۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–کنترل

ارزیابی عملکرد کنترل‌گرهای غیرخطی توسط خطی‌سازی فیدبک و پیاده‌سازی بر روی دستگاه pH

توسط:

مختار مهری

استاد راهنما:

دکتر علیرضا فاتحی

استاد مشاور:

دکتر علی خاکی صدیق

زمستان ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

تأییدیّه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهایی پایان نامه آقای: مختار مهری

را با عنوان: ارزیابی عملکرد کنترل‌گرهای غیرخطی توسط خطی‌سازی فیدبک و پیاده‌سازی بر روی دستگاه pH

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱ – استاد راهنما	دکتر علیرضا فاتحی	دانشیار	
۲ – استاد مشاور	دکتر علی خاکی صدیق	استاد	
۳ – استاد ممتحن	دکتر بابک توسلی	استادیار	
٤ – استاد ممتحن	دکتر محمدعلی نکویی	دانشیار	
٥ – نماینده تحصیلات تکمیلی			

تقدیم

تقدیم به کسانی که هرچه در زندگی ام دارم از برکت وجود آنهاست

پدر بزرگوارم و مادر مهربانم

تشکر و قدردانی

از زحمات استاد ارجمند جناب آقاي دکتر علیرضا فاتحي که در انجام این پروژه از هیچ کمکي دریغ نکرده و همواره با اخلاق خوب مشوق اینجانب بوده اند، نهایت سپاسگزاري را دارم. همچنین از جناب آقاي دکتر علی خاکي صدیق به خاطر راهنمایي هاي ارزشمندشان سپاسگزارم.

وظیفه خود مي دانم از تک تک دوستانم در گروه پژوهشي ایپک که با ایجاد محیطي صمیمي و علمي زمینه تسریع و تسهیل انجام پروژه را فراهم آوردند تشکر کنم. همچنین از آقاي دکتر سیاوش فخیمی که در انجام این پروژه کمک بزرگي بودند سپاسگزارم.

چکیده

امروزه موضوع ارزیابی عملکرد کنترل کننده در علم مهندسی کنترل بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور معمولا یک شاخص عملکرد از کنترل‌گر متصل به سیستم با یک کنترل‌گر مرجع -مثلاً کنترل حداقل واریانس- مقایسه می‌گردد.

با این حال در عمده تحقیقات انجام گرفته در این زمینه سیستم تحت کنترل، خطی فرض شده است و لذا عملکرد کنترل‌گر تنها در محدوده کاری‌ای از سیستم که در آن بتوان مدل سیستم را خطی فرض کرد، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پروژه سعی شده است برای دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی (سیستم‌های خطی‌سازی‌پذیر با فیدبک) عملکرد کنترل‌گر با در نظر داشتن غیرخطی بودن سیستم مورد توجه قرار گیرد. در اینجا کنترل حداقل واریانس به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود.

برای این منظور ابتدا سیستم مورد نظر به کمک شبکه‌های عصبی با ساختار مناسب شناسایی می‌شود؛ سپس با داشتن مدل شناسایی شده، توسط خطی‌سازی فیدبک، سیستم خطی می‌شود؛ در ادامه برای سیستم خطی شده، یک کنترل‌گر خطی اعمال می‌گردد. از روی داده‌های خروجی سیستم تحت این کنترل‌گر شاخص هریس محاسبه می‌گردد و این شاخص، معیاری برای سایر کنترل‌گرهای خطی و غیرخطی قرار می‌گیرد. در نهایت این روش ارزیابی عملکرد، بر روی یک دستگاه کنترل pH آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده است.

کلید واژه: ارزیابی عملکرد، خطی‌سازی فیدبک، سیستم غیرخطی، شاخص هریس، کنترل pH.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د

