه کردن بر اپراتورهای انسانی برای مدیریت چنین مشکلاتی کافی نمی‌باشد. بنابراین نیاز به یک سیستم تشخیص عیب برای عملکرد مناسب و دلخواه می‌باشد که باید دارای ویژگی‌هایی نظیر تشخیص سریع وقوع عیب و نوع آن، جداسازی عیب (توانایی سیستم برای تمایز بین عیب‌های مختلف)، مقاوم بودن به انواع مختلف عدم قطعیت‌ها و نویز را داشته باشد [۱].

## ۱-۱ پیشینه کار:

از حدود سال ۱۹۶۰ نفوذ اتوماسیون بر عملکرد و طراحی سیستم‌ها افزایش چشمگیری پیدا کرده است. این افزایش تقاضا به علت عملکرد مطلوب فرآیندها و کیفیت خوب محصولات بود که عدم وابستگی عملکرد فرایند از حضور انسان و خلاص کردن اپراتور از انجام کارهای یکنواخت و تکراری و کاهش هزینه دستمزدها را به همراه داشت [۲]. میزان کاربرد اتوماسیون حدود سال ۱۹۷۵ به شدت افزایش یافت زیرا در همان زمان بود که میکرو کامپیوترهای قابل اطمینان و به نسبت ارزان در دسترس قرار گرفتند که می‌توانستند چند مشکل اتوماسیون را با استفاده از یک قطعه رفع کنند. این فناوری به‌طور موازی با پیشرفت در زمینه‌های حس‌گرها، محرک‌ها، باس‌های ارتباطی و واسط‌های انسانی (HMI)<sup>۱</sup> در حال انجام بود. بهبود و رشد در مفاهیم تئوری عملکرد فرآیندها و اتوماسیون نیز

---

<sup>1</sup> Human Machine Interface

نقش بزرگی را در این زمینه ایفا می‌کرد. در طی پیشرفت کنترل خودکار در طول سه دهه گذشته، سیستم‌های فنی و واحدهای نظارتی فراوانی به کار گرفته شدند تا حالت‌های ناخواسته و غیرمجاز فرایندها را تشخیص دهند و عکس‌العملی مناسب، جهت حفظ عملکرد فرآیند برای جلوگیری از رخ دادن حادثه و یا فاجعه‌ای عظیم انجام دهند. این واحدهای نظارتی را به شرح زیر می‌توان نشان داد [۳]:

**a) مانیتورینگ:** متغیرهای اندازه‌گیری با مقادیر دارای تلورانس چک می‌شوند و هشدار لازم را برای کاربر تولید می‌کنند.

**b) حفاظت خودکار:** در مورد حالت‌های فرآیندهای خطرناک، توابع مانیتورینگ به‌طور خودکار اقدامی متقابل را انجام می‌دهند تا اثر خطای وارد شده را به حداقل برسانند.

**c) نظارت به همراه عیب‌یابی خطا:** بر پایه متغیرهای قابل اندازه‌گیری، روند محاسباتی انجام می‌گیرد و از طریق تشخیص تغییرات، نشانه‌ها (علائم هشدار) تولید می‌گردند و عیب‌یابی خطا اجرا می‌شود و تصمیم برای اقدام متقابل اتخاذ می‌گردد.

نظارت‌های خودکار در گذشته توسط بررسی حد یا سطح آستانه بعضی متغیرهای مهم فرآیند مانند: نیرو، سرعت، فشار، سطح مایع و دماها صورت می‌گرفت. معمولاً زمانی که مقدار متغیر از سطح تعیین شده فراتر می‌رفت هشدار به کاربر داده می‌شد تا عملی در جهت حفاظت از سیستم انجام دهد. این روش در اکثر مواقع از بروز خسارت و اتفاقات جلوگیری می‌کرد. با این وجود در این روش، خطاها خیلی دیر تشخیص داده می‌شدند و خطاهای کوچک نیز از دید اپراتور مخفی می‌ماند و قابل تشخیص نبود. در موارد سیستم حلقه بسته، تغییرات ناخواسته در فرآیندها توسط عملیات کنترل مورد پوشش قرار می‌گیرد و از طریق خروجی قابل‌شناسایی هستند. بنابراین سیستم‌های دارای بازخورد، تشخیص خطاهای فرآیند را به تأخیر می‌اندازند. مزیت بزرگ نظارت بر پایه مقدار محدود کلاسیک<sup>1</sup>، سادگی و قابلیت اطمینان بودن است [۴]. به‌هر حال این سطح آستانه، بعد از یک تغییر بزرگ یا خطای افزایشنده

---

<sup>1</sup> Classic Threshold

طولانی قادر به عکس العمل هست. در واقع عیب‌یابی خطای معمولی غیرممکن است. بنابراین گزینه

پیشرفته بند C مورد نیاز است که شرایط زیر را برآورده کند:

- تشخیص سریع خطاهای کوچک با رفتار تند زمانی
- عیب‌یابی خطاها در اجزا محرک‌ها و حس‌گرها
- تشخیص خطا در حالت حلقه بسته
- نظارت بر فرآیند در حالت گذرا

هدف از تشخیص زود و سریع خطا و عیب‌یابی آن، این است که زمان کافی برای اقدام مانند: بازسازی ساختارهای کنترلی جهت حداقل نمودن اثر خطا، محافظت و تعمیر وجود داشته باشد. تشخیص زود مخصوصاً به وسیله رابط بین کمیت‌های قابل اندازه‌گیری در قالب مدل‌های ریاضی می‌تواند از طریق جمع‌آوری اطلاعات بیشتر به دست آید.

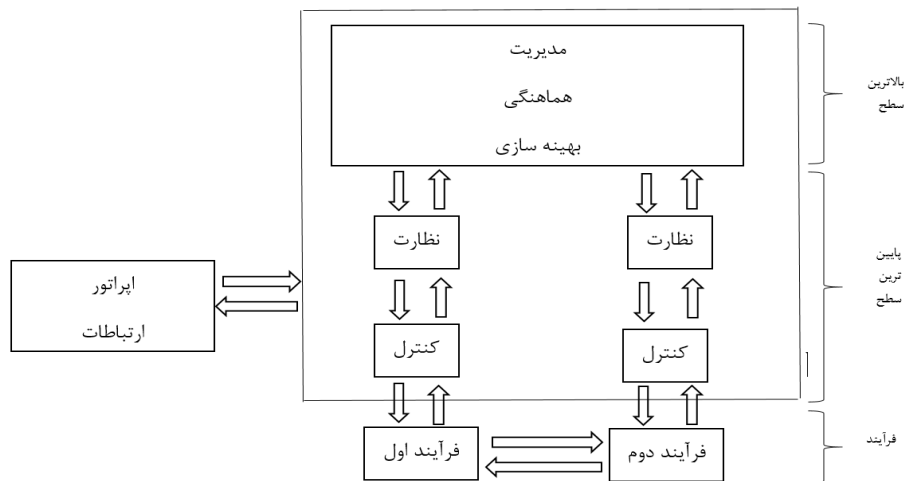
## ۱-۲ اتوماسیون یک فرآیند و نظارت بر آن

پایین‌ترین سطح شامل کنترل‌کننده‌های کلاسیک، پس‌خورد و پیش‌خور است. نظارت در سطح میانی معنا پیدا می‌کند. بالاترین سطح شامل عملیات کلان از جمله مدیریت و بهینه‌سازی است. اطلاعات مهم فرآیند نیز در میز نمایش داده می‌شوند [۵].

در گذشته پیشرفت و بهبود یک فرآیند در پایین‌ترین سطح آن (سطح فرآیند) انجام می‌شده است. برای مثال کیفیت حس‌گرها و محرک‌ها افزایش پیدا می‌کرد و یا روش‌های کنترلی جدیدی ابداع می‌شد، اما پیشرفت در سطح اپراتوری مستلزم آن بود که توابع نظارتی نیز پیشرفت کنند و بهبود یابند. از طرف دیگر یکپارچگی سیستم‌های کنترلی نیز مزید بر این علت شد.



شکل ۱-۱، یک طرح ساده از خودکارسازی فرآیند که از دو فرآیند تزویج شده تشکیل شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱: طرحی ساده از یک سیستم خودکارسازی

سیستم‌های کنترلی زمانی می‌توانند امن و قابل اطمینان باشند تا تمام اجزای فرایند مانند حس‌گرها، محرک‌ها، محاسبه‌گرها و اجزای خود سیستم به‌طور صحیح کار کنند. از طرف دیگر خطاهای سیستم باید به‌سرعت به اپراتور نشان داده شوند و در فرآیندهایی که خطا در آن با جان افراد ارتباط دارد نیز، باید قسمت‌های جایگزین و یا اجزای تجدید ساختار وارد عمل شوند و کنترل سیستم را بر عهده گیرند. روش‌های تشخیص خطا مبتنی بر مدل، برای این‌که بتوانند تغییرات احتمالی ناشی از خطا را استخراج کنند، از رابطه‌های مربوط به چندین متغیر که در طول فرآیند اندازه‌گیری می‌شوند، استفاده می‌کنند. این روابط اکثراً از نوع تحلیلی هستند که از معادلات مدل فرآیند به دست می‌آیند. دقت شود که این روابط علاوه بر حالت تحلیلی و ریاضی می‌توانند از روابط علت و معلول نیز باشند. برای مثال قوانین اگر-سپس<sup>۱</sup>، رابطه بین سیگنال ورودی  $U$  و سیگنال خروجی  $Y$  توسط مدل ریاضی فرایند بیان می‌شود و با استفاده از روش‌های تشخیص خطای مختلفی که وجود دارد نیز خصوصیات برجسته یک فرایند مانند: پارامترهای یک سیستم  $\theta$ ، متغیرهای حالت  $X$  یا سیگنال باقی‌مانده  $r$

<sup>۱</sup> If-then Rule

استخراج می‌گردند. بعد از به دست آوردن مقادیر سیستم و مقایسه آن‌ها با مقادیر نامی آن و اعمال روش‌های تشخیص می‌توان سیگنال تصمیم‌گیری را تولید کرد. برای به‌کارگیری انواع روش‌های مختلف تشخیص خطا دانستن ساختار سیستم الزامی است.

مدل‌های به‌کاررفته برای فرآیندها می‌توانند زمان پیوسته و یا زمان گسسته باشند که مدل زمان پیوسته خود به معادلات خطی، غیرخطی یا متغیر با زمان دسته‌بندی می‌شوند. از نکات دیگر در تشخیص عیب، نحوه ظهور و حضور در مدل فرآیند است.

### ۱-۳ اصطلاحات علمی

از آنجایی که شاخه مورد بحث در مورد عیب‌ها و خرابی در سیستم در حوزه‌های مختلف علمی وارد شده است، تعاریف و اصطلاحات موجود یکتا نیستند. برای این‌که به تعریف و توضیح این اصطلاحات بپردازیم از مرجع [۳] استفاده می‌کنیم.

#### ۱-۳-۱ عیب

انحراف غیرمجاز حداقل یکی از مشخصه‌های سیستم از مقدار مجاز، استاندارد و شرایط نرمال خود.

- عیب یکی از حالت‌های داخلی سیستم است
- عیب، شرایط غیرعادی است که ممکن است موجب کمبود و نقصان در توانایی یک واحد برای انجام کاری شود.
- انواع مختلفی از عیوب در طراحی، عیب در تولید، عیب در مونتاژ، عیب عملکرد عادی (مانند ساییده شدن)، عیب بدعمل کردن (مانند اضافه‌بار)، عیب در نگهداری و پشتیبانی از سیستم، عیب در سخت‌افزار و نرم‌افزار و عیب در عملکرد کاربر می‌تواند وجود داشته باشد. (برخی از عیوب، خطا هم نامیده می‌شوند، مخصوصاً که اگر توسط انسان به وجود آمده باشند)
- عیب در سیستم مستقل از این است که سیستم در حال کار کردن است یا خیر
- ممکن است عیب موجب خرابی و بدکار کردن شود [۳].

### ۲-۳-۱ خرابی

وقفه دائمی در توانایی سیستم برای انجام کار موردنیاز تحت شرایط خاص.

- خرابی، پایان توانایی یک واحد در انجام کار موردنیاز است
- دسته‌بندی‌های مختلفی برای خرابی‌ها وجود دارد:
- تعداد خرابی‌ها: تکی و گروهی.

ازنقطه‌نظر قابلیت پیش‌بینی:

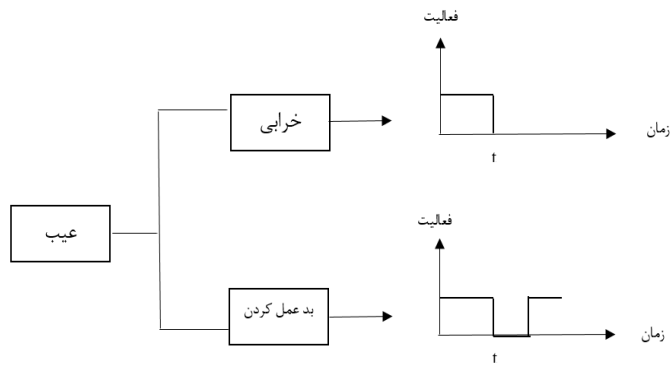
- \* خرابی‌های تصادفی (غیرقابل پیش‌بینی، از لحاظ آماری مستقل از خرابی‌های دیگر هستند).
- \* خرابی‌های مشخص (قابل پیش‌بینی برای شرایط خاص)
- \* خرابی‌های سامانمند یا علی (وابسته به شرایط خاص)

### ۳-۳-۱ بدعمل کردن

بی‌نظمی‌های متناوب و دوره‌ای در اجرای فعالیت طراحی شده برای سیستم.

- بدعمل کردن، توقف موقت در فعالیت سیستم است.
- از یک یا چند عیب ناشی می‌شود.
- معمولاً پس از شروع کار سیستم و با وارد آوردن فشار بر آن به وجود می‌آید.

شکل ۱-۲ ارتباط بین عیب، خرابی و بدعمل کردن را نشان داده است. عیب، می‌تواند به صورت ناگهانی، مانند تابع پله، یا به تدریج گسترش یابد. فرض می‌شود مشخصه سیستم متناظر با عیب هم متناسب با توسعه عیب، آلوده می‌گردد. پس از عبور از حدود مجاز برای مشخصه سیستم، عیبی در زمان  $t$  برای مشخصه سیستم معین می‌شود.



شکل ۱-۲: گسترش خرابی و بدعمل کردن در اثر عیب

### ۴-۳-۱ قابلیت اطمینان

توانایی سیستم برای انجام فعالیت موردنیاز تحت شرایط معین شده، باهدف و رویکرد، در یک بازه زمانی معین.

- شاخصه‌ای است که در طول زمان دوام داشته باشد.
- می‌تواند از خرابی‌ها و بدعمل کردن‌ها تأثیر بپذیرد.
- یک معیار برای اندازه‌گیری قابلیت اطمینان، میانگین زمان خرابی  $MTTF = \frac{1}{\lambda}$  است و در آن  $\lambda$  نرخ خرابی‌ها در واحد زمان است [۳].

### ۵-۳-۱ ایمنی

- توانایی این که سیستم به افراد، تجهیزات و محیط صدمه‌ای نزند.
- توانایی این که سیستم موجب خطر نشود
  - ایمنی، نگران تأثیر خطرات عیوب، خرابی‌ها و بدعمل کردن‌ها است.
  - ایمنی می‌تواند شبیه به حالتی که ریسک از حد مشخصی کمتر است، در نظر گرفته شود.
- اقدامات لازم برای ارتقاء قابلیت اطمینان، در جهت جلوگیری از عیوب، خرابی‌ها و بدعمل کردن است. اقدامات لازم برای ایمنی برای جلوگیری از اثرات خطرناک خرابی‌ها و بدعمل کردن است. بدین

ترتیب، بهبود در قابلیت اطمینان، موجب ارتقاء سطح ایمنی می‌شود [۳].

### ۱-۳-۶ دسترس پذیری

احتمال این که یک سیستم یا تجهیزات در هر بازه زمانی، وظیفه خود را به طور رضایت بخش و مؤثر انجام خواهد داد.

• معیاری برای اندازه گیری دسترس پذیری  $A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$  است و میانگین زمان تعمیر است.

• برای رسیدن به یک دسترس پذیری مناسب، باید مقدار  $MTTF$  نسبت به  $MTTR$  بزرگ باشد. این امر زمانی محقق می‌شود که:

۱- زمان فعالیت  $MTTF$  بزرگ باشد:

✓ حالت خیلی خوب: اجزایی با قابلیت اطمینان بالا

✓ حد قابل قبول: عیوب قابل تحمل با به کارگیری افزونگی در سیستم

۲- زمان تعمیر  $MTTR$  کوچک باشد:

✓ تشخیص عیب سریع و مطمئن باشد

✓ تعمیر و رفع عیب سریع و مطمئن باشد [۳].

