

به نام خدا



پردیس بین المللی خوارزمی

رساله دکتری مهندسی کنترل

تحلیل و جبرانسازی تاخیرهای زمانی ثابت-کراندار در
سیستم های کنترل تحت شبکه به روش پیش بین مقاوم

نگارنده:

فرشید پورعلیزاده مقدم

استاد راهنما:

دکتر حسین قلی زاده نرم

مهر ۱۳۹۹

شماره: ۹۶/۲۴۰۵/م.ا.ت

تاریخ: ۹۶/۹/۲۵

ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای فرشید پورعلیزاده مقدم دانشجوی دکتری رشته مهندسی برق-کنترل به شماره دانشجویی ۹۴۰۰۲۰۵ ورودی ۱۳۹۴ در تاریخ ۹۹/۷/۳۰ از رساله **نظری** / **عملی** خود با عنوان: تحلیل و جبرانسازی تاخیرهای زمانی ثابت-کرناندار در سیستم های کنترل تحت شبکه صنعتی به روش پیش بین مقاوم دفاع و با اخذ نمره ۱۸.۸۵ به درجه: **خیلی خوب** نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷ ☒
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵ ☐ د) مردود: کمتر از ۱۵ ☐

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر حسین قلی زاده نرم	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر علیرضا الفی	داور داخلی	استاد	
۳	دکتر محمدحساد ظریف	داور داخلی	دانشیار	
۴	دکتر سید کمال حسینی ثانی	داور خارجی	دانشیار	
۵	دکتر ایمان آقایان	سرپرست (نماینده (تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم فرشید پورعلیزاده مقدم بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیر و تشکر:

بدون شک جایگاه و منزلت استاد، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی آن، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از مقام استاد، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ":

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر حسین قلی زاده نرم که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از پدر و مادر عزیزم این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یابوری بی چشم داشت برای من بوده اند؛ از همسر و دختر عزیزم که در تمام مراحل تحصیلی یار و یاور من بوده اند و چه سختیها و محدودیتهایی که در این راه متحمل نشده اند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعمدنامه

اینجانب فرشید پور علیزاده مقدم دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی کنترل دانشکده پردیس بین المللی خوارزمی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل و جبرانسازی تاخیرهای زمانی ثابت-کراندار در سیستم های کنترل تحت شبکه به روش پیش بین مقاوم تحت راهنمایی دکتر حسین قلی زاده نرم متعهد می شوم.

- 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 .



امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها 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:

در این رساله تحلیل و جبرانسازی تاخیرهای زمانی در سیستم‌های کنترل تحت شبکه بررسی می‌شود. چارچوب تحقیق شامل دو مرحله است. مرحله اول به تحلیل و مدلسازی تاخیر زمانی در حلقه‌های کنترلی تحت شبکه اختصاص دارد که در آن تاخیر زمانی به صورت ثابت-کراندار مدل شده و کران بالا و پایین آن محاسبه می‌گردد. در مرحله دوم، جبرانساز مناسب بر اساس نتایج مرحله اول طراحی می‌شود. به منظور تحلیل و مدلسازی تاخیر زمانی، سیستم‌های کنترلی‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرند که به طور خاص تحت شبکه‌های پروفیباس و فیلدباس هستند. روش جبرانسازی استفاده‌شده در تحقیق، بر اساس کنترل پیش‌بین مدل مقاوم می‌باشد. الگوریتم جبرانساز ارائه‌شده به گونه‌ای بهبود می‌یابد که عدم قطعیت مدل را نیز شامل شود. با الگوریتم ارائه‌شده، پایداری سیستم در حضور عدم قطعیت مدل و تاخیرهای زمانی ثابت-کراندار، اثبات می‌گردد. همچنین به منظور جبرانسازی تاخیر زمانی و تضعیف اغتشاش، الگوریتم کنترل‌کننده پیش‌بین مدل مقاوم برای سیستم‌های شامل تاخیر زمانی و ورودی اغتشاش توسعه می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش ارائه شده، در جبرانسازی همزمان تاخیرهای زمانی ثابت-کراندار و عدم قطعیت مدل، موثر است. علاوه بر این برای سیستم‌های با ورودی اغتشاش، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم توسعه یافته قابلیت حذف اغتشاش را دارد.

کلمات کلیدی: تاخیر زمانی، کنترل پیش بین مدل مقاوم، نامساویهای ماتریسی خطی، چند ضلعی عدم قطعیت