فهرست شکل‌ها ..... ه

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه **۱**

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- تاریخچه ۲

۱-۲-۱- ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل ۲

۱-۲-۲- خطی‌سازی فیدبک توسط شبکه‌های عصبی ۳

۱-۲-۳- روش‌های کنترل pH ۴

۱-۳- هدف از انجام این پایان نامه ۴

۱-۴- ساختار پایان نامه ۵

فصل ۲- ارزیابی عملکرد سیستم‌ها بر مبنای کنترل MV **۶**

۲-۱- مقدمه ۶

۲-۲- شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم ۷

۲-۳- ارزیابی عملکرد سیستم بر اساس معیار MV ۹

۲-۴- کنترل مینیمم واریانس ۱۰

۲-۵- شاخص مینیمم واریانس برای ارزیابی عملکرد ۱۲

۲-۶- الگوریتم‌های تخمین شاخص عملکرد MV ۱۳

۲-۶-۱- تخمین توسط روش حداقل مربعات ۱۴

۲-۶-۲- روش آنالیز همبستگی و فیلترینگ ۱۵

۲-۷- ارزیابی عملکرد سیستم‌های غیرخطی ۱۷

۲-۷-۱- ارزیابی عملکرد سیستم‌های غیرخطی با استفاده از مدل‌های فازی ۱۷

۲-۷-۲- ارزیابی عملکرد سیستم‌های چند جمله ای بر اساس معیار حداقل واریانس ۱۸

۲-۷-۳- ارزیابی عملکرد دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی ۱۸

۲-۷-۴- ارزیابی عملکرد سیستم‌های Hammerstein–wiener ۲۰

۲-۷-۵- ارزیابی عملکرد سیستم‌های غیرخطی بر اساس ANOVA ۲۱

۲-۷-۶- ارزیابی عملکرد سیستم غیرخطی با استفاده از معیار NGMVC ۲۲

فصل ۳- خطی‌سازی فیدبک توسط شبکه‌های عصبی ۲۵

۳-۱- مقدمه ۲۵

۳-۲- خطی‌سازی فیدبک برای سیستم‌های گسسته ۲۵

۳-۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی ۲۷

۳-۳-۱- ساختار شبکه عصبی ۲۸

۳-۳-۲- انواع شبکه‌های عصبی ۲۹

۳-۳-۳- آموزش شبکه عصبی ۳۰

۳-۴- مدل‌سازی توسط شبکه‌های عصبی ۳۱

۳-۴-۱- شناسایی مدل NARMA-L2 با شبکه ی عصبی ۳۲

۳-۴-۲- کنترل‌گر NARMA-L2 ۳۴

فصل ۴- ارزیابی عملکرد کنترل‌گرهای غیرخطی به کمک خطی‌سازی فیدبک ۳۵

۴-۱- مقدمه ۳۵

۴-۲- ارزیابی عملکرد سیستم‌های غیرخطی بر مبنای MV ۳۵

۴-۳- ارزیابی عملکرد برای سیستم‌های غیرخطی با مدل $\boldsymbol{affine}$ ۳۷

فصل ۵- شبیه‌سازی بر روی فرآیند کنترل pH ۴۰

۵-۱- مقدمه ۴۰

۵-۲- مدل به کار رفته جهت شبیه‌سازی ۴۲

۵-۳- شبیه‌سازی بر رروی سیستم کنترل pH ۴۳

۵-۳-۱- مرحله اول: شناسایی ۴۵

۵-۳-۲- مرحله دوم: کنترل‌گر خطیساز فیدبک ۴۶

۵-۳-۳- مرحله سوم: تخمین معیار MV ۴۷

۵-۳-۴- مرحله چهارم: ارزیابی عملکرد سایر کنترل‌گرها بر اساس معیار MV ۴۸

۵-۳-۵- بررسی اثر دقت مدل‌سازی ۵۰

۵-۴- جمع‌بندی ۵۲

فصل ۶- پیاده‌سازی بر روی فرآینده کنترل pH ۵۴

۶-۱- مقدمه ۵۴

۶-۲- سیستم به کار رفته جهت پیاده‌سازی ۵۴

۶-۳- پیاده‌سازی بر رروی سیستم کنترل pH ۵۸

۶-۴- جمع‌بندی ۶۵

فصل ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۶۷

۷-۱- مقدمه ۶۷

۷-۲- نتیجه‌گیری ۶۷

۷-۳- پیشنهادات ۶۹

فهرست مراجع ۷۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۵-۱: مقادیر نامی برخی از پارامترهای مدل Seborg ۴۳
جدول ۵-۲: مقادیر پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی مدل Seborg ۴۴
جدول ۵-۳: پارامترهای شبکه عصبی استفاده شده برای شناسایی ۴۶
جدول ۵-۴: مقادیر تخمینی معیار MV برای فرآیند pH ۴۷
جدول ۵-۵: مقادیر تخمینی معیار MV برای فرآیند pH ۴۹
جدول ۵-۶: مقایسه روش‌های مختلف تخمین شاخص هریس برای فرآیند pH ۵۰
جدول ۵-۷: مقادیر تخمینی معیار MV برای فرآیند pH ۵۲
جدول ۶-۱: مقادیر برخی نامی پارامترهای دستگاه کنترل pH ۵۷
جدول ۶-۲: مقادیر فرمانهای ارسالی به پمپ باز و pHهای متناظر با هریک در حالت مانا ۵۸
جدول ۶-۳: تغییرات بهره فرآیند pH در نقاط کاری متفاوت ۵۹