### ۱-۳-۷ یکپارچگی

یکپارچگی یک سیستم، توانایی کشف عیوب در کار خودشان و اطلاع دادن به کاربر است. سال‌ها این مفهوم همراه با سیستم‌های بحرانی بوده است. یکپارچگی مترادف با اصطلاح قابلیت اعتماد و اطمینان است. این اصطلاح در مرجع [۳] به صورت زیر تعریف شده است:

یکپارچگی، احتمال این است که یک سیستم وابسته به ایمنی کار خود را تحت همه شرایط در یک بازه زمانی به طور رضایت بخش انجام دهد، می‌باشد.

## ۴-۱ مدل‌های خطا

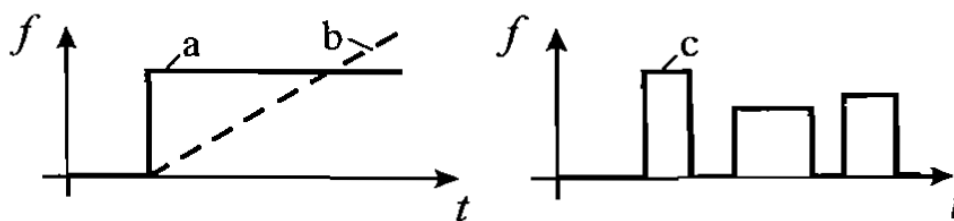
انتخاب مدل مناسب برای خطا یکی از عوامل مؤثر در بررسی عملکرد سیستم تشخیص خطاست. درک فیزیکی از توصیف خطاهای رخ داده در مدل واقعی یک فرایند، بررسی اثرات خطا بر روی مدل ریاضی تعیین شده برای همان فرآیند و همچنین پیش‌بینی رفتار سیستم را آسان‌تر خواهد کرد. البته این هدف با بررسی دقیق فرایند و با استفاده از یک فیلتر تشخیص خطای مناسب حاصل می‌گردد. برای بروز خطا در یک سیستم فیزیکی دلایل زیادی را می‌توان بیان نمود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- اشتباه در طراحی سیستم و یا طراحی در مونتاژ آن
  - اشتباه در عملکرد اجزای سیستم و فقدان نگهداری مناسب از تجهیزات و قطعات موجود
  - ازکارافتادگی سیستم، خوردگی و زنگ‌زدگی، فرسودگی و سایش ناشی از عملکرد طبیعی اجزای یک سیستم که در ارتباط دائم باهم می‌باشند.
- با توجه به نوع عملکرد خطا و رفتار خطا بعد از رخ دادن آن‌ها می‌توان آن‌ها را به طریق مختلف دسته‌بندی نمود. یک خطا ممکن است به‌طور ناگهانی و در اندازه‌های کوچک و بزرگ در یک سیستم رخ دهد و یا همچنین به‌طور افزایشی تدریجی مانند شیب در سیستم بروز کند. به جهت سهولت در بررسی خطاها و رفتار آن‌ها در یک چهارچوب معین می‌توان خطاها را به دسته‌های شناخته‌شده زیر دسته‌بندی نمود [۲].

## ۵-۱ مدل‌های پایه‌ای خطا

همان‌طور که گفته شد خطا یک تغییر ناخواسته در رفتار طبیعی سیستم و یا حداقل در یکی از خصوصیات (متغیرهای) فرایند می‌باشد. این خصوصیات می‌تواند یکی از کمیت‌های فیزیکی موجود باشد. اگر کمیت موردنظر جزئی از یک قانون مانند:  $Y(t) = g[U(t), x(t), \theta]$  در نظر گرفته شود، آنگاه سیگنال‌های  $U(t)$  و  $Y(t)$  از جمله سیگنال‌هایی هستند که به راحتی قابل اندازه‌گیری و استفاده می‌باشند.

مهم‌ترین خصوصیات این سیگنال‌ها در دسترس بودن آنهاست که بعد از رخ دادن اتفاق ناخواسته اثر خود را به‌نوعی در سیگنال متغیر ورودی  $U(t)$ ، سیگنال خروجی  $Y(t)$ ، متغیرهای حالت  $x(t)$ ، یا توابع  $\theta$  نشان می‌دهد. بنابراین خطا به‌صورت تغییر در یک پارامتر یا سیگنال ظهور می‌کند. وابستگی زمانی انواع خطاها در ادامه نشان داده‌شده است.



شکل ۳-۱: رفتار خطا با توجه به زمان

به شکل ۲-۲ توجه کنید:

- خطای ناگهانی (پله) حالت (a)
- خطای افزایشنده (شیب) حالت (b)
- خطای متناوب حالت (c)

#### ۶-۱ نمونه‌هایی از مدل‌های خطا

انواع خطاها و نحوه مدل کردن آن وابسته به مفاهیم اولیه در سیستم‌های واقعی است. به همان دلیل چند خطای مهم در سیستم‌های عملی در ادامه مورد توجه قرار می‌گیرد [۳].

#### ۱-۶-۱ خطای حسگر

حسگرها و سیستم‌های اندازه‌گیری المان‌های دینامیکی هستند که توسط آنها متغیرهای خروجی  $Y(t)$  اندازه‌گیری می‌شوند. بدون تجهیزات کالیبراسیون، تشخیص صحت عملکرد یک حسگر سخت

می‌باشد. اگر خروجی واقعی یک حس‌گر را  $Y_0$  در نظر گرفته شود، آنگاه رفتار استاتیکی یک حس‌گر ممکن است خطی باشد:

$$Y(t) = C_0 + C_1 Y_0(t) \quad (1-1)$$

و یا غیرخطی باشد:

$$Y(t) = C_0 + C_1 Y_0(t) + C_2 Y_0^2(t) + \dots \quad (2-1)$$

رفتار دینامیکی یک حس‌گر برای تغییرات کوچک همیشگی را می‌توان به‌طور تقریبی با مدل خطی تقریب زد و توسط تابع تبدیل زیر نشان داد.

$$G_s(s) = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta U(s)} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{B_s(s)}{A_s(s)} \quad (3-1)$$

و در موارد ساده با یک lag مرتبه اول نیز قابل بیان است:

$$G_s(s) = \frac{K_s}{1 + T_1 s} \quad (4-1)$$

با بهره:

$$K_s = C_1 + 2C_2 \quad (5-1)$$

خروجی یک حس‌گر معمولاً تحت تأثیر انواع اغتشاشات داخلی و خارجی است. اغتشاشات خارجی توسط محیط اطراف و حس‌گر به وجود می‌آیند، مانند: اثرات مغناطیسی. اغتشاشات داخلی که توسط خود حس‌گر ایجاد می‌شوند. این‌گونه اغتشاشات بر اثر تغییر در منبع تغذیه، مقاومت‌ها، خازن‌ها، سلف‌ها یا اصطکاک به وجود می‌آید و در نهایت رفتار دینامیکی حس‌گر تغییر می‌کند.



به‌طور کلی پنج دسته عمده خطاها برای یک حس‌گر را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- آفست ثابت  $\Delta Y$
- تغییرات بهره  $\Delta K_s$
- خاصیت هیستریزیس
- از دست دادن دقت اندازه‌گیری

### ۱-۶-۲ خطای محرک

محرک‌ها آخرین جزء یک عملکرد کنترلی هستند که نقش مهمی را در یک فرآیند کنترلی ایفا می‌کنند زیرا باید توان لازم برای ساخت و ایجاد متغیر کنترلی موردنظر را تأمین نمایند. اگر سیستمی شامل یک کنترل‌کننده قوی بوده ولی از نظر محرک دارای ضعف باشد به‌طوری‌که نتواند سیگنال کنترلی تولیدشده را به فرآیند انتقال دهد در مجموع عملکرد سیستم ضعیف ارزیابی می‌گردد.

اکثر محرک‌ها در سیستم‌های نوین، سیستم‌های قدرتی، هیدرولیکی یا پنوماتیکی هستند. با توجه به قابلیت انتقال توان بسیار بالا در این گروه از محرک‌ها، این دسته از محرک‌ها ذاتاً حجیم و بزرگ می‌باشند و وزن و اندازه زیاد این قطعات محدودیت‌هایی را برای استفاده از آن‌ها در حالت ذخیره ایجاد می‌کند. به همین دلیل تمرکز بر روی خطاهای محرک‌ها امروزه بیشتر موردتوجه قرار می‌گیرد.

### ۱-۶-۳ خطای اجزای سیستم<sup>۱</sup>

این دسته از خطاها به‌طور عمده باعث تغییر در درایه‌های ماتریس فضای حالت سیستم یا ضرایب معادله دینامیکی سیستم می‌گردند و با توجه به اغتشاش ذاتی سیستم‌های فیزیکی تشخیص این نوع خطاها در سیستم‌های بزرگ بسیار سخت است.

---

<sup>1</sup> Component Fault

## ۱-۷-تشخیص عیب

برای تشخیص عیب سیستم‌های دینامیکی در حالت کلی دو رویکرد عمده وجود دارد. استفاده از نشانه‌های تحلیلی و استفاده از نشانه‌های ابتکاری و ابداعی<sup>۱</sup>(انسانی) که در ادامه هر یک به‌طور مختصر توضیح داده می‌شود.

### ۱-۷-۱ تولید نشانه‌های تحلیلی<sup>۲</sup>

دانشت‌های تحلیلی یک فرآیند، برای تولید اطلاعاتی به‌کاربرده می‌شوند که قابل‌سنجش باشند. به این معنی که بتوان آن‌ها را اندازه‌گیری نمود و با مقادیر مشخص دلخواهی مقایسه کرد. رسیدن به این هدف نیازمند پردازش داده‌ها بر اساس متغیر اندازه‌گیری شده در فرایند است تا سیگنال تصمیم‌گیری مطابق با مراحل زیر تولید گردد[۳]:

- چک کرد میزان سیگنال‌های اندازه‌گیری شده به‌طور مستقیم(مقادیر اندازه‌گیری شده، فراتر از حد قابل قبول سیگنال است یا نه.
- آنالیز فرایندهای ریاضی با استفاده از تخمین پارامترها، تخمین حالت و معادلات توازن، مقادیر نوعی پارامترها، متغیرهای حالت و یا باقی‌مانده‌ها.

### ۱-۷-۲ تولید نشانه‌های ابتکاری

علاوه بر اطلاعات اندازه‌گیری برای تولید نشانه‌های تحلیلی، نشانه‌های ابتکاری نیز قابل تولید هستند. که به‌صورت اطلاعات کیفی از اپراتورها به دست می‌آیند. به‌وسیله مشاهدات و دریافت اطلاعات محیطی، مقادیر نوعی انسانی در قالب رنگ، بو، غلظت، ارتعاشات، فرسودگی، ازهم‌گسیختگی و غیره به دست می‌آیند. تاریخچه یک فرآیند که شامل اطلاعات مهم مانند روند نگهداری سیستم، تعمیرات آن، انواع خطاهای پیشین رخ داده در سیستم، دوره عمر دستگاه‌های موجود در سیستم، منابع بیشتر اطلاعات انسانی را در اختیار طراح قرار می‌دهند. به موارد فوق می‌توان اطلاعات استاتیکی که از طریق

---

<sup>۲</sup>Heuristic

<sup>۳</sup>Analytical

تجربه با همین روش‌ها یا روش‌های مشابه به دست آمده‌اند را نیز اضافه کرد. به این طریق نشانه‌های ابداعی تولیدشده در فوق را می‌توان با استفاده از متغیرهای زبانی مانند توصیفات کوچک، متوسط و بزرگ یا اعدادی دارای مفهوم مشخص برای کاربر به کاربرد.

## ۸-۱ عیب‌یابی

مراحل عیب‌یابی خطا شامل تعیین نوع خطا، اندازه و مکان خطا و همچنین زمان روی دادن خطا است که بر پایه رویکردهای تحلیلی یا نشانه‌های ابتکاری می‌توان به این هدف دست یافت. اگر اطلاعات بیشتری در مورد خطا و علل پیدایش آن موردنظر باشد می‌توان از روش‌هایی مانند طبقه‌بندی آماری و هندسی یا شبکه‌های عصبی و خوشه‌های فازی استفاده نمود. همچنین اگر آگاهی قبلی از علیت نشانه‌های خطا در دسترس باشد، می‌توان سیستم تشخیص خطا را در قالب شبکه‌های علیت، استراتژی استدلال خطایاب<sup>۱</sup> به کاربرد. سلسله پیشرو و پس‌رو<sup>۲</sup> با الگوریتم بولین برای اتفاقات باینری با استدلال تقریبی برای اتفاقات احتمالی نیز به کار برده می‌شوند. در نهایت سیستم عیب‌یابی خطا نشان‌دهنده نوع، اندازه و مکان خطاهای محتمل‌تر و همچنین زمان دقیق تشخیص است [۳].

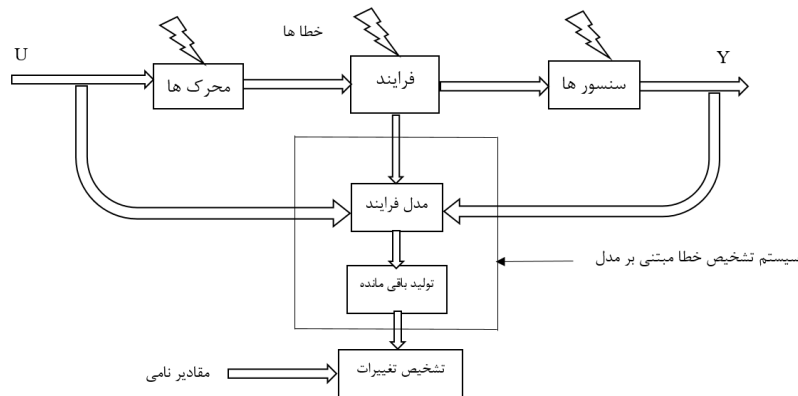
## ۹-۱ روش‌های تشخیص خطا مبتنی بر مدل

روش‌های مختلف خطا با استفاده از مدل‌های ریاضی در طول ۳۰ سال گذشته رشد چشم‌گیری کرده‌اند. در این قسمت روش‌های پایه‌ای به‌طور مختصر توضیح داده می‌شوند. این عمل شامل تشخیص خطاها در اجزای سیستم، محرک‌ها و حس‌گرها است. در تمامی این روش‌ها، اطلاعات موردنظر با اتکا به سیگنال‌های مختلف قاب اندازه‌گیری از مدل ریاضی فرایند به دست می‌آیند از مهم‌ترین روش‌هایی که برای تشخیص خطابه کار می‌رود می‌توان به تشخیص خطا با استفاده از شناسایی سیستم، رویکرد حالت و معادلات توازن اشاره کرد [۶].

<sup>1</sup> Diagnosis Reasoning Strategies

<sup>2</sup> Forward And Backward Chaining

شکل ۴-۱ ساختار پایه‌ای سیستم تشخیص خطا بر اساس مدل ریاضی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: ساختار پایه‌ای تشخیص خطا

### ۱-۹-۱ تشخیص خطا با استفاده از تخمین پارامتر

روش‌های مبتنی بر فرآیند نیازمند به دانش در مورد فرآیند و پارامترهای آن هستند. در مورد سیستم‌های خطی پیوسته در زمان، می‌توان از پاسخ ضربه و معادلات دیفرانسیل مربوط به پاسخ فرکانسی استفاده کرد. در حالت عملی پارامترهای فرآیند یا هیچ‌کدام مشخص نیستند یا این‌که تعدادی از آن‌ها مشخص هستند. بنابراین اگر ساختار اصل مدل فرآیند در دسترس باشد، می‌توان پارامترها را از طریق تخمین پارامتر با اندازه‌گیری سیگنال‌های ورودی و خروجی، به دست آورد. اولین روش (تخمین حداقل مربعات)، نسبت به پارامترها خطی است و می‌توان از آن برای تخمین مستقیم پارامترها به صورت بازگشتی یا غیر بازگشتی بهره گرفت. روش دوم نیازمند روش‌های بهینه‌سازی عددی و روش‌های تکرارشونده است. البته در شرایطی که فرآیند تأثیرپذیر از اغتشاشات است بسیار دقیق عمل می‌کند. نشانه‌ها، انحراف پارامترهای فرآیند  $\Delta\theta$  هستند. از آنجایی که پارامترهای فرآیند  $\vartheta = f(p)$  با ضرایب فیزیکی فرآیند  $p$  ارتباط دارند، تعیین تغییر در فرآیندهای  $\Delta p$ ، موجب راحتی در تعیین عیب شده و بینش فیزیکی بیشتری می‌دهد [۳].