فهرست مطالب

فصل ۱- مقدمه	۲
۱-۱ پیشگفتار	۲
۲-۱ تاریخچه و بررسی منابع	۲
۳-۱ هدف از انجام تحقیق	۵
۴-۱ نوآوری تحقیق	۶
۵-۱ ساختار گزارش	۷
فصل ۲- مفاهیم سیستم‌های کنترل تحت شبکه	۱۰
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ سیستم کنترل تحت شبکه (NCS)	۱۰
۳-۲ تاخیر زمانی ناشی از شبکه در NCS	۱۱
۴-۲ ارزیابی تاخیرهای زمانی ایجاد شده در شبکه PROFIBUS PA	۱۲
۵-۲ تحلیل تاخیرهای زمانی در شبکه Modbus	۲۷
۶-۲ نتیجه‌گیری	۳۱
.....	۳۳
فصل ۳- کنترل پیش بین مدل مقاوم و کاربرد آن در جبران‌سازی تاخیرهای زمانی	۳۴
۱-۳ مقدمه	۳۴
۲-۳ کنترل پیش بین مدل مقاوم	۳۵
۳-۳ استفاده از چندضلعی عدم قطعیت در توصیف فرآیندهایی با تاخیر زمانی ثابت-کراندار در الگوریتم RMPC	۳۷
۱-۳-۳ استفاده از چند ضلعی عدم قطعیت در توصیف عدم قطعیت تاخیر زمانی	۳۸
۲-۳-۳ الگوریتم RMPC با در نظر گرفتن تاخیر زمانی نامعین	۴۰
۴-۳ تحلیل وجبران‌سازی تاخیرهای زمانی در حلقه‌های کنترلی شبکه فیلدباس با استفاده از الگوریتم RMPC	۴۲
۱-۴-۳ استفاده از الگوریتم RMPC اصلاح شده در جبران‌سازی تاخیرهای زمانی ثابت-کراندار در حلقه‌های کنترل صنعتی	۴۳

۴۵.....	۳-۵- نتیجه گیری
۴۷.....	توسعه الگوریتم پیش بین مدل مقاوم در جبران سازی تاخیرهای زمانی
۴۸.....	فصل ۴- توسعه الگوریتم پیش بین مدل مقاوم در جبران سازی تاخیرهای زمانی
۴۸.....	۴-۱- مقدمه
۴۸.....	۴-۲- توسعه الگوریتم پیش بین مدل مقاوم به منظور جبران سازی همزمان عدم قطعیت مدل و تاخیر زمانی
۴۹.....	۴-۲-۱- توصیف سیستم های نامعین شامل تاخیر زمانی نامعین ثابت-کراندار
۴۹.....	۴-۲-۲- طراحی جبران ساز RMPC برای سیستم های شامل تاخیر زمانی نامعین و عدم قطعیت در مدل
۵۱.....	۴-۳- طراحی جبران ساز RMPC برای سیستم های شامل تاخیر زمانی نامعین و ورودی اغتشاش
۵۵.....	۴-۳-۱- توصیف مدل شامل ورودی اغتشاش و تاخیر زمانی نامعین با استفاده از چندضلعی های عدم قطعیت
۵۵.....	۴-۳-۲- طراحی کنترل کننده پیش بین مدل مقاوم به منظور جبران سازی تاخیر زمانی و ورودی اغتشاش
۵۷.....	۴-۴- نتیجه گیری
۶۰.....	فصل ۵- شبیه سازی
۶۱.....	۵-۱- مقدمه
۶۲.....	۵-۲- طراحی جبران ساز پیش بین مدل مقاوم در NCS های شامل عدم قطعیت در مدل و تاخیر زمانی
۶۲.....	۵-۲-۱- سناریوی ۱
۶۳.....	۵-۲-۲- سناریوی ۲
۶۴.....	۵-۳- نتایج شبیه سازی الگوریتم توسعه یافته جهت جبران سازی تاخیر زمانی و تضعیف اغتشاش
۶۷.....	
۶۸.....	۵-۳-۱- سناریوی ۱ (دامنه اغتشاش کوچک)
۷۰.....	۵-۳-۲- سناریوی ۲ (دامنه اغتشاش بزرگ)

۷۲	۵-۳-۳- نتایج شبیه‌سازی به ازای دینامیک‌های مدل نشده
۷۴	۵-۴- نتیجه‌گیری
۷۷	فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۷۸	۶-۱- نتیجه‌گیری
۷۹	۶-۲- پیشنهادات
۸۰	فهرست مراجع

فهرست جداول:

جدول ۱-۲ مقایسه بین مقادیر تاخیر زمانی در حلقه های کنترلی تحت شبکه های PA، FF و آنالوگ [۶]	۱۵.....
جدول ۲-۲ تعریف متغیرهای شکل ۵-۲ [۵]	۱۷.....
جدول ۳-۲ تعریف متغیرهای رابطه (۱۷-۲) [۵]	۲۲.....
جدول ۴-۲ تعریف اجزای سیستم تست شکل (۹-۲) [۵]	۲۵.....
جدول ۵-۲ مدت زمان میانگین اجرای هر مرحله در سیستم حلقه بسته	۳۰.....
جدول ۶-۲ حدود بالا و پایین تاخیر زمانی حاصل از تست به ازای مقادیر مختلف زمان اسکن شبکه	۳۰.....
جدول ۱-۳ تعریف پارامترهای رابطه (۱۱-۳)	۳۸.....
جدول ۱-۴ تعریف پارامترهای رابطه (۶-۴) و (۷-۴)	۵۰.....
جدول ۲-۴ تعریف متغیرهای رابطه ۱۹-۴	۵۶.....
جدول ۱-۵ پارامترهای اصلی سناریوی ۱	۶۳.....
جدول ۲-۵ پارامترهای اصلی سناریوی ۲	۶۵.....
جدول ۳-۵ شاخص عملکرد دو الگوریتم کنترلی	۶۷.....
جدول ۴-۵ پارامترهای اصلی سناریوی ۱	۶۸.....
جدول ۵-۵ شاخص عملکرد دو روش کنترلی	۷۲.....