جدول ۶-۴: پارامترهای شبکه عصبی استفاده شده برای شناسایی ۶۰
جدول ۶-۵: مقادیر تخمینی معیار MV برای فرآیند pH ۶۳
جدول ۶-۶: مقادیر تخمینی معیار MV برای فرآیند pH ۶۴
جدول ۶-۷: مقایسه روش‌های مختلف تخمین شاخص هریس برای فرآیند pH ۶۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: بیان شماتیک مساله ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل ۶
شکل ۲-۲: بیانی ساده از انواع مشکلات عملکردی پروسه‌های کنترلی ۸
شکل ۲-۳: امکان افزایش *set-point* بعد از کاهش واریانس خروجی ۹
شکل ۲-۴: ساختار کلی سیستم در نظر گرفته شده برای تشریح MVC ۱۰
شکل ۲-۵: نمایش شماتیک الگوریتم FCOR ۱۶
شکل ۲-۶: مدل H-W برای ارزیابی عملکرد ۲۱
شکل ۲-۷: بلوک دیاگرام کنترل‌گر NGMVC ۲۳
شکل ۳-۱: ساختار کنترل‌گر خطی‌ساز فیدبک به همراه حلقه خارجی ۲۷
شکل ۳-۲: ساختار شبکه عصبی مورد استفاده برای شناسایی مدل NARMA-L2 ۳۳
شکل ۳-۳: کنترل‌گر NARMA-L2 به کمک شبکه‌های عصبی ۳۴
شکل ۴-۱: اعمال کنترل‌گر خطی‌ساز فیدبک برای ارزیابی عملکرد سیستم ۳۸
شکل ۵-۱: منحنی تتراسیون a) اسید قوی/باز قوی، b) اسید ضعیف/باز قوی، c) اسید قوی/باز ضعیف، d) اسید ضعیف/باز ضعیف ۴۱
شکل ۵-۲: منحنی نمای کلی فرآیند کنترل پیوسته pH ۴۲
شکل ۵-۳: مشخصه استاتیکی فرآیند pH ۴۴
شکل ۵-۴: تغییرات بهره فرآیند pH در نقاط کاری متفاوت ۴۵
شکل ۵-۵: مقایسه خروجی فرآیند و مدل شبکه عصبی برای داده‌های تست ۴۶
شکل ۵-۶: کنترل خطی‌ساز فیدبک به کمک شبکه‌های عصبی ۴۷
شکل ۵-۷: خروجی حاصل از اعمال کنترل‌گر مدل چندگانه بر روی فرآیند pH ۴۹
شکل ۵-۸: مقایسه خروجی فرآیند و مدل شبکه عصبی برای داده‌های تست ۵۱
شکل ۵-۹: کنترل خطی‌ساز فیدبک به کمک شبکه‌های عصبی ۵۱
شکل ۶-۱: دستگاه آزمایشگاهی کنترل pH ۵۵
شکل ۶-۲: مقایسه خروجی فرآیند و مدل شبکه عصبی برای داده‌های تست ۶۱
شکل ۶-۳: کنترل خطی‌ساز فیدبک به کمک شبکه‌های عصبی ۶۲
شکل ۶-۴: خروجی حاصل از اعمال کنترل‌گر مدل چندگانه بر روی فرآیند pH ۶۴

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ضریب میرایی	ξ
فرکانس طبیعی	ω_n
ورودی اغتشاش خارجی	d
تابع حساسیت	S
تابع مکمل حساسیت	T

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

دانش مهندسی کنترل را می‌توان امروزه جزو لاینفک بسیاری از علوم و رشته‌های مهندسی دیگر به حساب آورد. از رشته‌های مهندسی برق، مکانیک، مهندسی پزشکی، مهندسی شیمی و هوافضا گرفته، تا رشته‌هایی چون مهندسی شیمی و متالورژی هر یک به گونه‌ای وام‌دار علم کنترل می‌باشند. مهندسان کنترل عهده‌دار نقش به‌سزایی در فرآیند تولید هر آنچه که در زندگی روزمره خود می‌بینیم هستند، خواه مراحل تولید بتن به کار رفته در یک سازه عظیم باشد و خواه پروسه ساخت تراشه موجود در یک گوشی تلفن همراه.

طراحی، تنظیم و اجرای کنترل‌ها و استراتژی‌های کنترل اولین فاز در مسائل کنترلی می باشد . اگر این مسائل به درستی و دقت انجام گیرد، نتیجه این خواهد بود که سیستم کنترلی عملکرد خود را به خوبی انجام خواهد داد.

هرچند بعد از گذشت زمانی از کار سیستم کنترلی، ممکن است مسائلی به وجود آید که باعث شود عملکرد سیستم کنترلی تضعیف شود از جمله این مسائل عبارتند از : تغییر در مشخصه‌های مواد مورد استفاده، تغییرات استراتژی‌های عملکرد سیستم، تغییرات در وضعیت تجهیزات سیستم مانند فرسایش، پارگی، زنگ زدگی و غیره. حتی به جز این موارد و در صورتیکه حلقه‌های کنترلی به خوبی طراحی و تنظیم شده باشند مشکلات گوناگون و غیرقابل پیش بینی‌ای از نیاز به تنظیمات مجدد گرفته تا مشکلات مربوط به سنسورها و عملگرها، می تواند موجب بروز مشکلات در عملکرد سیستم شود.