## ۱-۹-۲ تشخیص عیب با استفاده از مشاهده‌گرها

در فرآیندهایی که پارامترها شناخته شده‌اند هر کدام از مشاهده‌گرهای حالت یا مشاهده‌گرهای خروجی می‌توانند استفاده شوند. از آنجایی رویتگرهای حالت، از خطای خروجی متغیرهای اندازه‌گیری شده فرآیند و فرایند مدل شده، برای تشخیص خطا استفاده می‌کنند، از محبوب‌ترین روش‌های تشخیص خطا بر پایه مدل ریاضی می‌باشند. در این روش فرض بر این است که ساختار و پارامترهای فرآیند به‌طور دقیق شناخته شده باشند. رویتگرهای حالت، متغیرهای حالتی را که باید مورد بررسی قرار گیرند با توجه به دو فاکتور مهم، که اولین آن وضعیت اولیه (مقدار اولیه) متغیرها و دومی دوره زمانی اندازه‌گیری سیگنال‌ها است را در روند طراحی در نظر می‌گیرند. رویکرد مختلفی برای تشخیص خطا با این روش پیشنهاد شده است که اکثر آن‌ها بر پایه رویتگرهای کلاسیک لیونبرگر، فیلتر کالمن و یا رویتگر خروجی استوار است.

### رویتگر حالت

یک فرایند خطی و تغییرناپذیر با زمان را می‌توان توسط معادلات فضای حالت زیر بیان کرد [۶]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (۶-۱)$$

هدف اصلی استفاده از رویتگر حالت، بازسازی متغیرهای حالتی است که غیرقابل اندازه‌گیری هستند. اساس کار این روش، استفاده از سیگنال‌های ورودی و خروجی سیستم می‌باشد که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری هستند.  $\hat{x}$  متغیر حالتی است که توسط رویتگر تخمین زده می‌شود. این روش‌های تشخیص خطا به‌طور عمده نیازمند سیگنال‌های خروجی قابل اندازه‌گیری و استفاده از تحلیل داخلی چندگانه سیستم‌های چند متغیره هستند.

معادله شماره (۷-۱) رفتار خطا را در این حالت نشان می‌دهد که با گذشت زمان به‌طور نمایی به سمت صفر می‌کند:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + He(t) \quad (۷-۱)$$

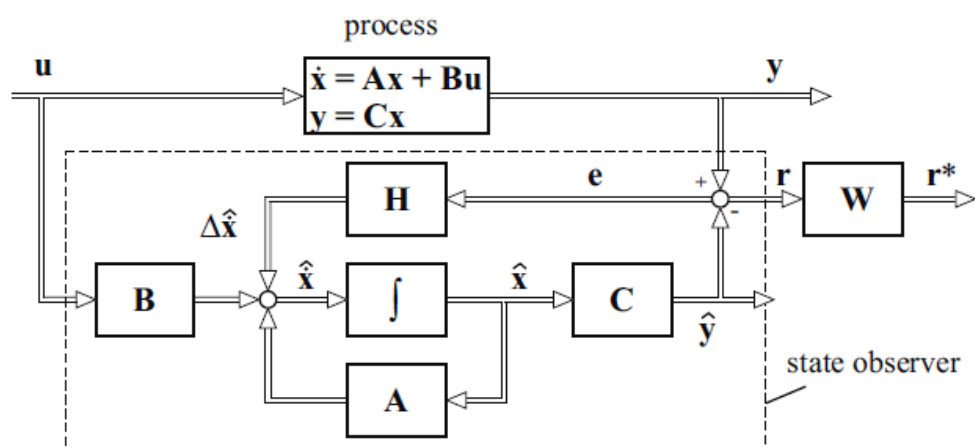
$$e(t) = y(t) - C\hat{x}(t) \quad (۸-۱)$$

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \quad (۹-۱)$$

$$\dot{\tilde{x}} = [A - HC]\tilde{x}(t) \quad (۱۰-۱)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}(t) = 0$$

در سال‌های اخیر ارتقاء مقاوم بودن سیستم‌های تشخیص خطا با توجه به تغییرات پارامترها منجر به روشی به نام سیگنال ورودی نامعلوم<sup>۱</sup> شده است. برای مثال با فیلتر کردن خطای خروجی به صورت  $r(t) = We(t)$  به اضافه طراحی مخصوص برای بازخورد  $H$ ، این هدف قابل دستیابی است که در فصل شبیه‌سازی به‌طور مفصل به آن پرداخته خواهد شد. شکل ۵-۲ شمای کلی این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱: سیستم تشخیص خطا با رویکرد حالت

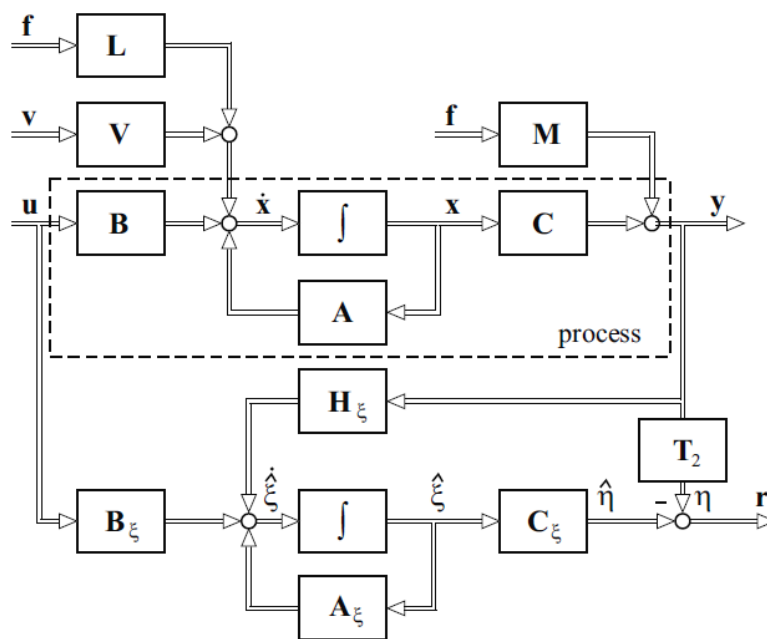
<sup>۱</sup> Unknown Input

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود علاوه بر عملکرد فرآیند اصلی، رویتگر به‌طور موازی با آن، متغیرهای موردنیاز را تخمین زده و با خروجی اصلی سیستم مقایسه می‌نماید.

### رویتگر خروجی

روش‌های کلاسیک رویتگر حالت برای تخمین متغیرهای حالت به کار می‌رود. به‌هرحال اگر دقیقاً خطا در متغیرهای حالت موردنیاز نباشد، می‌توان از رویتگرهای خروجی یا رویتگرهای تابعی برای تشخیص خطا استفاده کرد.

بلوک دیاگرام عملکرد رویتگرهای خروجی در شکل ۶-۱ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱: سیستم تشخیص خطا با استفاده از رویتگر خروجی

اگر معادلات حاکم بر سیستم را به صورت معادلات (۱۱-۱) در نظر بگیرید [۶]:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Vv(t) + Lf(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Mf(t) \end{aligned} \quad (11-1)$$

هدف اصلی، تولید باقی مانده‌ای است که مستقل از ورودی‌های ناشناخته  $v(t)$  باشد. برای رسیدن به این هدف از یک انتقال خطی به صورت معادله (۱۲-۲) استفاده می‌شود:

$$\xi(t) = T_1 x(t) \quad (12-1)$$

به این ترتیب متغیرهای جدید  $\xi(t)$  ساخته می‌شوند. خروجی رویتگر موردنظر  $\eta(t)$  است بنابراین هیچ ارتباط مستقیمی بین خروجی  $v(t)$  فرایند و خروجی خطا وجود ندارد و می‌توان نوشت:

$$\eta(t) = T_2 y(t) \quad (13-1)$$

### ۳-۹-۱ تشخیص خطا با استفاده از معادلات توازن

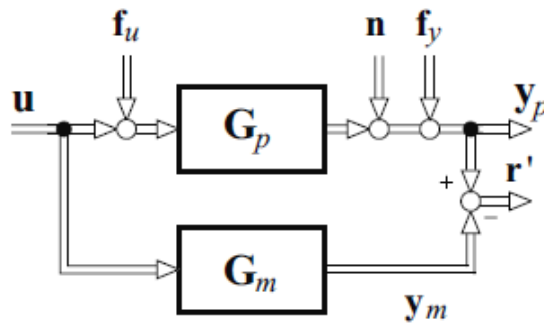
یکی از سراسرترین روش‌های مبتنی بر مدل ریاضی در سیستم‌های تشخیص خطا مقایسه سیستم اصلی و سیستم مدل شده به صورت ریاضی است. نحوه بررسی به این صورت است که یک مدل ثابت  $G_m$  موازی با فرآیند  $G_p$  به طور هم‌زمان اجرا می‌شود و تفاضل رفتاری این دو سیستم، مطابق با روند نشان داده شده در شکل ۷-۱ خطای خروجی را تولید می‌کنند.

$$r(t) = [G_p(s) - G_m(s)]u(s) \quad (14-1)$$

همان‌طور که در معادله (۱۴-۱) داده می‌شود در صورت بروز هرگونه اتفاقی که موجب عدم هماهنگی مدل فیزیکی و مدل ریاضی آن گردد خروجی باقی مانده از مقدار صفر خارج شده و این عدم هماهنگی را اعلام می‌کند.



عملکرد کلی این سیستم در شکل ۷-۱ نشان داده شده است [۳].



شکل ۷-۱: تولید باقی مانده با استفاده از معادلات توازن

فرض کنید که مدل اصلی سیستم فیزیکی را بتوان توسط تابع تبدیلی به فرم معادله (۲-۱۵) بیان کرد:

$$G_p(s) = \frac{y_p(s)}{u(s)} = \frac{B_p(s)}{A_p(s)} \quad (15-1)$$

اگر سیستم مدل شده ریاضی آن را به صورت معادله (۲-۱۶) در نظر گرفته شود:

$$G_m(s) = \frac{y_m(s)}{u(s)} = \frac{B_m(s)}{A_m(s)} \quad (16-1)$$

به طوری که پارامترهای آن به طور کامل شناخته شده و دارای مقدار ثابتی باشند:

$$G_p(s) = G_m(s) + \Delta G_m(s) \quad (17-1)$$

به طوری که  $\Delta G_m(s)$  خطای مدل کردن را نشان می دهد. مشابه با حالت تخمین پارامتر در این روش نیز می توان به دو صورت باقی مانده را محاسبه نمود. حالت اول آن خطای خروجی و حالت دوم آن خطای چند جمله ای است. نحوه عملکرد ساختار خطای چند جمله در شکل ۷-۱ نشان داده شده است.

با توجه به این ساختار سیگنال باقی مانده را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$r(s) = A_m(s)y(s) - B_m(s)u(s) = A_m(s)[G_p(s)[u(s) + f_u(s) + n(s) + f_y] - B_m(s)u(s)] \quad (18-1)$$

اگر مدل ریاضی و مدل فیزیکی کاملاً بر هم منطبق باشند، آنگاه سیگنال باقی مانده برابر با معادله (۱۹-۱) خواهد بود.

$$r(s) = A_m(s)[n(s) + f_y] - B_m(s)f_u(s) \quad (19-1)$$

همان طور که از معادله (۱۹-۱) دیده می شود، خطای جمع شونده در ورودی توسط چندجمله ای  $B_m(s)$  مدل فیلتر می شود و همچنین خطای ضرب شونده در خروجی نیز از فیلتر  $A_m(s)$  عبور می کند و می تواند باعث افزایش درجه مشتق چندجمله ای گردد. در این روش برای فرآیندهای SISO فقط یک باقی مانده می توان تولید نمود و بنابراین این تمایز بین خطاها آسان نیست. آزادی بیشتر در طراحی معادلات توازن زمانی به دست می آید که برای فرآیندهای SISO یا برای فرآیندهای MIMO برای مدل زمان پیوسته سیگنال های میانی نیز قابل اندازه گیری باشند. از این روش برای بررسی صحت مدل سازی فرآیند نیز استفاده می شود. طراحی در این روش هم می تواند بر اساس معادلات حالت و هم بر اساس توابع تبدیل سیستم صورت بگیرد.

## ۱-۱۰ روش های تشخیص عیب مبتنی بر سیگنال

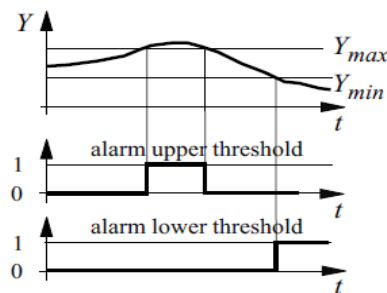
تشخیص عیب بر اساس اندازه گیری سیگنال در حالت ساده با استفاده از بررسی حدود یا بررسی روند و یا در حالت پیچیده تر از مدل های خاص سیگنال، روش های استخراج ویژگی های خاص سیگنال و تشخیص تغییر استفاده می شود. روش های متناظر به تفصیل در مرجع [۳] آورده شده است.

### ۱-۱۰-۱ روش بررسی حدود

در حالت کلی، دو مقدار حدی بیشینه  $Y_{max}$  و کمینه  $Y_{min}$ ، که آستانه نامیده می‌شوند، در نظر گرفته می‌شوند. در حالت عادی داریم:

$$(20-1)$$

این رابطه، بیانگر این مفهوم است که اگر متغیر نمایش داده شده ( $Y$ ) در محدوده‌ای مشخص مانند رابطه بالا صدق کند، آنگاه می‌توان گفت که سیستم در شرایط عادی و نرمال کار می‌کند. اگر یکی از حدود بالا یا پایین نقض شود، نشان‌دهنده این مطلب است که عیبی در فرآیند رخ داده است. شکل ۸-۱ را مشاهده کنید. این روش ساده در بسیاری از سیستم‌های خودکار استفاده می‌شوند. مقادیر آستانه، معمولاً بر اساس تجربه و برقراری مصالحه انتخاب می‌شوند. این مصالحه میان تشخیص سریع عیب و اجتناب از هشدارهای اشتباه برقرار است.



شکل ۸-۱: بررسی حدود: مقادیر مطلق  $Y(t)$

### ۲-۱۰-۲ روش بررسی روند

یک روش ساده و ممکن برای بررسی روند حرکت، محاسبه مشتق اول  $\dot{Y} = \frac{dy}{dt}$ ، روند متغیر نمایش داده شده و بررسی حدود زیر:

$$\dot{Y}_{min} < \dot{Y}(t) < \dot{Y}_{max} \quad (21-1)$$

اگر آستانه نسبتاً کوچک انتخاب شود، هشداردهنده می‌تواند زودتر از بررسی حدود مقادیر مطلق به صدا درآید. برای نمونه، از بررسی روند برای اندازه‌گیری فرسودگی ماشین‌ها استفاده می‌شود. بررسی حدود مقادیر مطلق و روند می‌تواند باهم ترکیب شوند. از دیگر روش‌های موجود برای تشخیص عیب مبتنی بر سیگنال، استفاده از آستانه دودویی، تطبیقی و بررسی‌های معقول است که برای مطالعه بیشتر می‌توان به [۳] مراجعه کرد.

## ۱۱- اهداف تحقیق

پیش‌تر به دلایل نیاز حیاتی سیستم‌های کنترلی به تشخیص عیوب پرداختیم. یکی از شرایط تشخیص عیب نیاز به مقاوم بودن آن می‌باشد. تشخیص خطا مبتنی بر مدل از مدل ریاضی استفاده می‌کند. بهترین مدل دارای قابلیت اطمینان و کارایی در FDI می‌باشد. با این حال مدل‌سازی خطاها و اغتشاش اجتناب‌ناپذیر است، و از این رو نیاز به توسعه الگوریتم‌های FDI مقاوم وجود دارد. در یک سیستم FDI، باقی‌مانده باید به عدم قطعیت، غیر حساس باشد، در حالی که حساس به خطاها است، و در نتیجه مقاوم باشد. هر دو خطاها و مدل‌سازی عدم قطعیت (اغتشاشات و خطاهای مدل‌سازی) تحت تأثیر باقی‌مانده قرار دارند. ذات FDI مقاوم، به تبعیض بین آن‌هاست. مقاوم بودن نسبت به اغتشاش و خطای مدل‌سازی. در این تحقیق به تشخیص عیب مقاوم توربین بادی در حضور اغتشاشات و خطای سیستم به روش سنتز مقاوم پرداخته شده است.

## ۱۲-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم به معرفی سیستم توربین بادی و مدل آن و انواع خطاهای وارد بر سیستم پرداخته شد. در فصل سوم درباره روش‌های مقاوم و روش اتخاذ شده در این تحقیق توضیح داده شده است. در فصل چهارم روش انتخاب شده را بر روی سیستم اعمال نموده و روی‌نگر طراحی گردید. در فصل پنجم نتیجه‌گیری لازم را انجام و پیشنهادهای را برای کارهای آینده ارائه دادیم.