فهرست شکل ها و تصاویر:

- شکل ۲-۱ بلوک دیاگرام NCS ها [۱] ۱۰
- شکل ۲-۲ حلقه های کنترلی تست برای تحلیل تاخیرهای زمانی حلقه های تحت شبکه PA و مقایسه آن با حلقه آنالوگ و شبکه FF H1 [۲] ۱۳
- شکل ۲-۳ دیاگرام زمانی حلقه کنترل تحت شبکه Profibus PA [۲] ۱۳
- شکل ۲-۴ بلوک دیاگرام کلی NCS در شبکه FF H1 [۵] ۱۶
- شکل ۲-۵ دیاگرام زمانی حلقه کنترل تحت شبکه FF H1 [۵] ۱۷
- شکل ۲-۶ پیکربندی یک NCS در روش کنترل مقاوم [۱] ۲۰
- شکل ۲-۷ نمایش گرافیکی چند ضلعی نامعینی [۵] ۲۳
- شکل ۲-۸ سیستم آزمایش [۵] ۲۵
- شکل ۲-۹ نتایج شبیه سازی به ازای ورودی پله واحد و سه بازه متفاوت تاخیر زمانی [۵] ۲۶
- شکل ۲-۱۰ پاسخ سطح فرآیند به ورودی پله (a) و سیگنالهای کنترلی اعمالی به اکچویتر (b) در استراتژیهای کنترلی MPC، RMPC و PID Controller در سناریوی اول (بازه تاخیر زمانی کوچکتر) [۵] ۲۶
- شکل ۲-۱۱ پاسخ سطح فرآیند به ورودی پله (a) و سیگنالهای کنترلی اعمالی به اکچویتر (b) در استراتژیهای کنترلی MPC، RMPC و PID Controller در سناریوی دوم (بازه تاخیر زمانی بزرگتر) [۵] ۲۷
- شکل ۲-۱۲ بلوک میز تست NCS تحت شبکه Modbus RTU ۲۸
- شکل ۲-۱۳ دیاگرام زمانی NCS تحت شبکه Modbus ۲۹
- شکل ۲-۱۴ میز تست ۲۹
- شکل ۲-۱۵ کنترلکننده مرکزی و ماژول ارتباطی ۳۰
- شکل ۳-۱ نمایش گرافیکی چند ضلعی نامعینی ۳۹
- شکل ۴-۱ بلوک دیاگرام یک NCS با ورودی اغتشاش ۵۵
- شکل ۵-۱ پاسخ پله سیستم حلقه بسته برای دو الگوریتم NRMPC و IRMPC در حالت اول (مدل معین) ۶۳
- شکل ۵-۲ پاسخ پله سیستم حلقه بسته برای دو الگوریتم NRMPC و IRMPC در حالت دوم (مدل نامعین) ۶۴
- شکل ۵-۳ پاسخ سیستم حلقه بسته در حالت سوم (تغییر ورودی مرجع) ۶۴
- شکل ۵-۴ پاسخ پله سیستم حلقه بسته برای دو الگوریتم NRMPC و IRMPC در سناریوی ۲ و با مدل معین ۶۵
- شکل ۵-۵ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با استفاده از الگوریتم NRMPC در سناریوی ۲ و با مدل نامعین ۶۶
- شکل ۵-۶ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با استفاده از الگوریتم IRMPC در سناریوی ۲ و بامدل نامعین ۶۶

- شکل ۵-۷ مقایسه پاسخ پله دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه کوچک ۶۸
- شکل ۵-۸ مقایسه ورودی کنترل دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه کوچک ۶۹
- شکل ۵-۹ مقایسه پاسخ پله دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش متغیر با زمان با دامنه کوچک ۶۹
- شکل ۵-۱۰ مقایسه ورودی کنترلی دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش متغیر با زمان با دامنه کوچک ۶۹
- شکل ۵-۱۱ مقایسه پاسخ پله دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه بزرگ ۷۰
- شکل ۵-۱۲ مقایسه ورودی کنترلی دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه بزرگ ۷۰
- شکل ۵-۱۳ مقایسه پاسخ پله دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه بزرگ ۷۱
- شکل ۵-۱۴ مقایسه ورودی کنترلی دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه بزرگ ۷۱
- شکل ۵-۱۵ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با جبران‌ساز DRMPC به دینامیک بهره مدل نشده ۷۳
- شکل ۵-۱۶ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با جبران‌ساز DRMPC به دینامیک صفر مدل نشده ۷۳
- شکل ۵-۱۷ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با جبران‌ساز DRMPC به ازای بهره و قطب مدل نشده در $s = 0.5$ ۷۴
- شکل ۵-۱۸ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با جبران‌ساز DRMPC به ازای بهره و قطب مدل نشده در $s = 0.1$ ۷۴