بنابراین فاز دوم در مسائل مربوط به سیستم‌های کنترل، بحث نظارت بر سیستم کنترلی و تشخیص سریع منشا مشکلات مربوط به افت عملکرد سیستم می‌باشد . امروزه این فاز در کنترل تحت عنوان «ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل» (CPA)[1] انجام می‌گیرد و در دهه‌های اخیر توجهات زیادی را هم در جوامع صنعتی و هم در تحقیقات دانشگاهی به خود جلب کرده است .

[1] Control systems Performance assessment

۱-۲- تاریخچه

به طور کلی مباحث مطرح شده در این پایان نامه را می‌توان به دو زمینه متفاوت از علم کنترل نسبت داد: ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل و خطی‌سازی فیدبک توسط شبکه‌های عصبی. بنابراین در زیر به صورت اجمالی به تاریخچه هرکدام می‌پردازیم. همچنین در انتها به طور مختصر برخی روش‌هایی را که تا کنون به منظور کنترل pH به کار گرفته شده‌اند مرور می‌نماییم.

۱-۲-۱- ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل

بحث ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل موضوعی نسبتاً جدید در علم کنترل می‌باشد. اکثر نظریه‌ها و کاربردهای عملی این موضوع در دهه‌های اخیر نمایان شده است. اشاره به روش‌ها و نظریه‌های ارزیابی روی خط[1] عملکرد کنترل، نخستین بار در [۱] و سپس در [۲] انجام گرفته است. اما تحول اساسی این مبحث مربوط است به [۳] که در آن نشان داده شده است معیار حداقل واریانس(MV)[2] را می‌توان از داده‌های نرمال سیستم حلقه بسته تخمین زد؛ از این زمان معیار معروف هریس متولد شد. این معیار واریانس خروجی سیستم را با واریانس خروجی تحت کنترل مینیمم واریانس مقایسه می‌کند. از این زمان به بعد بود که تحقیقات در این زمینه شدت گرفت. از جمله در [۴]،[۵] و [۶] مفهوم معیار هریس به حلقه‌های پس خور و پیش خور تعمیم داده شد؛ در [۷]،[۸] و [۹] معیار هریس به سیستم‌های ناپایدار و غیر مینیمم فاز گسترش داده شد.

با توجه به مشکلات کنترل MV برای سیستم‌های غیرمینیمم فاز، تلاشهایی در جهت اصلاح معیار هریس برای این دسته از سیستم‌ها به انجام رسید که در آن مشخصات طراحی کنترل مد نظر قرار می‌گیرند تا به معیارهای قابل حصول دست یافته شود. از جمله در [۱۰]،[۱۱]،[۱۲]،[۱۳]،[۱۴] و [۱۵]. از شاخص‌های جدید با عنوان معیارهای مختص کاربر[3] یاد می‌شود. با توجه به اینکه اکثر کنترل‌گرهای صنعتی از نوع PID هستند، در [۱۶]،[۱۷]،[۱۸]،[۱۹] و [۲۰] مشخصاً تحقیقاتی در جهت ارزیابی عملکرد این نوع از کنترل‌گرها ارایه شده است.

یک پیشرفت مهم در مبحث ارزیابی عملکرد، وارد کردن محدودیت سیگنال کنترل در تخمین معیار ارزیابی می‌باشد این امر منجر به یک معیار ارزیابی منعطف‌تر به نام مینیمم واریانس تعمیم یافته (GMV)[4] شد. این رویکرد ابتدا در [۲۱] و [۲۲] مطرح شد. همچنین از اواسط دهه ۱۹۹۰، تحقیقاتی در

[1] Online
[2] minimum variance
[3] user-specified benchmarks
[4] Generalised Minimum Variance

جهت ارزیابی عملکرد سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی (MIMO)[1] به انجام رسید.[۲۳]،[۲۴] و [۲۵]. همچنین بعنوان چند مرجع عالی در این زمینه می‌توان به [۲۶]،[۲۷]،[۲۸]،[۲۹] و [۳۰] اشاره کرد.

با وجود آنکه موضوع ارزیابی عملکرد برای سیستم‌های LTI در سالهای اخیر پیشرفت چشم گیری داشته است، برای سیستم‌های غیر LTI نتایج اندکی گزارش شده است؛ چرا که چالش‌های فراوانی برای تعمیم روش‌های ارزیابی عملکرد مربوط به سیستم‌های LTI به سیستم‌های غیر LTI وجود دارد. نخستین بار [۳۱] تعمیمی از کنترل‌گر MV برای فرآیندهایی که دارای مدل NARMAX [2] می‌باشند، را ارایه کرد. [۳۲] یک کنترل‌گر MV به کمک شبکه‌های عصبی برای سیستم‌های غیرخطی پیشنهاد داد؛ ارزیابی عملکرد برای دسته‌ای از سیستم‌های LTV [3] بر مبنای معیار MV، در [۳۳] مورد بررسی قرار گرفته است. [۳۴] با استفاده از تقریب سری ولترا[4]، محدوده‌ای را برای MV دسته‌ای خاص از سیستم‌های غیرخطی ارایه داده است. همچنین در [۳۵] از مدل‌های فازی و در [۳۶] از شبکه‌های عصبی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های غیرخطی بهره برده شده است؛ از دیگر کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به [۳۷]،[۳۸]،[۳۹]و[۴۰] اشاره کرد.