## توربین‌های بادی

امروزه یکی از بزرگ‌ترین معضلات بشر کمبود سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی آن می‌باشد. با پیشرفت روزافزون فناوری استفاده از انرژی بادی به‌عنوان سرآمد انرژی‌های موجود، در اختیار بشر قرار گرفته است. در سال‌های اخیر بحران‌های نفتی و آلودگی‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و شتاب فزاینده بشر در جهت پایان بردن این منابع، تمایلات جدیدی در زمینه فناوری استفاده از باد جهت تولید برق، متصل به شبکه ایجاد کرده است. با توجه به محدودیت منابع انرژی سوخت فسیلی و افزایش روزافزون قیمت آن و از سوی دیگر مسئله آلودگی‌های ناشی از این منابع، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در تولید انرژی برق اهمیت ویژه‌ای یافته است و در سال‌های اخیر به یکی از موضوعات مورد بحث مبدل گشته و پیشرفت‌های جهانی نیز در این زمینه حاصل شده است [۸]. باد یکی از مظاهر انرژی خورشیدی و همان هوای متحرک است و پیوسته جز کوچکی از تابش خورشید که از خارج به اتمسفر می‌رسد، به انرژی باد تبدیل می‌شود. گرم شدن زمین و جو آن به‌طور نامساوی سبب تولید جریان‌های همرفت (جابجایی) می‌شود و نیز حرکت نسبی جو نسبت به زمین سبب تولید باد است. دو در صد از انرژی خورشید که به زمین می‌رسد به باد تبدیل می‌گردد. ۳۵٪ انرژی در ضخامت یک کیلومتری از سطح زمین موجود است. محاسبات نشان می‌دهد، که برای تمام سیاره زمین، انرژی موجود بیست برابر انرژی مصرفی فعلی دنیا است [۹]. آلودگی محیطی و کمبود انرژی منجر به توجهات زیادی در رابطه با فناوری‌های تولید انرژی الکتریکی تجدید پذیر شده است. از میان منابع انرژی تجدید پذیر مختلف، انرژی بادی یک منبع پیش‌تاز در صنعت برق می‌باشد [۱۰].

## ۱-۲ تاریخچه

اولین استفاده‌ها از انرژی باد به استفاده جهت در توربین‌های چرخان به آسیاب‌های بادی برمی‌گردد. نخستین آسیاب‌های بادی، کاملاً از آسیاب‌های بادی معروف هلندی، که تصویر آن‌ها در ذهن بسیاری از ما ثبت شده است، متفاوت بود. تعداد پره‌های این آسیاب‌ها به ۱۲ عدد می‌رسید و پره‌ها از بالای یک دیرک عمودی، همانند بادبان‌های یک کشتی که از فراز دکل و بازوی افقی دکل آویزان‌اند، آویخته شده

بود. شاید بتوان شکل کلی این آسیاب‌ها را با چرخ و فلک‌های شهربازی‌های امروزی مقایسه کرد که محور اصلی آن‌ها در مرکز یک دایره روی زمین نصب شده است و اتاقک‌های چرخ و فلک همیشه فاصله ثابتی از سطح زمین دارند. این نوع طراحی برای آسیاب‌های بادی، شاید از بادبان‌های یک کشتی، یا از چرخ‌های دعای بودائی‌های آسیایی، که با نیروی باد می‌چرخید، الهام گرفته شده باشد. استفاده از انرژی باد پیشینه دراز مدتی داشته و به حدود سده ۲ قبل از میلاد در ایران باستان بازمی‌گردد. برای نخستین بار، ایرانیان موفق شدند با استفاده از نیروی باد، دلو(دولاب) یا چرخ پا را به گردش درآورده و آب را از چاه‌ها به سطح مزارع برسانند. نخستین ماشینی که با استفاده از نیروی باد به حرکت درآمد، چرخ بادی هرون بود؛ ولی نخستین آسیاب بادی عملی، در سده ۷ میلادی در سیستان ساخته شد. پیدایش آسیاب‌های بادی در اروپا مربوط به سده‌های میانه است. نخستین مورد ثبت شده در مورد استفاده از آسیاب‌ها بادی در انگلستان مربوط به سده‌های ۱۱ و ۱۲ میلادی است. نخستین توربین بادی با کاربرد تولید برق، یک ماشین شارژ باتری بود که در ژانویه ۱۸۸۷ توسط یک مهندس اسکاتلندی به نام جیمز بلایت ساخته شد. چند ماه بعد، مخترع آمریکایی چارلز فرانسیس برانش نخستین توربین باد خودکار را برای تولید برق در کلیولند در اوهایو ساخت. در سال ۱۹۰۸، ۷۲ توربین بادی با کاربرد تولید برق (بین ۵ تا ۲۵ کیلووات) در آمریکا فعال بودند. در دهه ۱۹۳۰، توربین‌های بادی کوچک برای تولید برق موردنیاز مزارع در آمریکا، که هنوز سامانه سراسری توزیع برق راه‌اندازی نشده بود، بسیار متداول بودند. در پاییز سال ۱۹۴۱، نخستین توربین بادی در کلاس مگاوات در ورمونت راه‌اندازی شد. نخستین توربین بادی متصل به شبکه برق در بریتانیا در سال ۱۹۵۱ در جزایر اورکنی ساخته شد. در سال ۲۰۰۶ برای اولین بار در اتحادیه اروپا رشد تولید برق از انرژی‌های نو بیش از رشد تولید برق از منابع فسیلی بود. از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۶ شمسی، ظرفیت تولید برق بادی جهان از ۱۸۰۰۰ مگاوات به ۹۲۰۰۰ مگاوات افزایش یافته است. از سال ۲۰۰۰ تاکنون این صنعت سالانه ۲۵٪ رشد کرده و هر سه سال دو برابر شده است و این در شرایطی است که رشد اقتصاد جهانی یک تا دو درصد در سال بیشتر نیست [۱۱].

## ۲-۲ پارامترهای مهم در انتخاب توربین‌های بادی

مهم‌ترین مواردی را که بایستی در انتخاب توربین جهت تولید الکتریسیته در نظر گرفت عبارت‌اند از:

الف- قدرت نسبی: در این ارتباط توربین‌های بادی از نوع محور افقی به سبب تولید ضریب کارایی بهتر و توان بالا نسبت به توربین‌های محور عمودی ارجحیت دارند.

ب- ظرفیت اقتصادی: توربین‌های با ظرفیت بالا به سبب توان تولیدی بیشتر که اولاً قابل اتصال به شبکه و ثانیاً دارای توجیه اقتصادی شامل سرمایه‌گذاری اولیه و برگشت سرمایه مناسب‌تری هستند مورد توجه بیشتری می‌باشند. هرچه توربین با ظرفیت بالاتری انتخاب شود انرژی بیشتری تولید خواهد نمود و از نظر اقتصادی هزینه واحد انرژی پایین خواهد بود. لذا مناسب‌ترین آن‌ها در حال حاضر توربین‌های با قدرت ۴۰۰ کیلووات تا یک و نیم مگاوات می‌باشند.

ج- اندازه: ماشین‌های بادی که نسبت به ماشین‌های مشابه خود از قطر کمتر و توان بالاتر، در نتیجه انرژی تولید سالانه بیشتر برخوردار باشند و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشند.

د- سرعت: مولدهایی که سرعت شروع پایین داشته باشند و سرعت نامی آن‌ها نزدیک به سرعت متوسط باد در منطقه با گرایش به سمت سرعت حامل بیشترین مقدار انرژی باشند و برای سرعت انفصال بالاتری طراحی شده باشند مناسب‌ترند.

ه- نوع ساختار تعمیرات و نگهداری: هرچه ساختار توربین‌های بادی ساده‌تر و تعمیرات آن آسان‌تر باشد هزینه نگهداری آن کمتر است و برای نصب در مزارع پیشنهادی اولویت دارد.

## ۳-۲ محدودیت‌های انرژی باد و استفاده از توربین‌های بادی

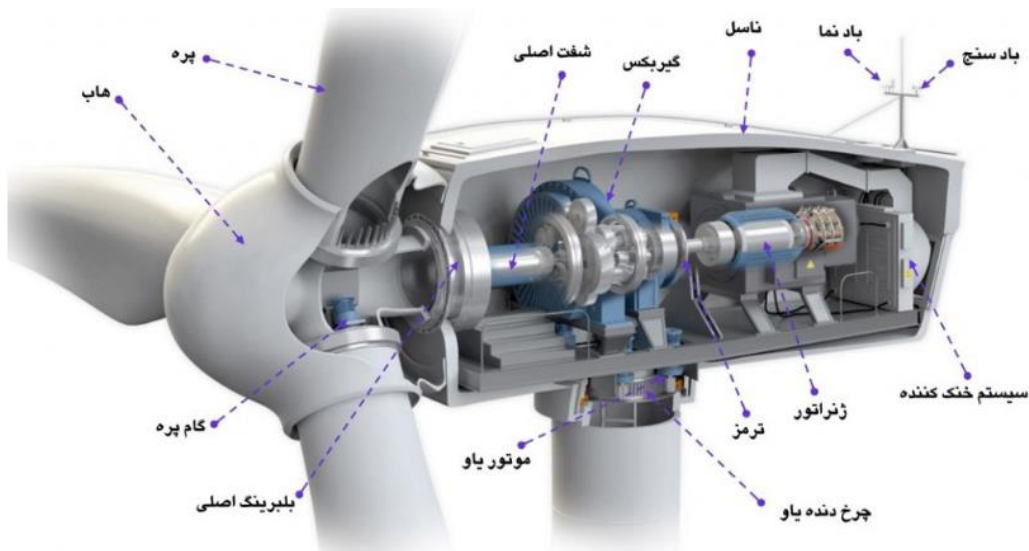
۱- هزینه اولیه طراحی، ساخت و یا خرید بالا

۲- محدودیت در دسترسی به منابع بادی مناسب



## ۴-۲ اجزای توربین بادی

شکل ۱-۲ اجزای بکار رفته در توربین بادی ساخت کارخانه نورد تانک<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد [۱۲].



شکل ۱-۲: اجزای توربین بادی

۱. بادسنج (Anemometer): این وسیله سرعت باد را اندازه گرفته و اطلاعات حاصل از آن را به

کنترل کننده‌ها انتقال می‌دهد.

۲. پره‌ها (Blades): بیشتر توربین‌ها دارای دو یا سه پره می‌باشند. وزش باد بر روی پره‌ها باعث بلند

کردن و چرخش پره‌ها می‌شود.

۳. ترمز (Brake): از این وسیله برای توقف رو تور در مواقع اضطراری استفاده می‌شود. عمل ترمز

کردن می‌تواند به صورت مکانیکی، الکتریکی یا هیدرولیکی انجام گیرد.

۴. کنترلر (Controller): کنترلرها وقتی که سرعت باد به ۸ تا ۱۶ m/s می‌رسد ماشین را، راه‌اندازی

می‌کنند و وقتی سرعت از ۶۵ m/s بیشتر می‌شود دستور خاموش شدن ماشین را می‌دهند. این عمل

<sup>1</sup> Nordtank

از آن جهت صورت می‌گیرد که توربین‌ها قادر نیستند زمانی که سرعت باد به  $65 \text{ m/s}$  می‌رسد حرکت کنند زیرا ژنراتور به سرعت به حرارت بسیار بالایی خواهد رسید.

۵. گیربکس (Gear box): چرخ‌دنده‌ها به شفت سرعت‌پایین متصل هستند و آن‌ها از طرف دیگر همان‌طور که در شکل مشخص شده به شفت با سرعت بالا متصل می‌باشند و افزایش سرعت چرخش از  $30$  تا  $60 \text{ rpm}$  به سرعتی حدود  $1200$  تا  $1500 \text{ rpm}$  را ایجاد می‌کنند. این افزایش سرعت برای تولید برق توسط ژنراتور الزامی است. هزینه ساخت گیربکس‌ها بالاست در ضمن گیربکس‌ها بسیار سنگین هستند. مهندسان در حال انجام تحقیقات گسترده‌ای می‌باشند تا درایوهای مستقیمی کشف نمایند و ژنراتورها را با سرعت کمتری به چرخش درآوردند تا نیازی به گیربکس نداشته باشند.

۶. ژنراتور (Generator): که وظیفه آن تولید برق متناوب است و بیشتر از نوع ژنراتورهای القایی می‌باشد.

۷. شفت با سرعت بالا (High-speed shaft): که وظیفه آن به حرکت درآوردن ژنراتور می‌باشد.

۸. شفت با سرعت پایین (Low-speed shaft): رتور حول این محور چرخیده و سرعت چرخش آن  $30$  تا  $60$  دور در دقیقه می‌باشد.

۹. روتور (Rotor): بال‌ها و هاب به روتور متصل هستند.

۱۰. برج (Tower): برج‌ها از فولادهایی که به شکل لوله درآمده‌اند ساخته می‌شوند. توربین‌هایی که بر روی برج‌هایی با ارتفاع بیشتر نصب شده‌اند انرژی بیشتری دریافت می‌کنند.

۱۱. جهت باد (Wind direction): توربین‌هایی که از این فناوری استفاده می‌کنند در خلاف جهت باد نیز کار می‌کنند درحالی که توربین‌های معمولی فقط جهت وزش باد به پره‌های آن باید از روبرو باشد.

۱۲. بادنما (Wind vane): وسیله‌ای است که جهت وزش باد را اندازه‌گیری می‌کند و کمک می‌کند تا جهت توربین نسبت به باد در وضعیت مناسبی قرار داشته باشد.

۱۳. درایو انحراف (Yaw drive): وسیله ایست که وضعیت توربین را هنگامی که باد در خلاف جهت می‌وزد کنترل می‌کند و زمانی استفاده می‌شود که قرار است روتور در مقابل وزش باد از روبرو قرار گیرد اما زمانی که باد در جهت توربین می‌وزد نیازی به استفاده از این وسیله نمی‌باشد.

۱۴. موتور انحراف (Yaw motor): برای به حرکت درآوردن درایو انحراف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۲-۵ انواع توربین‌های بادی

پره توربین‌های بادی می‌تواند به دور محور افقی یا عمودی دوران کند. توربین بادی با محور افقی، پیشینه بیشتری داشته و امروزه هم بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقابل، مزیت توربین بادی با محور عمودی، عدم حساسیت نسبت به جهت وزش باد و عدم نیاز به یک پایه مرتفع است.

### ۲-۵-۱ توربین بادی با محور افقی

در توربین‌های بادی با محور افقی که <sup>۱</sup>HAWT هم نامیده می‌شوند، روتور و ژنراتور الکتریکی در بالای یک برج بلند قرار گرفته و باید در راستای باد قرار گیرند. توربین‌های بادی کوچک برای تعیین جهت وزش باد از یک بادنمای ساده استفاده می‌کنند، ولی توربین‌های بزرگ‌تر معمولاً از یک حس‌گر باد که با یک سروموتور در ارتباط است، استفاده می‌کنند. بیشتر این توربین‌های بادی، با استفاده از یک جعبه‌دنده، سرعت چرخش گند پرها را به سرعت بیشتری برای ژنراتور تبدیل می‌کنند.

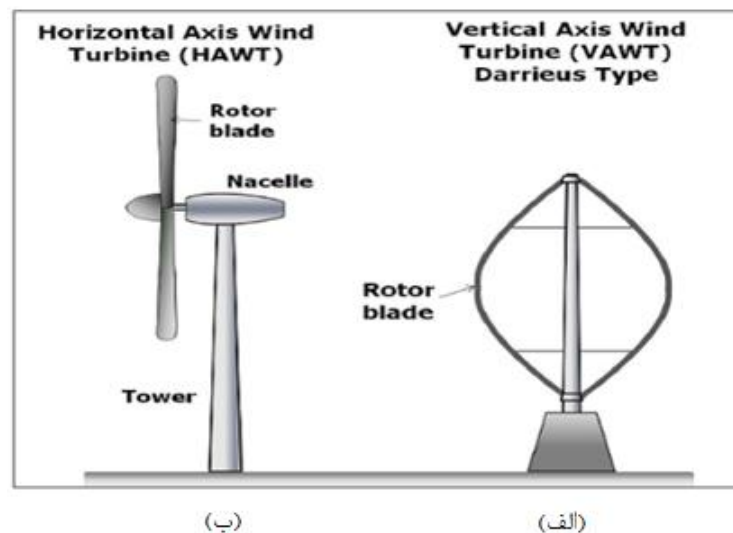
---

<sup>1</sup> Horizontal Axis Wind Turbine

## ۲-۵-۲ توربین‌های باد با محور عمودی

در توربین‌های بادی با محور عمودی که  $VAWT^1$  نامیده می‌شود، روتور اصلی به صورت عمودی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین برتری این نوع از توربین‌های بادی آن است که نیازی به تنظیم جهت قرارگیری نسبت به جهت وزش باد ندارند. این نکته در مکان‌هایی که جهت وزش باد خیلی متغیر است، مثلاً در بالای ساختمان‌های مسکونی، یک امتیاز به شمار می‌رود. مهم‌ترین عیب این نوع توربین‌ها، کم بودن سرعت دورانی آن‌ها و در نتیجه زیاد بودن گشتاور و هزینه بیشتر سیستم انتقال قدرت، بارگذاری دینامیکی زیاد پره‌ها و همچنین پیچیدگی زیاد طراحی و تحلیل پره‌ها پیش از ساخت پیش‌نمونه است. با توجه به عمودی بودن محور، جعبه‌دنده و ژنراتور می‌توانند در نزدیکی زمین قرار گیرند که این موضوع دسترسی به این تجهیزات را برای نگهداری و تعمیر آسان‌تر می‌کند.