فصل اول

مقدمه

فصل ۱- مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

با توسعه و بلوغ هر چه بیشتر تکنولوژی شبکه‌ها، استفاده از آنها در کاربردهای مختلف و از جمله در سیستم‌های کنترل و اتوماسیون افزایش یافت. سیستم کنترل تحت شبکه^۱ یا به اختصار NCS، سیستمی است که حلقه کنترلی در آن از طریق ارتباطات شبکه شکل میگیرد به گونه‌ای که سیگنالهای فیدبک و کنترل از طریق شبکه بین اجزای مختلف سیستم (کنترل کننده‌ها، سنسورها و اکچویتورها) مورد تبادل قرار میگیرند. سیستمهای کنترل تحت شبکه امروزه کاربردهای بسیاری را در کنترل فرآیندهای صنعتی، اپراتوری از راه دور، صنعت اتومبیل‌سازی، سیستم‌های انرژی، سیستم‌های حمل و نقل، شبکه‌های قدرت و ... در بر میگیرند. استفاده از شبکه‌ها در حلقه‌های کنترلی جذابیت‌های زیادی دارد. جذابیت‌هایی همچون، حذف سیم‌کشی‌های غیر ضروری، افزایش قابلیت اطمینان، نگهداری و عیب‌یابی آسانتر، قابلیت ارتقا و انعطاف‌پذیری بیشتر و ... اما در کنار آن محدودیتهایی نیز ایجاد میکند. این محدودیت‌ها شامل تاخیر زمانی، ارسال نامطمئن بسته‌های دیتا و از بین رفتن بسته‌های دیتا است که باعث تخریب عملکرد^۲ و پایداری^۳ سیستم کنترل حلقه بسته میشود.

۱-۲ تاریخچه و بررسی منابع

اولین سیستم کنترل تحت شبکه در سال ۱۹۵۰ توسط Vulcan برای یک سیستم کنترل پرواز به کار گرفته شد که در آن از پروتکل‌های آنالوگ برای انتقال سیگنال‌ها استفاده شد. پس از آن و با گسترش کامپیوترهای دیجیتال و ظهور ریزپردازنده‌ها، افق جدیدی پیش روی مهندسان کنترل قرار گرفت. در سال ۱۹۷۲ اولین NCS دیجیتال برای کنترل پرواز جنگنده F8-C طراحی و پیاده‌سازی شد. قدم بعدی در توسعه و تکامل NCS ها، سیستم کنترل توزیع شده^۴ بود که در سال ۱۹۷۵ ارائه گردید. دو شرکت Honeywell و Yokogawa همزمان سیستم‌های TDC2000 و Centium را به عنوان اولین DCS ها ارائه کردند. با توسعه نیازهای صنعتی و محدودیت‌های کنترل نقطه به نقطه برای تعداد زیاد حلقه‌های کنترلی، مشخص گردید که NCS یک راه حل برای دسترسی و کنترل از راه دور است. تحقیقات بر روی اپراتوری از راه دور با خطرات ناشی از کار در محیط‌های پرخطر نظیر پروژه‌های فضایی و محیط‌های صنعتی، افزایش یافت. امروزه NCS ها

¹ Networked Control System(NCS)

² Performance

³ Stability

⁴ Distributed Control System(DCS)

در رنج وسیعی از کاربردهای صنعتی یافت میشوند. با توجه به اینکه در NCS از شبکه برای انتقال دیتا استفاده می‌شود، تاخیرهای زمانی در کانال‌های اندازه‌گیری و کنترل تحت شبکه، توجهات زیادی را به خود جلب نموده است. در ادامه به بررسی تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در این خصوص و روش‌های به کار گرفته شده در آنها پرداخته می‌شود.

در [۱] مروری بر روشهای مدل‌سازی تاخیر زمانی در سیستم‌های کنترل تحت شبکه و روش‌های جبران‌سازی آن ارائه شده است. استراتژی‌های کنترلی مورد استفاده در سیستم‌های کنترل تحت شبکه، کاربرد، مزایا و معایب هر یک و همچنین مدل‌های تاخیر زمانی مورد بحث و بررسی کلی قرار گرفته است. در [۲] تاخیرهای زمانی حلقه‌های کنترلی در شبکه پروفیباس^۱ مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور یک سیستم آزمایشی مورد بررسی دقیق قرار گرفته است و دیاگرام زمانی آن ارائه شده است. در [۳]، تاخیرهای زمانی در حلقه‌های کنترلی تحت شبکه Foundation Fieldbus (FF) H1 مورد ارزیابی و آزمایش عملی قرار گرفته است و مقایسه‌ای بین مقادیر تاخیرهای زمانی شبکه‌های PROFIBUS PA و FF H1 انجام شده است. تحلیل و جبران‌سازی تاخیرهای زمانی ناشی از شبکه در حلقه‌های کنترل مبتنی بر شبکه فیلدباس^۲ در [۵] و [۱۷] مورد بحث و بررسی دقیق قرار گرفته است. نتایج ارائه شده در [۵] علاوه بر تحلیل شبکه، به منظور کاهش حجم محاسبات، تغییری در نحوه محاسبه بهره فیدبک حالت ایجاد و الگوریتمی جهت پیاده‌سازی آنالین در سیستم-های واقعی ارائه می‌کند. در [۱۶] فاصله زمانی انتقال دیتا از لحظه درخواست تا لحظه دریافت برای شبکه اترنت صنعتی به صورت تجربی مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفته است.