۱-۲-۲- خطی‌سازی فیدبک توسط شبکه‌های عصبی

گستردگی روش‌های کنترل سیستم‌های LTI، محققان علم کنترل را بر آن داشته تا به نوعی این روش‌ها را در سیستم‌های غیرخطی نیز به کار برند؛ این ایده کلی منجر به استفاده از روش کنترل خطی‌سازی فیدبک(FL)[5] گشته است. اما مشکل اصلی این روش عدم در اختیار داشتن مدل سیستم است. یکی از راه‌های حل این مشکل استفاده از شبکه‌های عصبی است. در [۴۱] از شبکه‌های عصبی چند لایه برای خطی‌سازی فیدبک سیستم‌های زمان پیوسته در فرم برونسکی[6] استفاده شده است؛ نتایج مشابه برای سیستم‌های زمان گسسته در [۴۲] و [۴۳] ارایه شده است که در آن وزن‌های شبکه به صورت خطی ظاهر می‌شوند. همچنین می‌توان به [۴۴] و [۴۵] به عنوان مقالاتی در همین راستا اشاره کرد. در [۴۶] با استفاده هم‌زمان از شبکه‌های عصبی RBF [7] و روش کلیدزنی برای به روز کردن وزن‌ها، کنترل خطی‌ساز فیدبک اعمال گشته است. در [۴۷] برای سیستم پیوسته در زمان با مدل ورودی-

[1] Multi Input-Multi Output
[2] Nonlinear Autoregressive Moving Average exogenous input
[3] linear time-variant
[4] Volterra series approximation
[5] Feedback Linearization
[6] Brunovsky form
[7] Radial basis function

خروجی یک شبکه عصبی برای خطی‌سازی فیدبک طراحی شده است و از یک مشاهده‌گر بهره بالا[1] برای تخمین سیگنال‌های مورد نیاز استفاده گشته است. از آنجایی که مدل‌سازی NARMA برای سیستم‌های غیرخطی دارای پیچیدگی زیادی می‌باشد، [۴۸] دو تقریب از این مدل پیشنهاد داده است و توسط شبکه‌های عصبی با ساختار مناسب به شناسایی این مدل‌ها پرداخته است. همچنین در این زمینه می‌توان به [۴۹]،[۵۰] و [۵۱] نیز اشاره نمود.

۱-۲-۳- روش‌های کنترلpH

فرآیند کنترل pH به عنوان یک فرآیند شیمیایی پرکاربرد، توجه زیادی را در مهندسی کنترل به خود جلب نموده و تا کنون روش‌های حلقه بسته بسیاری برای کنترل آن پیشنهاد گردیده‌اند. در [۵۲] مرور کاملی بر روی بسیاری از این روش‌های گوناگون صورت پذیرفته است. در همان مرجع ذکر گردیده که از آنجایی که اکثر فرآیندهای کنترل pH به شدت بافر می‌شوند، تقریبا خطی هستند لذا کنترل‌گر کلاسیک PID با پارامترهای ثابت جزو رایج‌ترین کنترل‌گرهای به کار رفته برای این فرآیند می‌باشد. دسته‌ای از روش‌های کنترل pH مبتنی بر ویژگی‌های شیمیایی فرآیند pH می‌باشند. از جمله این روش‌ها می‌توان به آنهایی که بر پایه تئوری مدل‌سازی "هم‌ارزی اسید قوی" ارائه گردیده‌اند اشاره نمود نظیر [۵۳]، [۵۴] و [۵۵]. در این روش‌ها از معکوس منحنی تتراسیون تطبیقی شناسایی شده برای خطی‌سازی فرآیند استفاده کرده و در نهایت به کمک یک کنترل‌گر PI با پارامترهای ثابت pH را کنترل می‌کنند. برخی از روش‌ها نیز بر ایده "نامتغیرهای واکنش" استوارند. از این ایده در [۵۶] برای خطی‌سازی خروجی و اعمال کنترل‌گر مدل مرجع استفاده گردیده است. در [۵۷] و [۵۸] از کنترل‌گرهای غیرخطی Back stepping برای کنترل فرآیند pH استفاده گردیده است. همچنین در [۵۹] فیدبک رله‌ای را برای تنظیم پارامترهای کنترل‌گر PI به کار برده است. همچنین کنترل‌گرهای متنوع دیگری نظیر کنترل‌گر تطبیقی بهینه PI [۶۰]، کنترل‌گر خود تنظیم حداقل واریانس [۶۱]، کنترل‌گر تطبیقی مدل مرجع [۶۲]، کنترل‌گر پیش‌بین مبتنی بر مدل [۶۳]، کنترل‌گر ماتریس دینامیکی [۶۴]، شبکه عصبی پیش‌بین [۶۵]، کنترل‌گر تطبیقی PID مبتنی بر شبکه عصبی [۶۶] و بسیاری از روش‌های کنترلی دیگر هریک بر روی فرآیند کنترل pH پیاده‌سازی گردیده‌اند.