توربین‌های بادی با محور عمودی به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند. دو نوع عمده آن‌ها، توربین‌های داریوس و ساوونیوس هستند.



شکل ۲-۲: الف) توربین بادی با محور عمودی ب) توربین بادی با محور افقی

<sup>1</sup> Vertical Axis Wind Turbine

## ۲-۵-۳ توربین‌های امروزی

توربین‌های بادی که امروزه در نیروگاه‌های بادی برای تولید تجاری برق مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً سه-پره بوده و با استفاده از سامانه‌های کنترل رایانه‌ای در جهت وزش باد قرار می‌گیرند. البته توربین‌های باد با دو پره و حتی یک پره هم استفاده می‌شوند. پره‌های این توربین‌ها، معمولاً طولی بین ۲۰ تا ۴۰ متر و حتی بیشتر و سرعت دورانی حدود ۱۰ تا ۲۲ دور بر دقیقه دارند. اگر طول پره یک توربین بادی، ۴۰ متر بوده و با سرعت ۲۰ دور بر دقیقه دوران کند، سرعت خطی نوک پره‌های آن، (حدود ۸۴ متر بر ثانیه) ۳۰۲ کیلومتر بر ساعت خواهد بود. برجی که پره‌ها بر بالای آن نصب می‌شوند، به صورت لوله فولادی و به ارتفاع ۶۰ تا ۹۰ متر است. معمولاً با استفاده از جعبه‌دنده، سرعت چرخش محور افزایش داده می‌شود، ولی در برخی از طراحی‌ها، محور با همان سرعت یک ژنراتور حلقوی را می‌چرخاند. برخی از مدل‌های توربین بادی، در سرعت ثابت کار می‌کنند ولی توربین‌های با سرعت متغیر انرژی بیشتری می‌توانند تولید کنند؛ که به واسطه نیروی لیفت و دراگ پره‌ها به حرکت درمی‌آیند.

## ۲-۶ انواع ژنراتورهای توربین بادی

انواع مختلفی از ژنراتورهای AC به منظور تبدیل انرژی مکانیکی باد به انرژی الکتریکی، چه در سطح تحقیقات و چه در سطح صنعت، به کار گرفته شده است. از جمله این ژنراتورها می‌توان به ژنراتورهای القایی با روتور قفسه سنجابی و سیم‌پیچی شده، ژنراتورهای سنکرون با روتور سیم‌پیچی شده و مغناطیس دائم و ... اشاره کرد.

## ۲-۷ دسته‌بندی خطاهای امکان‌پذیر در توربین بادی

خطا پدیده‌ای است که می‌تواند در قسمت‌های مختلف یک سیستم تحت کنترل، اتفاق بیفتد. به همین دلیل خطاها را بر مبنای آن که در کدام قسمت از سیستم رخ می‌دهند، دسته‌بندی می‌کنند [۱۳].

۱- خطای حس گر: این نوع خطا نشان‌دهنده اطلاعات نادرستی است که حس‌گر در اختیار سیستم قرار می‌دهد.

۲- خطای محرک: این خطا باعث از بین رفتن کامل و یا جزئی کنترل سیستم می‌شود. به‌عنوان مثال یک محرک کاملاً از دست‌رفته، محرکی است که بدون توجه به ورودی اعمال‌شده به آن، هیچ عمل تحریکی انجام نمی‌دهد.

۳- خطای عنصر<sup>۱</sup>: خطاهایی که در اجزای سیستم اتفاق می‌افتند و تمامی خطاهایی که نتوان آن‌ها را به‌عنوان خطای محرک یا خطای حس‌گر در نظر گرفت، خطای عنصر هستند. در واقع این نوع خطا بیانگر تغییر در پارامترهای فیزیکی سیستم می‌باشند که معمولاً باعث تغییر در رفتار دینامیکی سیستم تحت کنترل می‌شوند.

## ۲-۸ مدل‌سازی توربین بادی

توربین بادی به‌وسیله منحنی بدون بعد ضریب توان ( $C_p$ ) و همچنین یک تابع از نرخ سرعت ( $\lambda$ ) و درجه تیغه ( $\beta$ ) مشخص می‌شود. به‌منظور محدود کردن فشار مکانیکی و کنترل توان مکانیکی از تیغه استفاده می‌شود.  $\lambda$  نرخ سرعت خطی در نوک تیغه در سرعت باد می‌باشد که می‌توان آن را به‌صورت زیر نشان داد [۱۴]:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v_w} \quad (1-2)$$

که در آن  $R$  شعاع روتور توربین بادی،  $\omega_r$  سرعت زاویه‌ای روتور توربین بادی و  $V_w$  سرعت باد می‌باشد.

برای توربین بادی می‌توان یک فرمول تقریبی برحسب  $\lambda$  و  $\beta$  برای  $C_p$  در نظر گرفت:

---

<sup>1</sup> Component

$$C_p = (0.44 - 0.017\beta) \sin \left[ \frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} \right] - 0.0018(\lambda - 3)\beta \quad (2-2)$$

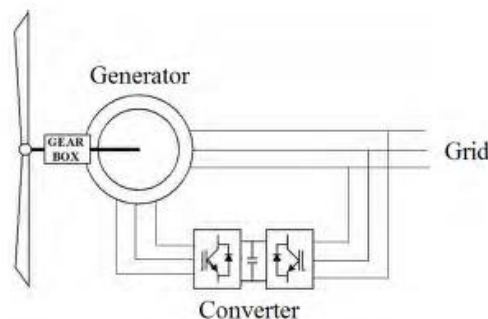
و توان دریافت شده از روتور بصورت زیر می باشد:

$$P_r(t) = 0.5 \rho A v_w^3(t) C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (3-2)$$

گشتاور مکانیکی خروجی توربین بادی به وسیله معادله زیر محاسبه می شود که  $\rho$  چگالی هوا و  $A$  فضای جاروب شده توسط تیغه می باشد [۱۵]:

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A R C_p v_m^2 / \lambda \quad (4-2)$$

توربین بادی عمودی با سه پره، متداول ترین نوع توربین است که به سبب اهمیتی که دارد در این تحقیق در نظر گرفته شده است. در این سیستم، روتور توان باد را جذب و به سرعت گردش تبدیل می کند. چرخ دنده سرعت گردش پایین روتور را به سرت بالا در سمت ژنراتور تبدیل می کند. ژنراتور یک موتور القایی دوسویه<sup>۱</sup> DFIG است که به شبکه متصل می باشد. سرعت متغیر شنت ژنراتور از طریق یک کانورتر به ولتاژی با فرکانس ثابت تبدیل می شود. شکل ۲-۳ اجزای توربین بادی و نحوه ارتباط آن ها را نشان داده است.



شکل ۲-۳: ساختار توربین بادی با ژنراتور دوسویه

<sup>1</sup> Doubly Fed Induction Generator

توان آیرودینامیکی که توسط باد، پره‌ها را می‌گرداند در معادله ۲-۵ نشان داده شده است که کسری از کل توان باد است، که این کسر توسط ضریب توان ( $C_p$ ) تعیین می‌شود و تابعی غیرخطی از زاویه پره‌ها و نسبت نوک سرعت پره ( $\lambda = R\omega_r / V$ ) است.

$$T_a(\omega_r(t), \beta(t), V(t)) = \frac{\rho\pi R v_r(t)^2}{2\lambda(t)} C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (۵-۲)$$

گشتاور آیرودینامیکی باعث چرخش روتور و چرخ‌دنده متصل به آن می‌شود، به طوری که معادلات این اجزا با استفاده از قانون دوم نیوتون به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\omega}_r(t) = \frac{1}{J_r} (T_a(\omega_r(t), \beta(t), V(t)) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_g - K_{dt} \theta_\Delta(t) - (B_{dt} + B_r) \omega_r(t)) \quad (۶-۲)$$

$$\dot{\omega}_g(t) = \frac{1}{J_g} (\frac{K_{dt}}{N_g} \theta_\Delta(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_r(t) - (\frac{B_{dt}}{N_g^2} + B_g) \omega_g(t) - T_g(t)) \quad (۷-۲)$$

$$\dot{\theta}_\Delta(t) = \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t) \quad (۸-۲)$$

که در روابط بالا:

$R$ : شعاع موثر پره روتور       $B_g$ : ضریب میرایی شفت ژنراتور       $J_r$ : اینرسی روتور       $B_{dt}$ : ضریب میرایی چرخ‌دنده  
 $N_g$ : نسبت چرخ‌دنده       $K_{dt}$ : ضریب سختی فنر چرخ‌دنده       $T_g$ : گشتاور ژنراتور       $v_r$ : سرعت باد  
 $\omega_r$ : سرعت چرخشی       $\omega_g$ : سرعت چرخشی ژنراتور       $\beta$ : زاویه پره       $\theta_\Delta$ : انحراف پیچشی چرخ‌دنده

روتور

می‌باشند.



تشخيص عيب مقاوم

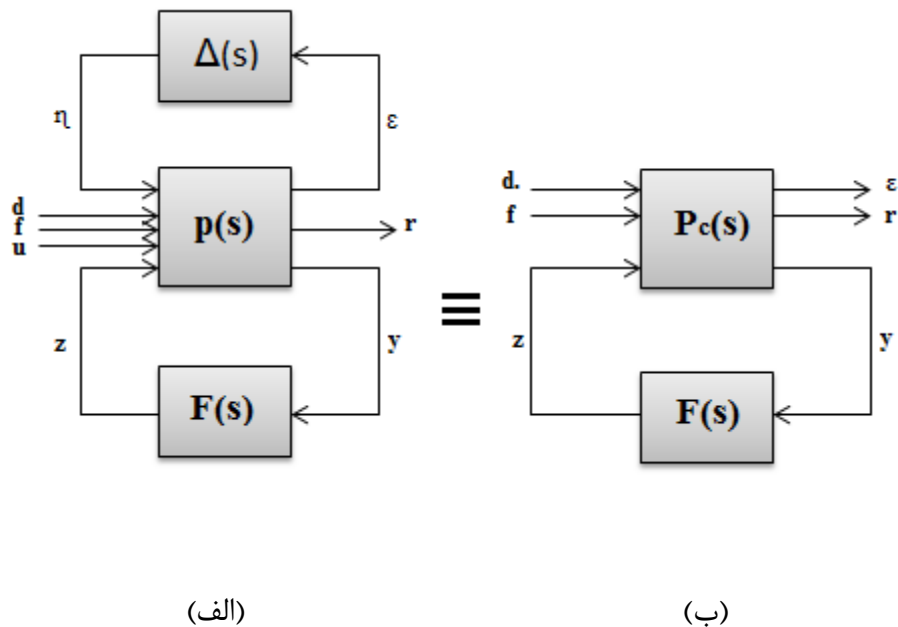
تشخیص عیب مقاوم با استفاده از روش‌هایی نظیر  $H_2/H_\infty$  و سنتز  $\mu$  صورت می‌گیرد که در آن به طراحی رویتگری می‌پردازد که نسبت به اغتشاشات و خطا مقاوم می‌باشد که عملکرد آن به‌گونه‌ای است که تأثیر خطا روی مدل را بیشینه می‌کند تا عیب را به‌وسیله سیگنال باقیمانده تشخیص دهد و سیستم در مقابل اغتشاش مقاوم باشد تا به کار خود ادامه دهد [۱۶].

هدف کلی طراحی :

$$\frac{\|G_{rf}\|_\infty}{\|G_{rd}\|_\infty} > \alpha \quad (1-3)$$

### ۱-۳ روش $H_\infty$

فرم استاندارد برای FDI به روش  $H_\infty$  در شکل ۱-۳ نمایش داده شده است که P سیستم نامی به همراه مدل نامعینی  $\Delta$  و تخمینگر F می‌باشد [۱۷].



شکل ۱-۳: الف) نمایش تابع انتقال عمومی FDI ( $H_\infty$ ) ب) تابع انتقال ترکیبی

که معادلات فضای حالت آن به صورت زیر می باشد:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Q\eta(t) + E_1d(t) + Bu(t) + R_1f(t) \quad (۲-۳)$$

$$\varepsilon(t) = Sx(t) + T\eta(t) + Td(t) + Tu(t) + Tf(t) \quad (۳-۳)$$

$$e(t) = Mx(t) - Tz(t) \quad (۴-۳)$$

$$y(t) = Cx(t) + R\eta(t) + E_2d(t) + Du(t) + R_2f(t) \quad (۵-۳)$$

$$r(t) = y(t) - y(t) \quad (۶-۳)$$

که در آن:

$x$ بردار حالت	$y$ خروجی اندازه گیری شده	$f$ نشان دهنده خطاها
$d$ اغتشاشات	$\eta, \varepsilon$ سیگنال های ورودی و خروجی از نامعینی	$e$ خطای تخمین
$M$ ماتریس وزنی	$A, B, C, D, E_1, E_2, R_1, R_2$ ماتریس های ثابت مناسب	$Q, R, S, T$ ماتریس های ثابت

### اهداف طراحی:

$$\|G_{rd}(j\omega)\|_{\infty} < \gamma \quad (۷-۳)$$

که  $G_{rd}$  تابع انتقال از  $d$  به  $r$  می باشد.

$$\|G_{rf}(j\omega)\|_{\infty} > \beta \quad (۸-۳)$$

که در آن  $G_{rf}$  تابع انتقال از  $f$  به  $r$  می باشد. که این شرایط نمایانگر کاهش تأثیر اغتشاش و افزایش

تأثیر خطا روی  $r$  می باشد که می توان این شرایط را به روش حل ماتریس LMI برآورده ساخت.

در این تحقیق روش سنتز  $\mu$  اتخاذ گردیده که به توضیح آن می پردازیم:

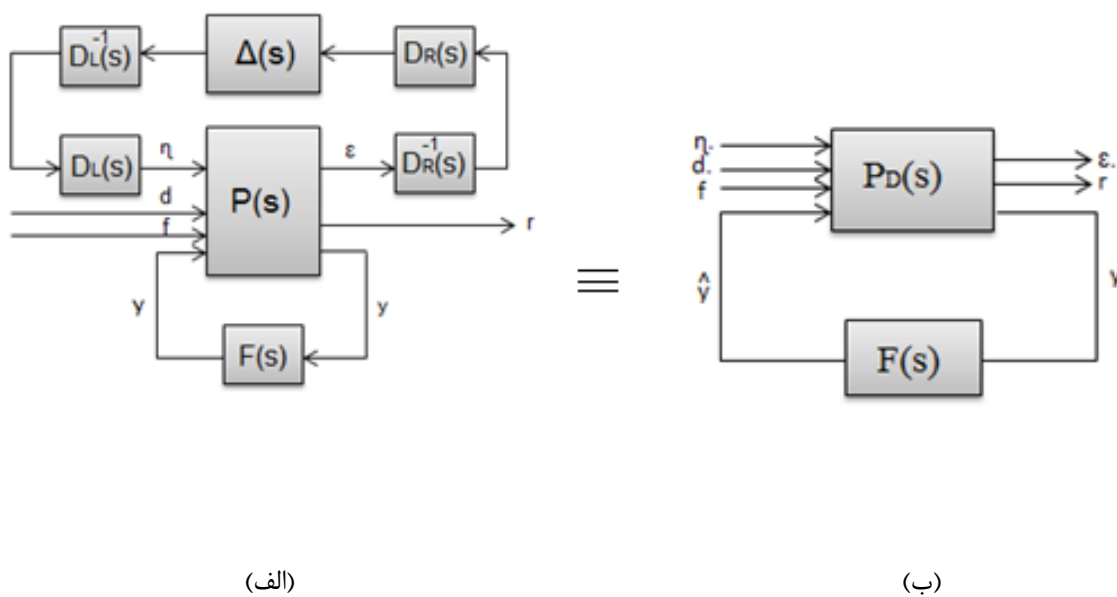
مقدار تکین ساختاریافته ( $\mu$ ) ابزار مناسبی برای بررسی مقاومت و آنالیز سیستم‌هایی با توابع خطی (LFT) دارای ساختار است. برای به دست آوردن مقادیر ویژه ساختاریافته یا  $\mu$  یک ماتریس، لازم است تا ساختار ماتریس عدم قطعیت مرتبط با آن را بدانیم.  $\mu$  یک ماتریس در واقع کوچک‌ترین (برحسب بزرگ‌ترین مقدار منفرد) عدم قطعیتی را محاسبه می‌کند که سبب ناپایداری آن می‌شود. اگر ساختار ماتریس عدم قطعیت را قطری بلوکی در نظر بگیریم، می‌توان بلوک‌های عدم قطعیت را به دودسته بلوک‌های کامل و بلوک‌های اسکالر تقسیم کرد. به دست آوردن مقادیر ویژه ساختاریافته یک ماتریس با توجه به نحوه مدل‌سازی عدم قطعیت، مسئله‌ای است که هنوز به‌طور کامل حل نشده است. البته قضایایی وجود دارند که می‌توان از آن‌ها برای محاسبه حدود بالا و پایین  $\mu$  استفاده کرد. بر طبق این قضایا، حد بالای  $\mu$  تنها برای ساختارهای عدم قطعیتی که جمع وزن‌دار بلوک‌های اسکالر و کامل آن‌ها از حد معینی بالاتر نرود، با مقدار  $\mu$  ماتریس برابر می‌شود. در صورتی که حد پایین برای همه ساختارهای عدم قطعیت، با مقدار  $\mu$  ماتریس برابر می‌شود. لازم به ذکر است مسئله محاسبه حد پایین  $\mu$  به دلیل داشتن ماکزیمم‌های محلی زیاد به‌سختی قابل حل است. کنترل مقاوم از مقادیر ویژه ساختاریافته به‌عنوان معیاری برای بررسی پایداری و عملکرد مقاوم یک سیستم حلقه بسته استفاده می‌شود. طراحی کنترل‌کننده با استفاده از این معیار مسئله سنتز  $\mu$  نامیده می‌شود.