در دو دهه اخیر، مطالعات زیادی در رابطه با پایداری NCS ها و ترکیب کنترل‌کننده‌ها برای حل مسائل موجود در سیستم‌های کنترل تحت شبکه، انجام شده است که از آن جمله می‌توان به [۱۸] اشاره نمود که در آن تحلیل پایداری NCS ها مورد بحث قرار گرفته است. در [۱۹] پایداری NCS های غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. در [۲۰] نویسندگان تحلیل پایداری NCS های چند ورودی - چند خروجی را مورد بررسی قرار داده اند. [۲۱] تحلیل پایداری NCS های مبتنی بر مدل با تاخیر زمانی متغیر با زمان را مورد بحث قرار داده است. در [۲۲] نویسندگان، یک کلاس جدیدی از توابع لیپانوف را در تحلیل پایداری NCS ها ارائه داده‌اند. در [۲۳] خصوصیات پایداری ورودی-خروجی NCS ها بررسی شده است. در این کار یک چارچوب واحد برای تحلیل پایداری NCS ها در شرایط از دست رفتن بسته‌های داده ارائه می‌شود. در [۲۴] کنترل

^۱ Profibus

^۲ Fieldbus

پیش‌بین مدل توزیع شده و تحلیل پایداری آن ارائه شده است. و در [۲۵] تحلیل پایداری NCS های مبتنی بر مدل مورد بررسی قرار گرفته است.

در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته در زمینه تئوری و تحلیل NCS ها، متدهایی برای پایدارسازی NCS ها در حضور تاخیر زمانی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به [۲۶] اشاره نمود. در این کار حداکثر بازه مجاز تاخیر زمانی برای پایداری NCS مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته است. در [۲۷] یک روش سیستماتیک به منظور پایداری سیستم‌های کنترل تحت شبکه خطی نامتغیر با زمان با قیود ناشی از تحقق آن در شبکه، بررسی شده است.

یکی از روشها برای جبران‌سازی تاخیرهای زمانی در شبکه‌ها، استفاده از مدل‌هایی از سیستم است که بتواند رفتار سیستم را پیش‌بینی کند. این دسته از روش‌های کنترلی به اختصار کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل^۱ نامیده میشود. در واقع در بسیاری از تحقیقات صورت گرفته، کنترل پیش‌بین به عنوان کاندیدی برای جبران‌سازی تاخیرهای زمانی در NCS ها در نظر گرفته شده است. در [۱۰] و [۱۱] برای جبران‌سازی مقادیر تصادفی تاخیر زمانی از MPC اصلاح شده استفاده شده است. در [۱۲] طراحی و پیاده‌سازی عملی کنترل پیش‌بین تحت شبکه اینترنت برای یک سروو موتور ارائه شده است. در این کار الگوریتم به گونه‌ای ارائه شده تا تاخیر زمانی ناشی از شبکه را جبران نماید. در [۱۳] کنترل پیش‌بین بر اساس آنالیز تاخیر زمانی حلقه کنترل تحت شبکه اینترنت، ارائه شده است. در [۱۴] یک روش بهبودیافته کنترل پیش‌بین مدل به منظور جبران‌سازی تاخیرهای زمانی ناشی از شبکه ارائه شده است. در [۱۵] از یک MPC با قابلیت جبران‌سازی اثرات تاخیر زمانی بر عملکرد سیستم کنترل تحت شبکه در شبکه‌های اترنت استفاده شده است.

علاوه بر تاخیر زمانی ناشی از شبکه، مساله دیگری که در رابطه با NCS ها وجود دارد، قطع و فقدان بسته‌های اطلاعات^۲ در مسیر پیشخور و بازخورد حلقه کنترلی است. در [۸] از روش کنترل پیش‌بین به منظور جبران‌سازی اثرات ناشی از فقدان بسته‌های اطلاعاتی استفاده شده است.

در [۴۳] از تحلیل H_{∞} زمان محدود به منظور جبران‌سازی در NCS هایی که دچار تاخیر زمانی متغیر با زمان و فقدان داده، هستند، استفاده شده است.

^۱ Model Predictive Control(MPC)