۱-۳- هدف از انجام این پایان نامه

بر خلاف سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان که مبحث ارزیابی عملکرد آن پیشرفت‌های زیادی داشته است، این موضوع برای سیستم‌های غیرخطی هنوز در دست مطالعه است. چرا که چالشهای

[1] high-gain observer

موجود در مدل‌سازی و تخمین سیستم‌های غیرخطی، مانع گسترش روشهای موجود برای سیستم‌های خطی، به سیستم‌های غیرخطی شده است. به علاوه نشان داده شده است که روشهای قدیمی ارزیابی عملکرد سیستم‌های خطی، اگر برای پروسه‌های غیرخطی بکار رود، به نتایج غیرواقعی منجر خواهد شد و ما را در ارزیابی عملکرد برای سیستم دچار اشتباه می‌کند . لذا در پروژه پیش رو سعی بر این خواهد بود که روشی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های غیرخطی ارایه گردد. همچنین روش پیشنهادی در قالب شبیه‌سازی و پیاده‌سازی بر روی یک سیستم واقعی مورد بررسی قرار گرفته است.

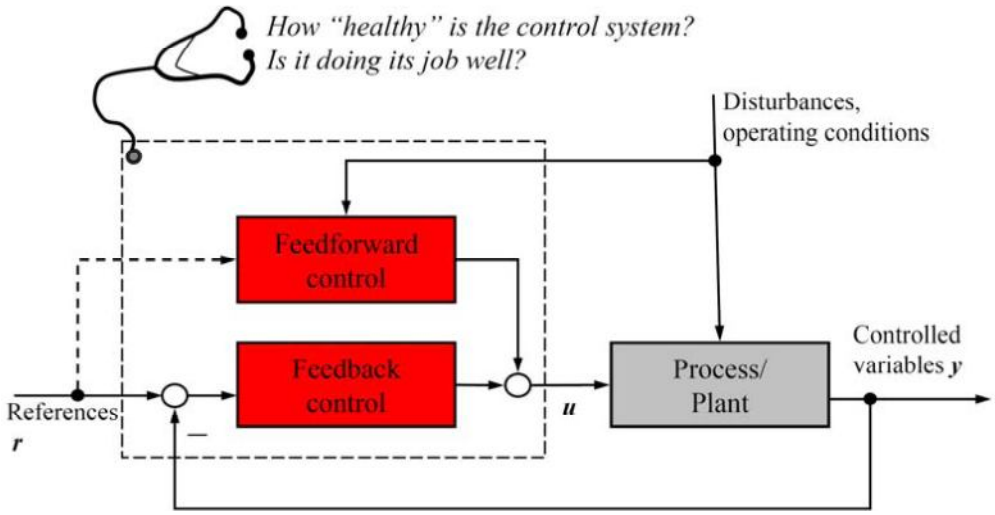
۱-۴- ساختار پایان نامه

پس از فصل اول که به مقدمه اختصاص داده شده است، در فصل دوم مروری اجمالی خواهیم داشت بر مبحث ارزیابی عملکرد سیستم‌ها بر مبنای معیار هریس و کنترل MV که در این پروژه از آن جهت ارزیابی عملکرد سیستم استفاده شده است. فصل سوم به بررسی روش‌های خطی‌سازی فیدبک توسط شبکه‌های عصبی می‌پردازد و نکات لازم از جمله نقاط ضعف و قوت هر یک و نیز پایه‌های ریاضی آنها را ذکر می‌کند. در این فصل توضیحاتی راجع‌به مبحث خطی‌سازی فیدبک و نیز شبکه‌های عصبی ارایه خواهد شد. با توجه به مطالب فصول قبل، در فصل چهارم الگوریتمی برای ارزیابی عملکرد دسته‌ای از سیستم‌های غیرخطی پیشنهاد شده است. در ادامه در فصل پنجم پس از بررسی فرآیند تنظیم pH، به شبیه‌سازی الگوریتم ارایه شده بر روی مدل ریاضی این فرآیند پرداخته‌ایم. در فصل ششم نیز ابتدا به معرفی دستگاه آزمایشگاهی کنترل pH موجود در آزمایشگاه کنترل فرآیند دانشکده مهندسی برق که در این پروژه بکار رفته پرداخته‌ایم و ادامه این فصل به پیاده‌سازی الگوریتم ارزیابی بر روی این فرآیند اختصاص داده شده است. در نهایت فصل هفتم به عنوان فصل پایانی، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و همچنین پیشنهاداتی برای هرچه بهتر شدن پروژه‌های آتی مرتبط را در بر می‌گیرد.