در حقیقت مسئله سنتز  $\mu$  هنوز به‌طور کامل حل نشده است [۱۸]. البته روشی به نام تکرار D-K وجود دارد که از آن برای حل مسئله سنتز  $\mu$  استفاده می‌شود. روش تکرار D-K بهترین عملکرد مقاوم سیستم حلقه بسته را که متناظر با مینیمم سازی معیار عملکرد  $\mu$  می‌باشد با استفاده از FDI و ماتریس مقیاس شده D به دست می‌آورد. این روش مسئله مینیمم سازی را در دو حالت مختلف انجام می‌دهد. در حالت اول مینیمم سازی روی ماتریس D انجام می‌شود و F ثابت نگه‌داشته می‌شود. در حالت دیگر

مینیمم سازی روی  $F$  انجام می‌شود و ماتریس  $D$  ثابت نگه‌داشته می‌شود. در این روش مقادیر ویژه ساختاریافته با استفاده از حد بالای  $\mu$  محاسبه می‌شوند. با توجه به آنچه در مورد محاسبه حد بالای  $\mu$  بیان شد می‌توان نتیجه گرفت که روش تکرار  $D-K$  حل دقیق مسئله سنتز  $\mu$  می‌باشد.

### ۳-۲-۱ نمای عمومی تابع انتقال سنتز $\mu$

در شکل (۳-۲) به همراه توابع وزنی نمایش داده شده است:



شکل ۳-۲: الف) تابع انتقال سیستم همراه با نامعینی ب) تابع انتقال ترکیبی

مسئله طراحی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۹]:

$$\min_k \inf_{DD^{-1}H_\infty} \|DF_L(P, F)D^{-1}\|_\infty \quad (۱۰-۳)$$

که در آن  $D_L, D_R$  ماتریس‌های وزنی نامعینی می‌باشند و  $P_D$  برابر است با:

$$P_D(s) = \begin{bmatrix} D_R^{-1}(s)T D_L(s) & D_R^{-1}(s)T & 0 \\ 0 & 0 & -I \\ E_2 D_L(s) & R_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (۹-۳)$$

حل مسئله دارای دو مرحله اصلی به صورت زیر است:

۱- ابتدا برای  $D$  پایدار و مینیمم فاز یک مقدار اولیه لحاظ کرده و با ثابت فرض نمودن آن مسئله سنتز  $\mu$  برای یافتن  $F$  حل می شود:

$$\inf_{\text{Stabilizing } f} \|DF_L(P, F)D^{-1}\|_{\infty} \quad (۱۱-۳)$$

۲- در این مرحله  $F$  به دست آمده از گام ۱ را ثابت فرض کرده مسئله کمینه سازی زیر را حل می نماییم:

$$\inf_{D_w \in D} \bar{\sigma}[D_w F_L(P, F)D_w^{-1}] \quad (۱۲-۳)$$

روند فوق را آن قدر ادامه داده تا جایی که  $D$  حاصل از روند فعلی با  $D$  به دست آمده از روند قبلی برابر گردد. در استفاده از این روش باید الگوریتم را تا جایی که عملکرد مقاوم<sup>۱</sup> تضمین شود، ادامه دهیم. روش تکرار  $D-K$  مانند غالب روش های مقاوم، با مشکل بالا بودن درجه  $FDI$  مواجه است که ناگزیر به استفاده از روش های کاهش مرتبه می باشیم. با در نظر گرفتن نامعینی ها برای حل مسئله سنتز  $\mu$  با مشکل بالا بودن درجه همراه هستیم که منجر به کاهش مرتبه آن می شود. برای رفع این اشکال از روش تخمین نرم هنکل بهینه<sup>۲</sup> استفاده گردید. در نظریه کنترل، مقادیر ویژه سیستم بیانگر پایداری آن است، در حالی که مقادیر تکین هنکل بیانگر انرژی حالت ها در سیستم است. چنانچه در هنگام کاهش مرتبه مدل، حالت های با انرژی بیشتر حذف نشوند رفتار و مشخصات سیستم بهتر حفظ و منتقل می گردند.

<sup>۱</sup> Robust Performance

<sup>۲</sup> Optimal Hankel Norm

با استفاده از روش تکرار D-K ماتریس رویتگر F به دست می‌آید که با توجه به معادلات رویتگر برابر است با:

$$F(s) = \begin{bmatrix} A - L_\mu C & L_\mu \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad (13-3)$$

با استفاده از بهره رویتگر ( $L_\mu$ ) و با توجه به معادلات ۱۴-۳ که مربوط به رویتگر می‌باشد می‌توان رویتگر موردنظر را طراحی کرد:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + L_\mu(y - y) \\ y = Cx \end{cases} \quad (14-3)$$





شبیه‌سازی

به‌طور کلی، مدل توربین باد شامل:

- مدل سرعت باد برای تولید سرعت باد که می‌تواند به توربین اعمال شود.
- مدل روتور که انرژی جنبشی در باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند.
- مدل ژنراتور برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی.
- سیستم کنترل از جمله کنترل‌کننده روتور و کنترل‌کننده ژنراتور.



شکل ۴-۱: طرح بلوکی توربین بادی

شکل ۴-۱ قسمت‌های مختلف توربین را که در تعامل با یکدیگر هستند نشان می‌دهد.

روتور، شامل تعدادی از تیغه‌ها (در بیشتر موارد ۲ یا ۳) می‌باشد که توسط باد رانده می‌شود. سرعت باد در هر مکان و در هر زمان تحت شرایط طبیعی ثابت نیست که گشتاور محرک تولیدشده توسط روتور را به‌طور کلی تغییر می‌دهد. زاویه حمله<sup>۱</sup> (جهت باد که توسط تیغه روتور احساس می‌شود) نیز بر گشتاور محرک تأثیر می‌گذارد. زاویه پره<sup>۲</sup> توربین بادی به‌طور مستقیم بر این زاویه تأثیر می‌گذارد و به این ترتیب امکان تأثیر در جذب انرژی آیرودینامیکی توسط روتور را می‌دهد. روتور با یک گیربکس به ژنراتور متصل شده است که قرار است انرژی مکانیکی را از طریق شفت‌های دوار به انرژی الکتریکی تبدیل کند و این را به شبکه عمومی انتقال دهد.

<sup>1</sup> Angle attack

<sup>2</sup> Pitch angle

## ۱-۴ معادلات فضای حالت

رفتار پویای یک سیستم توربین باد ترکیبی از آیرودینامیک، دینامیک ساختاری و پدیده تبدیل الکتریکی است. تعامل این مدل‌ها می‌تواند به‌عنوان یک مدل غیرخطی نوشته شود. با خطی سازی در اطراف نقطه عملیات و برخی از مفروضات اضافی، ما می‌توانیم معادله وضعیت خطی شدن کامل سیستم توربین باد را به دست آوریم. تمام پارامترهای معادلات خطی سازی، مقادیر نسبی در نقطه عملیاتی انتخاب شده است. با در نظر گرفتن خطاهای حس گر و اختلالات اضافی از جمله سرعت باد و ولتاژ شبکه، نویزهای اندازه‌گیری، معادله حالت خطی، به فرم زیر است [۲۰]:

$$\dot{x} = AX + Bu + E_d d$$

$$Y = CX + Du + F_d d + F_f f \quad (1-4)$$

که در آن:

$$x^T = [\theta_\Delta \quad \omega_g \quad \omega_r]$$

$$u = [\beta_r]$$

$$d^T = [v \quad u_i]$$

$$y = [P_r]$$

d اغتشاش و f خطای حس گر می‌باشند و :

$\beta$ زاویه پره‌های توربین	$v$ سرعت باد	$u_i$ ولتاژ شبکه
$\theta_\Delta$ انحراف پیچشی چرخ دنده	$\omega_r$ سرعت روتور	$\omega_g$ سرعت ژنراتور

#### ۲-۴ ماتریس‌های فضای حالت

کافی است که مشکل جدی تشخیص خطا را برای (۱-۴) بدون ورودی‌های شناخته‌شده مورد بحث قرار دهیم، بنابراین فرض می‌کنیم  $u = 0$ . سرعت باد و ولتاژ شبکه به‌عنوان اختلالات بیرونی در نظر گرفته می‌شوند؛ زیرا در نظر ما غیرقابل کنترل هستند. به‌عنوان مثال، در این تحقیق توربین سرعت متغیر ۴۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. ماتریس‌های فضای حالت در نقطه عملیاتی  $u_i = 220V$  و  $v = 16m/s$  به صورت زیر است [۲۱]:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{N_g} & 1 \\ \frac{K_{dt}}{J_g N_g} & \frac{-(B_{dt} + B_g N_g^2)}{N_g^2 J_g} & \frac{B_{dt}}{N_g J_g} \\ -\frac{K_{dt}}{J_r} & \frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{B_{dt} + B_r}{J_r} + \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0118 & 1 \\ 8143.5 & -17608 & 81.435 \\ -11.9 & 0.0014 & -18014 \end{bmatrix} \quad (۲-۴)$$

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \end{bmatrix} = [0 \quad 0 \quad 75.6] \quad (۳-۴)$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 1] \quad (۴-۴)$$

$$D = [0] \quad (۵-۴)$$

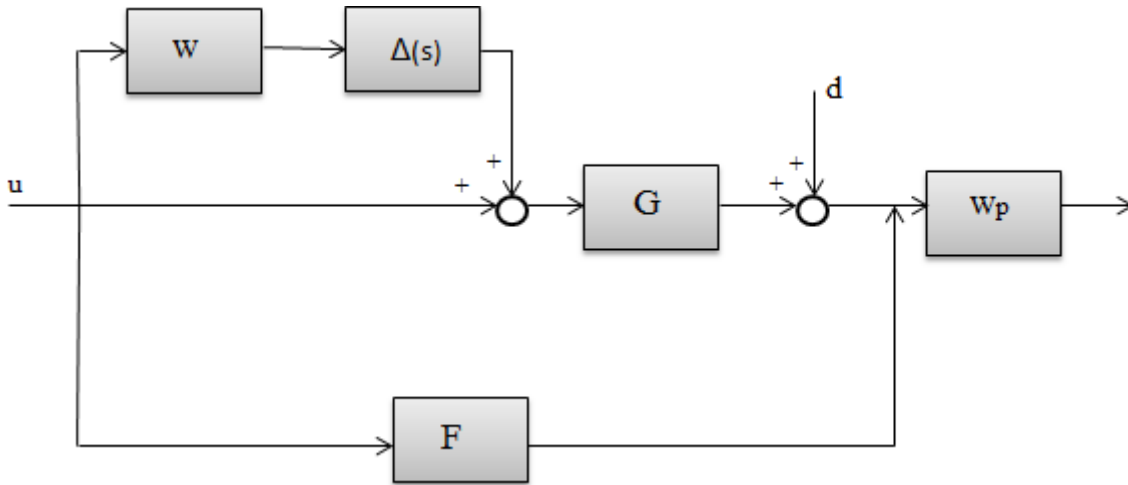
$$E_d = \begin{bmatrix} 1.3338 & 0.63615 \\ 0 & -0.63615 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (۶-۴)$$

$$F_d = [0 \quad 3.074e3] \quad (۷-۴)$$

$$F_f = [136] \quad (۸-۴)$$

تمام پارامترهای معادله حالت فوق در نقطه عملیاتی انتخاب شده است.

### ۳-۴ نامعینی‌های سیستم



شکل ۲-۴: سیستم تشخیص خطا با نامعینی

شکل ۲-۴ نمایش سیستم با نامعینی می‌باشد که طبق اهداف تحقیق این نامعینی‌ها به صورت زیر در

نظر گرفته شد [۲۲]:

$$w = e^{-s} \quad (۹-۴)$$

$$w_p = 0.5 \frac{s+20}{s+0.2} \quad (۱۰-۴)$$

### ۴-۴ استفاده از روش سنتز $\mu$

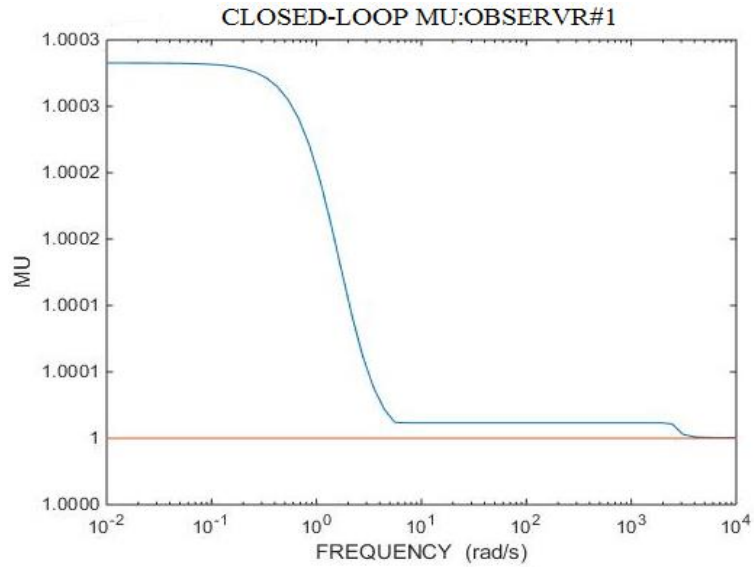
با توجه به معادله ۱۱-۴ که مسئله سنتز  $\mu$  می‌باشد:

$$\min_k \inf_{DD^{-1}H_\infty} \|DF_L(P, F)D^{-1}\|_\infty \quad (۱۱-۴)$$

حل مسئله سنتز  $\mu$  با استفاده از تکرار D-K را آن قدر ادامه می‌دهیم تا عملکرد مقاوم را تضمین کند:

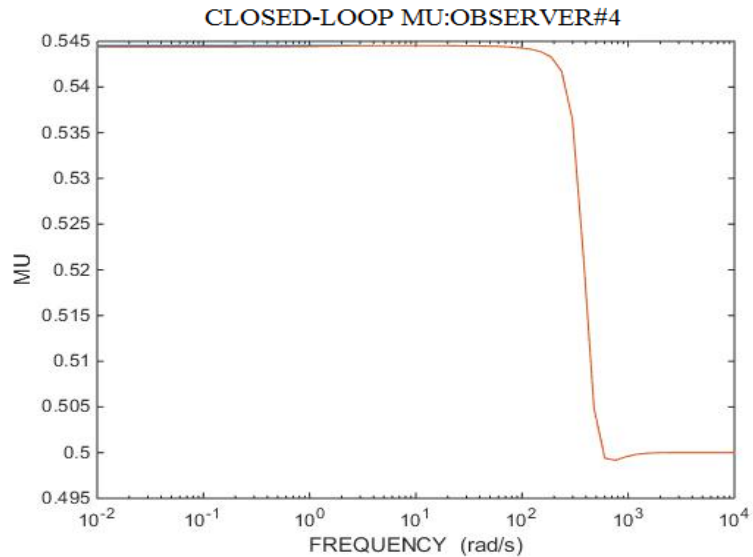
$$\text{Peak } \mu\text{-Value} < 1 \quad (۱۲-۴)$$

با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده شکل ۳-۴ عملکرد مقاوم سیستم را در طراحی مرحله ۱ نشان می- دهد که مقدار آن بیشتر از یک بوده و قابل قبول نمی باشد.