^۲ Packet Dropout

با توجه به اینکه عدم قطعیت مدل به صورت صریح در الگوریتم‌های پیش‌بین مدل مرسوم وارد نمی‌شود در [۴۱]، روش جامعی برای کنترل پیش‌بین مدل مقاوم^۱ در سیستم‌های با عدم قطعیت در مدل و قید در ورودی و خروجی ارائه شده است. روش ارائه شده مبتنی بر حل یک مساله بهینه‌سازی (min-max) با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی^۲ است. استفاده از چندضلعی‌های عدم قطعیت در توصیف عدم قطعیت مدل از نکات برجسته این تحقیق است که در تحقیقات بعدی در این زمینه از آنها استفاده شده است. در [۴۲] با استفاده از چندضلعی‌های عدم قطعیت در توصیف مدل‌های شامل تاخیر زمانی نامعین و الگوریتم ارائه شده در کنترل پیش‌بین مدل مقاوم، الگوریتم جامعی در جبران‌سازی تاخیرهای زمانی ناشی از شبکه در NCS ها ارائه شده است. الگوریتم ارائه شده مبتنی بر فیدبک حالت است که بهره آن از حل یک مساله بهینه‌سازی مبتنی بر نامساوی‌های ماتریسی خطی، حاصل می‌شود. در تحقیق مورد اشاره نشان داده می‌شود که با در نظر گرفتن افق بینهایت کنترل، پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می‌گردد. در [۶] پس از تحلیل تاخیرهای زمانی در حلقه‌های کنترل تحت شبکه فیلدباس، الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل مقاوم به گونه ای اصلاح می‌شود که برای سیستم‌های با بعد بزرگ، حجم محاسبات در محاسبه بهره فیدبک حالت کاهش یابد. مساله ای که در پیاده‌سازی واقعی الگوریتم‌های پیش بین مقاوم بسیار اهمیت دارد. همچنین به منظور تست تجربی الگوریتم ارائه شده در مقاله، روشی آفلاین برای محاسبه بهره فیدبک حالت و ذخیره آن در یک جدول بهره ارائه شده است.

۳-۱ هدف از انجام تحقیق

در این تحقیق به تحلیل و ارزیابی تاخیرهای زمانی در حلقه‌های کنترل تحت شبکه‌های صنعتی و روش‌های جبران‌سازی تاخیرهای زمانی ناشی از شبکه پرداخته می‌شود. تمرکز این تحقیق بر شبکه‌های صنعتی سطح فیلد به ویژه دو شبکه PROFIBUS PA و فیلدباس می‌باشد. اکثر تحقیقات صورت گرفته در این زمینه بر روی شبکه‌های اترنت و FF H1 صورت پذیرفته که در آن از الگوریتم‌های پیش‌بین با حجم محاسبات بالا استفاده شده است به همین دلیل قابلیت به‌کارگیری برخط^۳ در سیستم‌های بلادرنگ صنعتی را ندارند.

نکته کلیدی در جبران‌سازی تاخیر زمانی در یک NCS، تعیین مدل تاخیر زمانی است. در [۲]، [۳] و [۵] مدل تاخیر زمانی در NCS های تحت شبکه‌های صنعتی به صورت ثابت و کراندار در نظر گرفته شده

^۱ Robust Model Predictive Model (RMPC)

^۲ Linear Matrix Inequalities (LMIs)

^۳ Online

است. استراتژی جبرانسازی در NCS ها بر اساس مدل تاخیر زمانی تعیین می‌شود. تمرکز تحقیقات در این رساله بر روی NCS های تحت پروتکل‌های شبکه‌های سطح فیلد صنعتی همچون فیلدباس، پروفیباس و هارت در سیستمهای DCS و اتوماسیون فرآیند، می‌باشد. به این دلیل و بر اساس تحقیقات ذکر شده قبلی در این خصوص، مدل تاخیر زمانی به صورت ثابت – کراندار در نظر گرفته می‌شود. در این کار سعی بر این است که ضمن تعمیم روش‌های تحلیل و ارزیابی تاخیر زمانی به شبکه‌های پرکاربرد و رو به توسعه دیگر نظیر پروفیباس، از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل مقاوم برای جبرانسازی استفاده شود. با توجه به اینکه روشهای پیش‌بین مستلزم محاسبات سنگین است و اغلب در کاربردهای بلادرنگ قابل استفاده نمی‌باشد، الگوریتم RMPC بایستی به گونه‌ای اصلاح گردد تا حجم محاسبات برای کاربردهای بلادرنگ و پیاده سازی عملی کاهش یابد. با استفاده از نتایج این تحقیق امکان پیاده سازی NCS ها در شبکه‌های سطح فیلد، فراهم و اثرات تاخیر زمانی شبکه‌ها بر عملکرد و پایداری سیستم کنترل حلقه بسته به حداقل کاهش می‌یابد.

همچنین در بخشی از رساله تحلیل و ارزیابی تاخیرهای زمانی در سیستم‌های کنترل تحت شبکه Modbus RTU، ارائه و نتایج تجربی حاصل از تست آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱ نوآوری تحقیق

با توجه به اینکه امروزه اکثر حلقه‌های کنترلی به ویژه در کاربردهای صنعتی تحت شبکه پیاده می‌شوند، مطالعه اثرات ناشی از شبکه همچون تاخیر زمانی و از دست رفتن داده‌ها بر حلقه‌های کنترلی از اهمیت بالایی برخوردار است. اثرات ناشی از شبکه زمانی که با نقص در مدل‌سازی فرآیند همراه باشند، طراحی کنترل‌کننده را با مشکلات بیشتری مواجه می‌کند. همچنین ماهیت تاخیر زمانی نیز بر عملکرد سیستم کنترل تاثیرگذار می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق ابتدا تحلیلی از تاخیرهای زمانی در حلقه‌های کنترلی مبتنی بر شبکه پروفیباس، فیلدباس و مدباس ارائه می‌گردد، سپس استراتژی کنترلی مبتنی بر الگوریتم‌های پیش‌بین مقاوم به منظور جبرانسازی سیستم کنترل تحت شبکه که شامل تاخیر زمانی ثابت-کراندار همراه با عدم قطعیت و ترم اغتشاش ورودی می‌باشد، توسعه می‌یابد.