فصل ۲– ارزیابی عملکرد سیستم‌ها بر مبنای کنترل MV

۲–۱– مقدمه

اهدف اصلی ارزیابی عملکرد سیستم کنترلی عبارتند از ارائه یک طرحی که به صورت برخط و خودکار عملکرد سیستم کنترلی را ارزیابی کند و اطلاعات را به مسئول سیستم کنترلی ارائه کند و نشان دهد که آیا یک هدف مشخـص عملـکردی و مشخـصه‌ای از پاسخ توسط سیستم حاضر برآورده می‌شود یا نه. این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱: بیان شماتیک مساله ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل [۲۸]

به کمک این ابزار بایستی بتوان افت عملکرد ناشی از تغییرات پروسه را تشخیص داد و از بروز صدمه به سیستم جلوگیری کرد و نیز توسط این ابزار توصیه‌ها و اعمال مورد نیاز برای توجه و تعمیر به اجرای خاص حلقه کنترلی پیشنهاد می‌شود و یا تنظیمات مجدد کنترل‌گر، بر اساس شاخص عملکرد محاسبه شده در فاز ارزیابی، پیشنهاد می‌گردد. روش‌های ارزیابی عملکرد کنترلر بایستی به سوالات کلیدی مباحث ارزیابی سیستم پاسخ گوید . از جمله :

- **انتخاب مبنا**. بهترین مبنایی که بر اساس آن می‌توان عملکرد سیستم کنترل موجود را ارزیابی کرد چیست؟
- **ارزیابی**. آیا کنترلر سالم است ؟ آیا کار خود را به خوبی انجام می دهد ؟ آیا سیستم کنترل حاضر با توجه به مبنای مورد نظر عملکرد مناسبی دارد؟

- **تشخیص**. اگر نه چرا سالم نیست؟ چه مسائلی باعث شده است عملکرد سیستم از حالت مطلوب خارج شود ؟ (در این مرحله نباید در کارهای سیستم مشکلی ایجاد شود).
- **بهبود عملکرد**. چه قدم‌هایی باید برداشته شود تا عملکرد حلقه‌های مشکل‌دار ، بهبود یابد؟ آیا فقط تنظیمات مجدد کافی است؟ یا باید طراحی مجدداً انجام شود ؟ آیا لازم است قطعات تعویض شوند ؟

۲-۲- شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم

یکی از اصلی‌ترین مباحث مربوط به ارزیابی عملکرد کنترل‌گرها، انتخاب معیار مناسب برای ارزیابی می‌باشد. در گذشته معیارهای زیادی برای این منظور معرفی شده است. عملکرد سیستم‌های کنترلی معمولا توسط شاخص‌های مختلفی ارزیابی می گردند . همانطور که در شکل ۲-۲ دیده می شود، همه این شاخص‌ها را معمولاً می توان به دو گروه کلی تقسیم کرد:

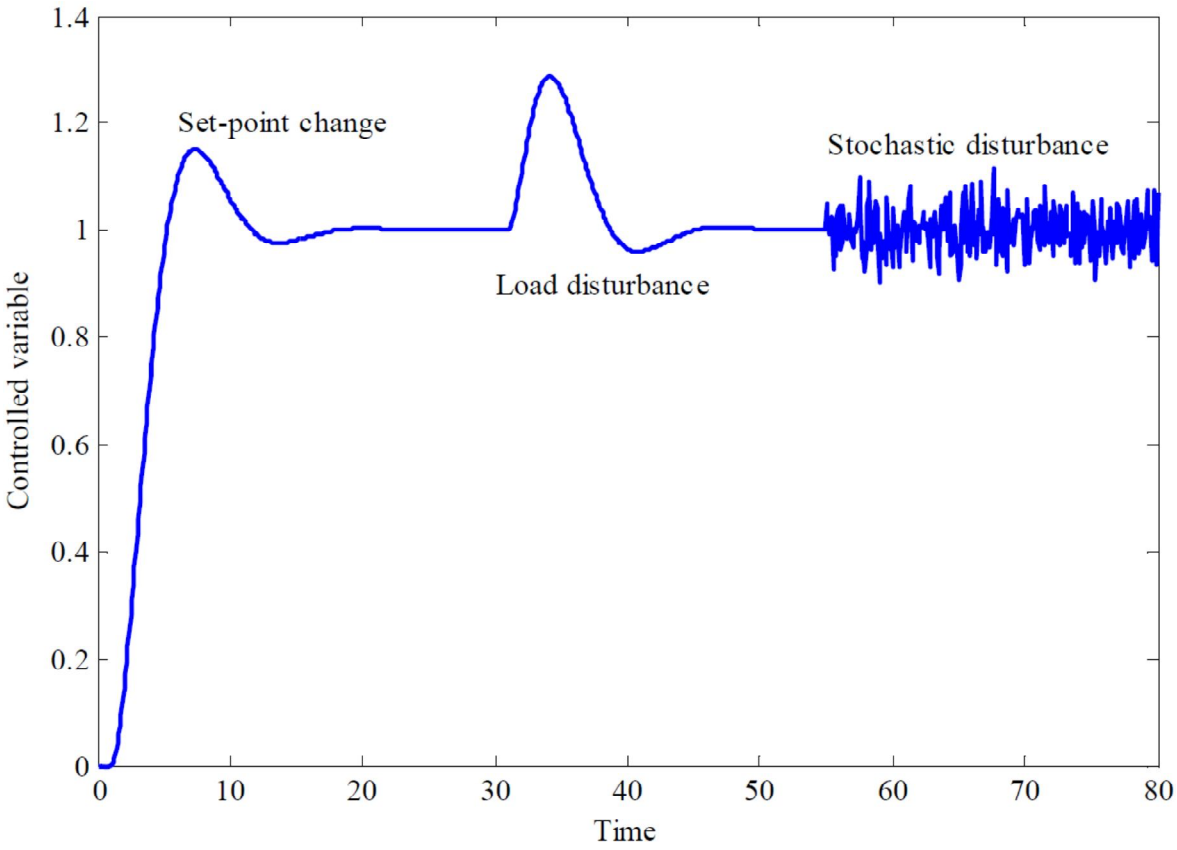
- **معیارهای عملکرد قطعی**[1]. این دسته از معیارها که قدیمی هستند در مواقعی استفاده می‌شوند که اغتشاش‌های وارد شده به سیستم معین باشند . (مانند اغتشاشات ناشی از تغییرات بار). از جمله این معیارها عبارتند از: زمان خیز، زمان نشست، فراجهش،خطای ردیابی و انتگرال مربعات خطا .
- **معیارهای عملکرد تصادفی**[2]. این معیارها معمولا شامل مشخصات آماری متغیر مورد نظر می باشند . (مانند واریانس). این معیارها ارتباط مستقیمی با کیفیت عملکرد سیستم ، کیفیت محصولات ، انرژی و مواد مصرفی و ... دارند. در کنترل پروسه رگولاسیون حالت دائم، یک موضوع بسیار مهم است بنابراین در این حوزه ، چنین معیارهایی اهمیت بسیاری دارند . از جمله این معیارها، واریانس خروجی می‌باشد که در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عملکرد سیستم کنترل همواره توسط یک معیار نسبی بررسی می شود. برای این منظور شاخص عملکردکنترل(CPI)[3] معمولا بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{J_{dec}}{J_{act}} \qquad (۱-۲)$$

که در آن J_{dec} عبارت است از هر مقدار ایده‌آل، بهینه، مطلوب و قابل قبول برای یک معیار عملکرد اتخاذ شده (مثلاً واریانس) که بایستی مینیمم شود. J_{act} نیز مقدار واقعی معیار می باشد که بایستی از داده‌های

[1] deterministic
[2] stochastic
[3] **C**ontrol **P**erformance **I**ndice



شکل ۲-۲: بیانی ساده از انواع مشکلات عملکردی پروسه‌های کنترلی

اندازه گیری شده سیستم محاسبه گردد. به طور کلی مشخصات کلیدی اندیس‌های ارزیابی عملکرد باید در حالت ایده‌آل شامل موارد زیر باشد:

- **راهنمایی کنترل‌گر**. اندیس‌ها باید به تنظیمات مجدد کنترل‌گرها، نامناسب بودن مدل سیستم یا مشکلات تجهیزات حساس باشند و نیز نباید از اغتشاش یا سیگنال مرجع متاثر گردند چون این دو می‌توانند به صورت گسترده‌ای در سیستم تغییر نمایند.
- **محاسبه آسان**. اندیس‌های مورد استفاده نباید در کار عادی سیستم خللی ایجاد کنند. و باید بدون نیاز به هیچ آزمایش خاص، تنها با استفاده از داده‌های در دسترس سیستم محاسبه گردند. همچنین باید به صورت اتوماتیک محاسبه گردند چرا که ممکن از تعداد بسیار زیادی حلقه کنترلی در سیستم نیاز به ارزیابی عملکرد داشته باشد.
- **واقعی بودن و دقت**. بازه اطمینان اندیس‌ها بایستی قابل محاسبه باشد و یا دقت آنها توسط داده‌های سیستم قابل ارزیابی باشد. اندیس‌ها بایستی عملکرد سیستم تحت بررسی را با یک معیار استاندارد مقایسه کنند. (مانند کنترل‌گر حداقل واریانس).