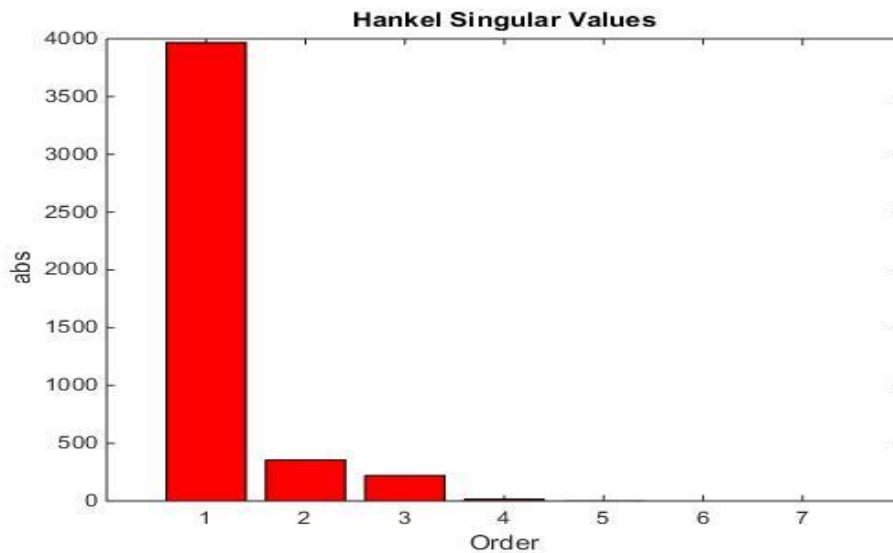
شکل ۳-۴: عملکرد مقاوم در مرحله ۱

در مرحله ۴ ملاحظه شد که مقدار بیشینه  $\mu$  از یک کمتر شده پس می توان به الگوریتم پایان داد.



شکل ۴-۴: عملکرد مقاوم در مرحله ۴

به طور کلی حل مسئله سنتز با مشکل بالا بودن درجه همراه است که برای رفع آن از قضیه مقادیر ویژه هنکل استفاده می شود تا به مراتب پایین تر کاهش یابد. که با توجه به شکل ۴-۵ نشان دهنده آن است که به مرتبه ۳ که مرتبه مورد نیاز سیستم می باشد کاهش یابد.



شکل ۴-۵: مقادیر ویژه هنکل

که در ادامه آن با توجه به معادلات ۳-۱۳ و ۳-۱۴ مقدار گین رویتگر بدین صورت به دست آمده است:

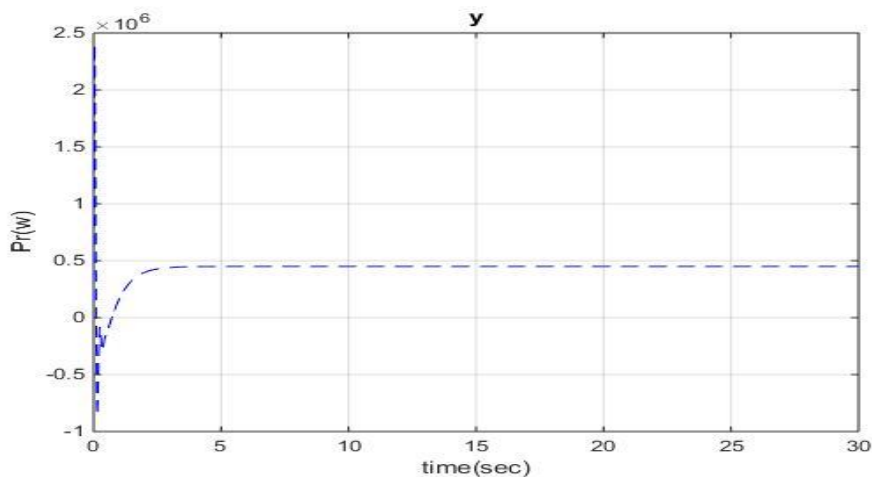
$$L = \begin{bmatrix} -1.49 \\ 0.6982 \\ -0.002525 \end{bmatrix}$$

(۴-۱۳)

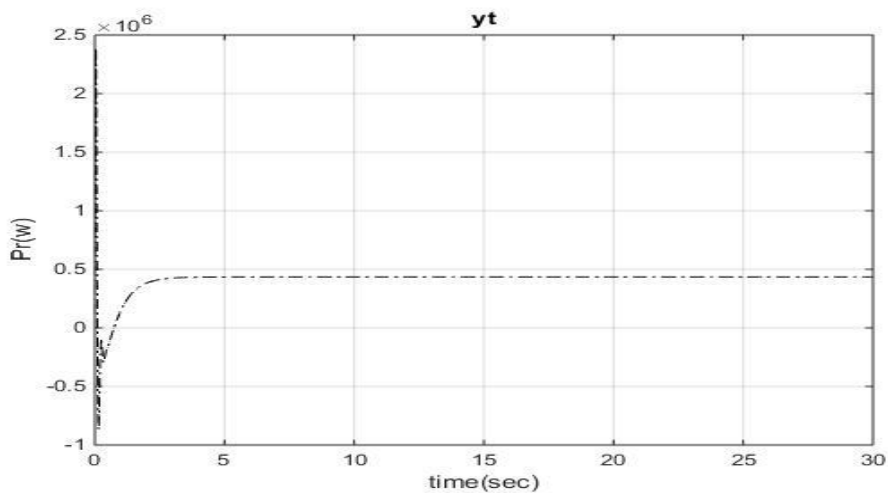
در خصوص صحت مقدار بهره به دست آمده و علامت درایه ای آن می توان مقادیر ویژه رویتگر یا به عبارتی دیگر ریشه های  $\det[\lambda I - (A - LC)]$  را به دست آمده آورد، که مقادیر آن برابر است با  $\{-0.0071, -17607.9942, -18013.99\}$ ، مشاهده می شود که قطب های رویتگر در سمت چپ محور  $j\omega$  بوده و پایدار می باشد.

حال می‌توان روی‌تگر موردنظر را با توجه به معادلات روی‌تگر طراحی نمود و با استفاده از سیمولینک

خروجی سیستم و خروجی روی‌تگر را مشاهده کرد:



شکل ۴-۶: خروجی سیستم (y)



شکل ۴-۷: خروجی روی‌تگر (yt)

ملاحظه می‌شود که خروجی سیستم و خروجی روی‌تگر مشابه هم می‌باشند پس روی‌تگر به‌خوبی

پارامترها را تخمین زده و طراحی شده است.



#### ۴-۵ سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاش

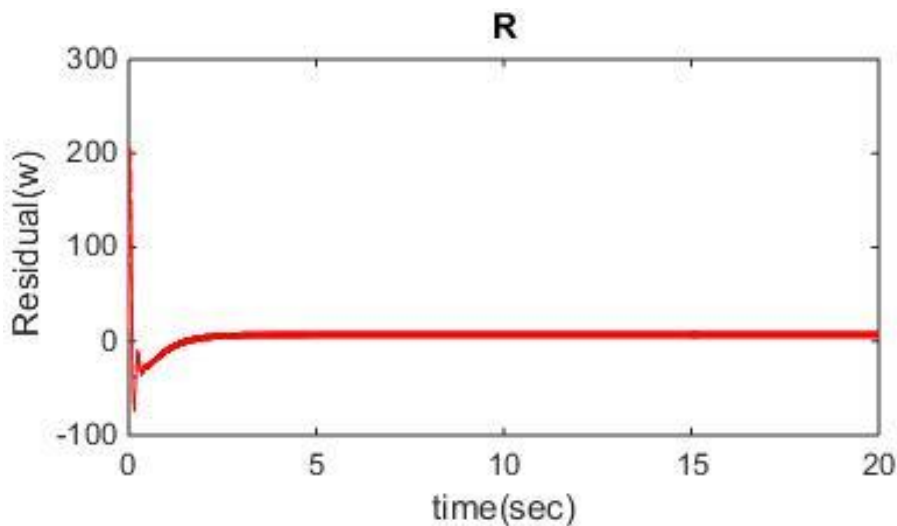
سیگنال باقیمانده که تفاضل خروجی سیستم و رویتر می‌باشد را در حضور اغتشاش که در اینجا تغییرات سرعت باد و ولتاژ در نظر گرفته شده است را مشاهده نمود:

شرایط سیمولینک:

$$v = v_0 + \Delta v \quad v_0 = 16 \text{ m/s} \quad \Delta v = 2 \text{ m/s}$$

$$u = u_0 + \Delta u \quad u_0 = 220 \text{ V} \quad \Delta u = 1 \text{ V}$$

که  $v_0$  و  $u_0$  به ترتیب سرعت و ولتاژ نامی،  $\Delta v$  و  $\Delta u$  اغتشاشات سیستم می‌باشند.

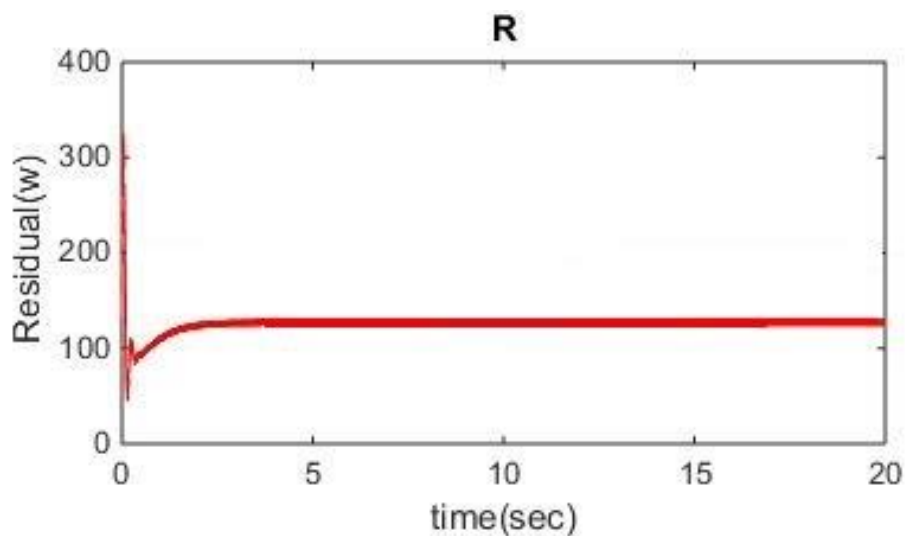


شکل ۴-۸: سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاشات ( $\Delta u = 1 \text{ V}$ ،  $\Delta v = 2 \text{ m/s}$ )

ملاحظه شده است که باقیمانده در حضور اغتشاشات حول مقدار صفر می‌باشد، پس می‌توان نتیجه گرفت که سیستم FDI نسبت به اغتشاشات مقاوم گردیده و رویتر به خوبی طراحی شده است.

#### ۴-۵-۱ تعیین حد آستانه:

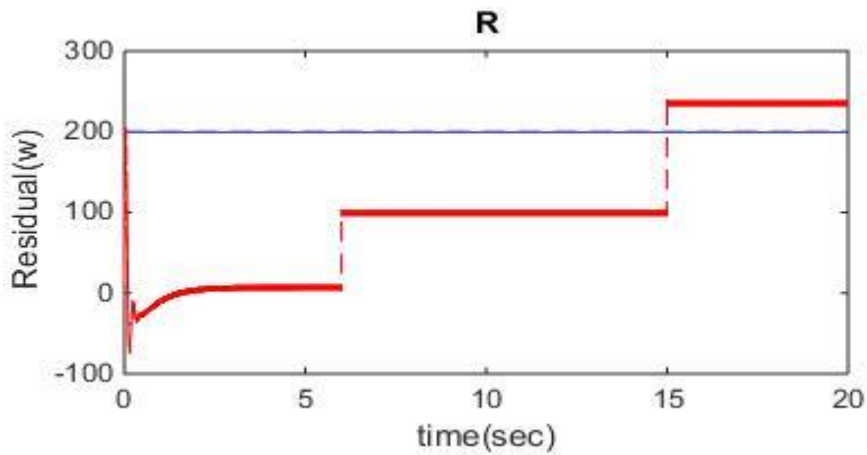
مقادیر آستانه، معمولاً بر اساس تجربه و برقراری مصالحه انتخاب می‌شوند. این مصالحه میان تشخیص سریع عیب و اجتناب از هشدارهای اشتباه برقرار است. به‌طور کلی انتخاب حد آستانه به نحوی انجام گرفته است که حساسیت موردنظر حاصل گردد. همچنین با توجه به حداکثر ظرفیت تحمل خطای سیستم که اگر از آن مقدار بیشتر شود سیستم دچار اختلال می‌شود و با توجه به حداکثر مقدار سیگنال باقیمانده در حالتی که خطایی رخ نداده است و تنها اغتشاش به سیستم وارد شده در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم با توجه به سیستم تشخیص خطای طراحی شده حداکثر اغتشاشی که می‌توان برای آن در نظر گرفت  $\Delta v = 2 \text{ m/s}$  و  $\Delta u = 1 \text{ V}$  می‌باشد زیرا همانطور که در شکل ۴-۹ ملاحظه می‌شود سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاشات دیگر حول مقدار صفر نمی‌باشد، پس برای بیش از مقدار  $\Delta v = 2 \text{ m/s}$  و  $\Delta u = 1 \text{ V}$  سیستم خاصیت مقاوم بودن خود را از دست می‌دهد. در حضور این اغتشاش و با مشاهده سیگنال باقیمانده در شکل ۴-۸ یک لحظه در ابتدای کار به مقدار ۲۰۰ می‌رسد، می‌توانیم همین مقدار را برای حد آستانه در نظر بگیریم زیرا شرایط مذکور را نیز در برمی‌گیرد.



شکل ۴-۹: سیگنال باقیمانده در حضور اغتشاشات ( $\Delta u = 2 \text{ V}$ ,  $\Delta v = 4 \text{ m/s}$ )

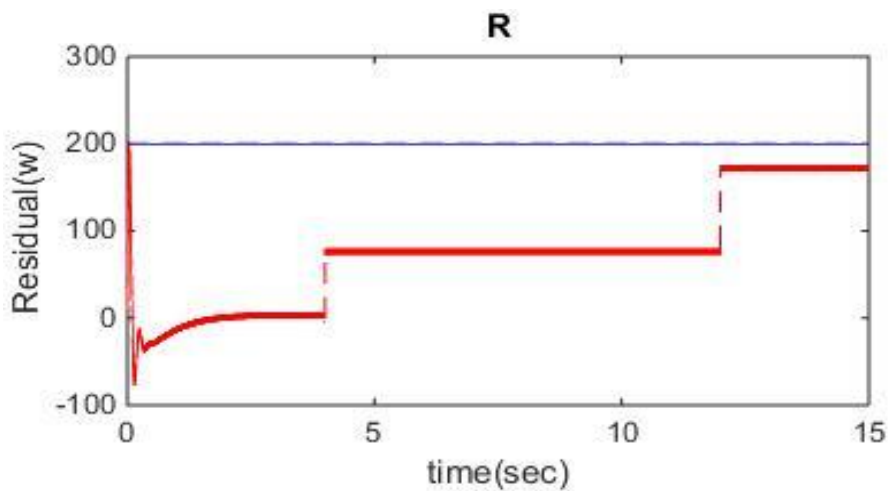
#### ۶-۴ سیگنال باقیمانده با اعمال خطا

در مرحله بعد خطاهای ممکن که در اینجا خطای حس گر لحاظ شده است ابتدا به صورت یک پله در دو محدوده زمانی مختلف به آن وارد می شود و سیگنال باقی مانده ملاحظه می شود.