الگوریتم توسعه‌یافته ارائه شده در این تحقیق، پایداری سیستم حلقه بسته را در حضور تاخیر زمانی، عدم قطعیت مدل و اغتشاش در ورودی سیستم تضمین و پارامترهای موثر بر عملکرد سیستم کنترل حلقه بسته را بهبود می‌بخشد.

۵-۱ ساختار گزارش

در این رساله ابتدا با معرفی سیستم‌های کنترل تحت شبکه و بررسی اثرات تاخیر زمانی بر پایداری و عملکرد آنها، تاخیر زمانی در حلقه‌های کنترل تحت شبکه‌های پروفیباس و فیلدباس مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین روشی تحلیلی در ارزیابی تاخیر زمانی در حلقه‌های کنترل تحت شبکه مدباس بر پایه نتایج تجربی، ارائه می‌شود.

سپس در فصل سوم با بررسی جدیدترین روشهای پیش‌بین برای جبرانسازی تاخیر زمانی در حلقه‌های کنترل تحت شبکه، نقاط قوت و ضعف هر یک بررسی می‌گردد.

در فصل چهارم کنترل کننده پیش بین مدل مقاوم پیشنهادی برای جبرانسازی تاخیر زمانی در حضور عدم قطعیت مدل و ترم اغتشاش ارائه می‌شود. در نهایت در فصل پنجم با ارائه نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهیم که کنترل کننده پیشنهادی به خوبی می‌تواند پایداری سیستم کنترل تحت شبکه را در حضور توامان تاخیر زمانی و عدم قطعیت مدل تضمین نماید و پارامترهای عملکردی سیستم حلقه بسته را بهبود بخشد. همچنین در این فصل نتایج شبیه‌سازی برای سیستم‌های شامل ورودی اغتشاش نیز ارائه می‌شود. در فصل پایانی با جمع بندی نتایج این پژوهش اشاره ای به فعالیتهای باز تحقیقاتی در این زمینه خواهیم داشت.

فصل دوم

مفاهیم سیستم های کنترل تحت شبکه

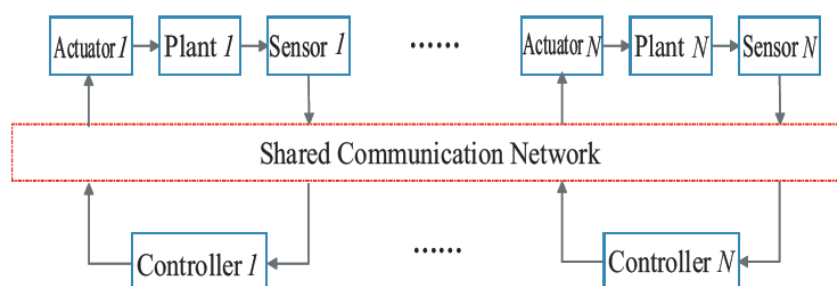
فصل ۲- مفاهیم سیستم‌های کنترل تحت شبکه

۱-۲ مقدمه

در این فصل راجع به مفاهیم سیستم‌های کنترل تحت شبکه (NCSs) و تحلیل تاخیرهای زمانی ناشی از شبکه در NCS ها مطالبی ارائه می‌شود و به اثرات چنین تاخیر زمانی‌ای بر عملکرد و پایداری حلقه‌های کنترلی اشاره می‌گردد. همچنین مروری بر روشهای تحلیل و جبرانسازی تاخیر زمانی در NCS های تحت شبکه‌های صنعتی انجام می‌شود. در بخش پایانی این فصل روش تحلیلی ارزیابی تاخیر زمانی در NCS های تحت شبکه مدباس^۱ ارائه می‌شود.

۲-۲ سیستم کنترل تحت شبکه (NCS)

سیستم‌های کنترل تحت شبکه، سیستم‌هایی هستند که حلقه‌های کنترلی در آنها از طریق شبکه شکل می‌گیرد به گونه ای که سیگنالهای فیدبک و کنترل از طریق شبکه بین اجزای مختلف سیستم (کنترل کننده‌ها، سنسورها و اکچویتورها) مورد تبادل قرار می‌گیرند. شکل (۱-۲) تعریفی از سیستم کنترل مبتنی بر شبکه (Networked Control System) که از این پس به اختصار NCS نامیده میشود را نشان میدهد.