شکل ۴-۱۰: سیگنال باقیمانده در حضور خطای پله ( $\Delta u = 1V, \Delta v = 2 m/s$ )

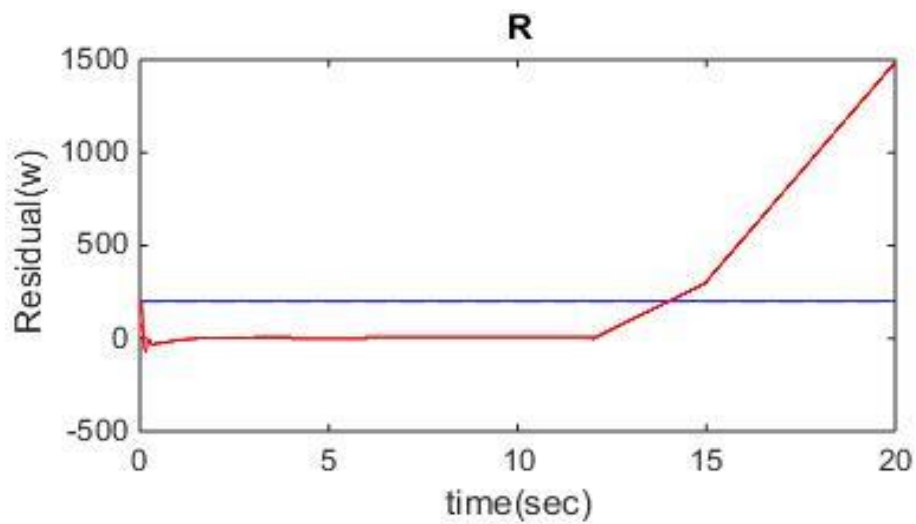
و همچنین این اعمال خطا را ا در شرایط اغتشاشی متفاوت میبینیم که سیگنال باقیمانده برابرست با:



شکل ۴-۱۱: سیگنال باقیمانده در حضور خطای پله ( $\Delta u = 1V, \Delta v = 1 m/s$ )

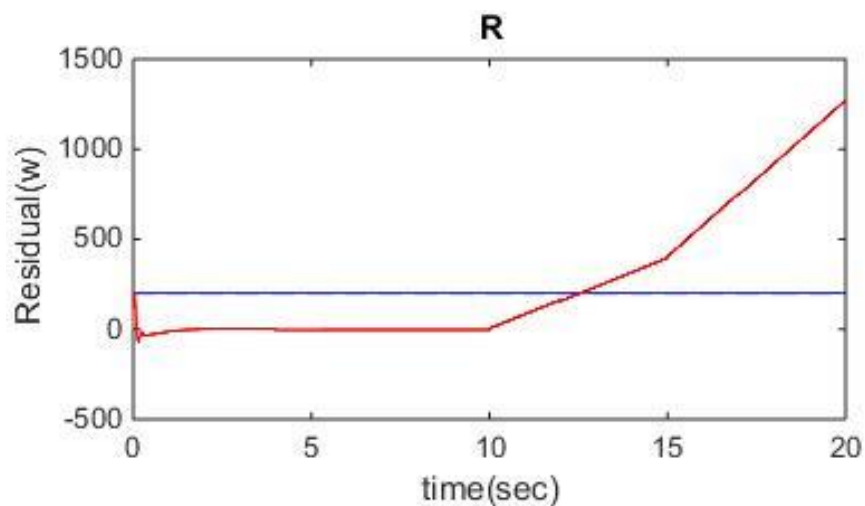
مشاهده می‌شود که با اعمال خطای پله در محدوده متفاوت سیگنال باقیمانده از حد آستانه بالا نزده و خطای رخ نداده است.

حال خطا به صورت شیب به سیستم اعمال گردیده:



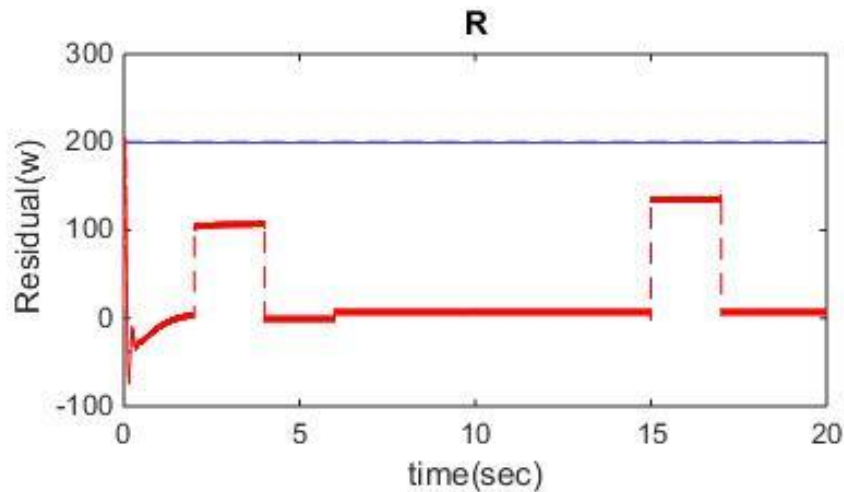
شکل ۴-۱۲: سیگنال باقیمانده در حضور خطای شیب ( $\Delta u = 1V, \Delta v = 2 m/s$ )

ملاحظه می‌شود که در ثانیه ۱۴ ام سیگنال باقیمانده از حد آستانه عبور کرده و خطا رخ داده است.



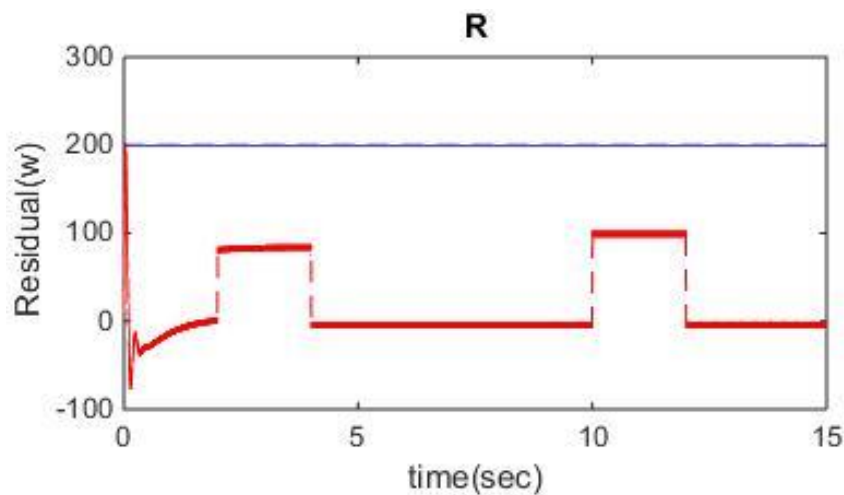
شکل ۴-۱۳: سیگنال باقیمانده در حضور خطای شیب ( $\Delta u = 1V, \Delta v = 1 m/s$ )

مشاهده می‌شود که باقی‌مانده در حضور خطای شیب از ثانیه ۱۳م از آستانه خطا عبور کرده و خطا تشخیص داده شده است. در آخر خطا به صورت پالس به سیستم اعمال شده تا تغییرات مشاهده شود:



شکل ۴-۱۴: سیگنال باقیمانده در حضور خطای پالس ( $\Delta u = 1V, \Delta v = 2 m/s$ )

ملاحظه گردید که با اعمال خطای پالس سیگنال باقیمانده در شرایط  $\Delta u = 2 m/s, \Delta v = 1V$  و هم در شرایط  $\Delta u = 2 m/s, \Delta v = 1V$  که در شکل ۴-۱۴ میبینیم از حد آستانه عبور نکرده است بنابراین خطایی رخ نداده است.



شکل ۴-۱۵: سیگنال باقیمانده در حضور خطای پالس ( $\Delta u = 1V, \Delta v = 1 m/s$ )

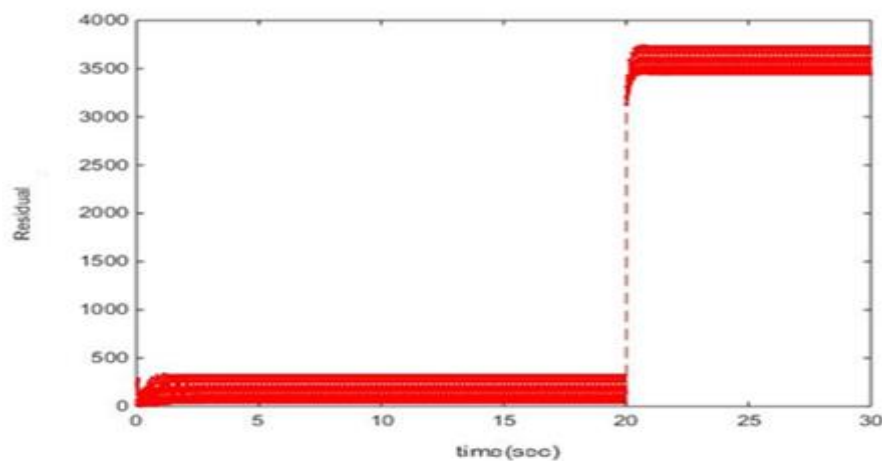
#### ۷-۴ مقایسه با روش $H_\infty$

در آخر یک مقایسه‌ای از روش سنتز  $\mu$  و روش  $H_\infty$  شده که در روش  $H_\infty$  با استفاده از روش LMI مقدار گین رویتگر برابر است با [۲۳]:

$$L = \begin{bmatrix} -0.0003 \\ 0.0015 \\ -0.0015 \end{bmatrix}$$

(۱۴-۴)

و شکل سیگنال باقیمانده آن در حضور خطای پله یکسان با حالت سنتز  $\mu$  برابر می‌باشد:



شکل ۱۶-۴: سیگنال باقیمانده به روش  $H_\infty$

ملاحظه می‌شود که مقدار سیگنال باقیمانده نسبت به مقدار آن در روش سنتز  $\mu$  خیلی بالاتر است پس روش سنتز  $\mu$  مؤثرتر می‌باشد.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ نتیجه گیری

به دلیل اینکه توربین‌های بادی در مناطق دور نصب می‌شوند، تشخیص عیب مقاوم یک‌راه مناسب افزایش اطمینان عملکرد آن‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. روش‌های مقاومی نظیر  $H_2/H_\infty$  و سنتز  $\mu$  برای تشخیص عیب وجود دارد که در این تحقیق روش سنتز  $\mu$  اتخاذ گردیده است که با استفاده از این روش گین رویتگر مورد نظر به دست آمده و به وسیله آن طراحی شده است که عملکرد آن به صورتی است که نسبت به اغتشاشات موجود که در این تحقیق تغییرات سرعت باد و ولتاژ منبع برای توربین در نظر گرفته شده است، مقاوم بوده و نسبت به خطاهای ممکن که در این تحقیق خطای حس‌گر لحاظ شده، حساس باشد. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده می‌توان به تحقق یافتن این اهداف پی برد و در آخر با مقایسه‌ای که با روش  $H_\infty$  انجام شد می‌شود نتیجه گرفت که روش سنتز  $\mu$  مؤثرتر می‌باشد. مزیت استفاده این روش کاهش پیچیدگی و ابعاد مسئله تشخیص می‌باشد که منجر به طراحی سیستم FDI می‌شود که رایج‌ترین روش حل آن استفاده از روش تکرار K-D می‌باشد که از قوی‌ترین روش‌های تشخیص مقاوم می‌باشد. از سوی دیگر بالا بودن درجه FDI از مشکلات آن می‌باشد که منجر به کاهش مرتبه می‌باشد تا اهداف مسئله را دنبال کند.

## ۵-۲ پیشنهادها

برای تحقیقات آتی می‌توان قسمت‌های مختلف توربین بادی را نظیر ژنراتور، روتور و ... را در نظر گرفت و با روش سنتز  $\mu$  یا روش‌های دیگر بررسی کرد.

همچنین خطاها و اغتشاشات موجود دیگر را در نظر گرفت و با یکی از روش‌ها به تشخیص خطا پرداخت.



- [1] Nandi S, Toliyat HA, Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005 Dec;20(4):719-29.
- [2] Hwang,I., et al., A survey of fault detection, isolation and reconfiguration methods. *IEEE Transactions on Control Syst Technology*, 2010. 18(3): p. 636-653.
- [3] Isermann, R., *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. 2006: Springer Science & Business Media.
- [4] Zhang, Y. and J. Jiang, Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual reviews in control*, 2008. 32(2): p. 222-52.
- [5] Isermann, R., *Fault-diagnosis applications: model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault – tolerant systems*. 2011: Springer Science & Business Media.
- [6] Venkatasubramanian, V., et al., A review of process fault detection : and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. *Computers chemical engineering*, 2003. 27(3): p. 293-311.
- [7] ] Q. Wu and M. Saif, “Robust fault detection and diagnosis in a class of nonlinear systems using a neural sliding mode observer,” *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 38, no. 11, pp. 881–899, Nov.2007.
- [8] David Richardson, “Wind Energy System”, *IEEE* Vol 81, No.3(2005).

- [9] J. Hu, H Nian, and H. Xu. Y . He,”Dynamic Modeling and Improved Control of DFIG under Distorted Grid Voltage Condition”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol-26,no-1, March(2011).
- [10] V.Akhmatov, Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Synthesis with Large Amount of Wind Power, Ph.D. Thectical University of Denmark, Kgs.Lyngby, Denmark, Apr.(2003).
- [11] “World Wind Energy Report 2010,” in Proc. 10th World Wind Energy Conference. Cairo, Egypt: World Wind Energy Association, Nov. 2011.
- [12] F. Blssbjerg, Z. Chen, Power Electronic for Modern Wind Turbines. Morgan & Clay publisher, (2006).
- [13] Stoyan Kanev, “Robust Fault Tolerant Control”, University of Twente, Ph.D.Thesis, (2004).
- [14] E.S.Abdin and W.Xu, “Control design and dynamic performance analysis of a wind Turbine-induction generator unit”, IEEE Transactions on energy conversion, vol.15, No. 1, PP. 1432-1439, 2000.
- [15] S. Donders. “Fault Detection and Identification for Wind Turbine Systems: a closed-loop analysis. Master’s thesis, University of Twente. 2002.
- [16] Taher, Seyed Abbas, Shahabedin Akbari, and Seyed Mohammad Hosseini. "Robust Controller Design for IG Driven by Variable-Speed in WECS Using  $\mu$ -Synthesis." Energy Engineering Management 2.4 -2016.
- [17] R. Isermann, “Model-based fault-detection and diagnosis-status and applications,” Ann. Rev. Control, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, May 2005.

- [18] Taher, S.A., Akbari, S., Abdolalipour, A., Hemmati, R., "Robust Decentralized Controller Design for UPFC using  $\mu$ -Synthesis", Elsevier-Communications Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol. 14, pp. 2149-2161, 2015.
- [19] K. Zhou, J. C. Doyle and K. Glover, Optimal and Robust Control, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [20] Sadrnia, M. A., J. Chen, and R. J. Patton. "Robust fault diagnosis observer design using  $H_\infty$  optimisation and  $\mu$  synthesis." (1996): 9-9.
- [21] Bongers P M M, "Modeling and Identification of Flexible Wind Turbine and a Fractrarizational Approach to Robust Control," Ph. D, 1994.
- [22] Wang JL, Yang GH, Liu J. An LMI approach to H-index and mixed H-/ $H_\infty$  fault detection observer design. Automatica. 2007 Sep 1;43(9):1656-65.
- [23] Liu, Jihong, Daping Xu, and Xiyun Yang. "Sensor fault detection in variable speed wind turbine system using  $H_2/H_\infty$  method. ." Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on. IEEE, 2008.

## **Abstract**

Given the limited fossil fuels and the growing need for energy in the world, the requirement to use renewable energies has become more apparent. In this regard, the use of wind energy due to the high capacity of the power plant, this type of renewable energy is considered. Due to the fact that wind turbines are installed in distant areas, a robust fault detection is one way to increase their reliability and reduce maintenance costs. In this research, the robust fault detection and identification of wind turbines has been investigated using the  $\mu$ -synthesis method. Real systems always include uncertainties that these uncertainties can be due to uncertainty in the presence of disturbances. The system, however, has the necessary flexibility to function properly for uncertainties. In this research, a robust method was used to design a fault detection system using  $\mu$  synthesis. To demonstrate the efficiency of this method, the difference between system outputs and output of the model which is the residual signal, using the simulation to ensure that the system continues to work. The main objective is to provide a Fault Detection and Isolation System (FDI) in a robust method using  $\mu$  synthesis in such a way as to maximize the effect of the fault on the model to detect the fault by the residual signal and the system robust to the turbulence to survive. Finally, the results of this method are compared with other methods, such as  $H_\infty$ . A robust method using  $\mu$  synthesis is one of the methods that ensures system performance in the presence of disturbances and various uncertainties.

**Key words:** wind turbine,  $\mu$  synthesis, Fault Detection and Isolation (FDI), uncertainties,  $H_\infty$ .



**Faculty of Electrical Engineering and Robotic**  
**M.Sc. Thesis in Control Engineering**

**Robust fault detection in wind turbine by using  $\mu$ -Synthesis**

**By:**

Aref Abdollahi

**Supervisor:**

Dr.M.A.Sadrnia

**July2018**