شکل ۱-۲ بلوک دیاگرام NCS ها [۱]

کاربرد NCS ها امروزه بسیار گسترده شده است و یکی از مهمترین کاربردهای آن در کنترل صنعتی و کنترل فرآیند است. اگرچه استفاده از شبکه های ارتباطی مزایایی را ایجاد کرده است اما مسائل چالش برانگیزی را نیز باعث شده است. تعدادی از این مسائل عبارتند از: تراکم و گرفتگی شبکه در نتیجه نمونه برداری با فرکانس بالا که حجم زیادی از دیتا را در شبکه ایجاد میکند، پهنای باند محدود شبکه که منجر به ایجاد تاخیرهای زمانی می‌گردد و خطای کوانتیزاسیون که به دلیل کوانتیزه کردن سیگنالهای نمونه برداری

^۱ Modbus

شده در تعداد بیت محدودی حاصل میشود. این مسائل در شبکه های ارتباطی باعث تاثیر مستقیم بر عملکرد و پایداری یک NCS میگردد. مهمترین مساله تاثیر گذار در NCS ها تاخیرهای زمانی ای است که به صورت یک ترم تاخیردار در مدل فرآیند خود را نشان میدهد و عملکرد و پایداری سیستم کنترل حلق بسته را تضعیف میکند. به این دلیل که NCS یک بحث مشترک بین تئوری کنترل و تئوری مخابرات است، تحلیل NCS ها پیچیده تر و امروزه توجهات فزاینده ای را از سوی محققین به خود جلب نموده است.

در یک نگاه کلی، تحقیقات بر روی NCS ها به دو بخش تقسیم بندی میشوند:

- I. تحلیل شبکه: این بخش بیشتر بر مطالعه و تحقیق در ارتباطات و شبکه ها و تحلیل پارامترهای شبکه و محاسبه محدوده تاخیرهای زمانی به منظور مناسب سازی شبکه برای NCS های بلادرنگ متمرکز است.
- II. کنترل تحت شبکه: این بخش بیشتر با استراتژیهای کنترلی و طراحی سیستم کنترل تحت شبکه به منظور حداقل سازی اثرات نامطلوب شبکه همچون تاخیر زمانی و حذف بسته های داده بر عملکرد و پایداری NCS سروکار دارد.

۲-۳ تاخیر زمانی ناشی از شبکه در NCS

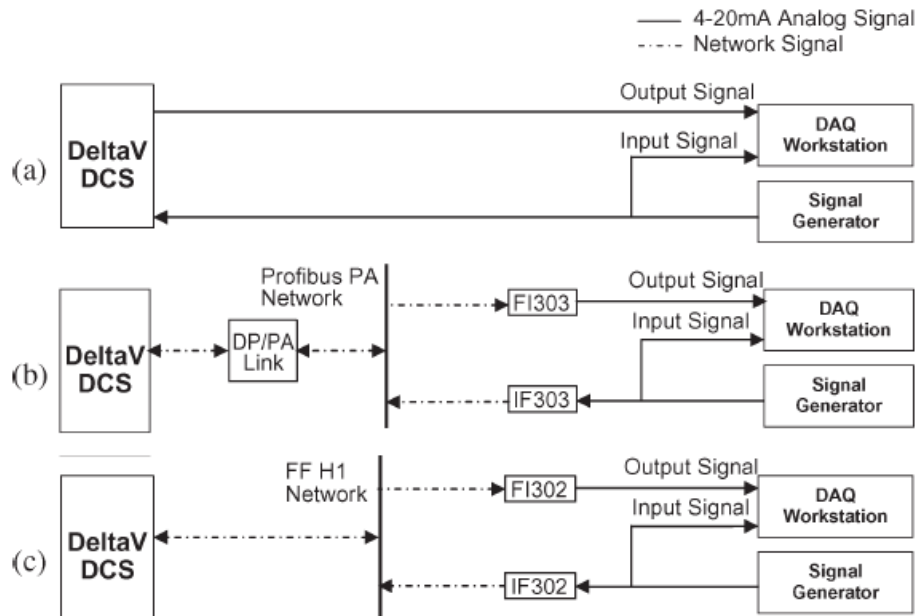
همانطور که اشاره شد در کنار جذابیت های زیادی که استفاده از شبکه ها در حلقه های کنترلی وجود دارد، محدودیتهایی نیز ایجاد میکند. این محدودیت ها شامل تاخیر زمانی، ارسال نامطمئن بسته های دیتا و از بین رفتن بسته های دیتا است که باعث تخریب عملکرد و پایداری سیستم کنترل حلقه بسته میشود یکی از مهم ترین مسائلی که در سیستم های کنترل تحت شبکه با آن مواجه میباشیم، تاخیرهای زمانی ناشی از شبکه است. نتایج بررسی ها در NCSS نشان میدهد که مقادیر این تاخیر زمانی قابل توجه است. هنگامی که اندازه گیریها در یک سیستم کنترل برای کاربردهای حلقه باز مورد استفاده قرار میگیرند جبران سازی تاخیر زمانی از طریق کالیبراسیون مناسب زمانی سیگنالهای دریافتی انجام میشود اما اگر سیگنالهای دریافتی از سنسورها و ارسالی به اکتویترها جزئی از حلقه های بسته کنترلی باشند، با توجه به اینکه رفتار شبکه تاثیر زیادی بر عملکرد و پایداری حلقه کنترلی میگذارد، روشهای متفاوتی برای جبران سازی و کاهش اثرات تاخیرهای زمانی مورد استفاده قرار میگیرد. تحلیل، تخمین و محاسبه تاخیرهای زمانی در شبکه بخش اول از پروسه جبران سازی است.

تاکنون و در تحقیقات انجام شده، تحلیل و ارزیابی تاخیرهای زمانی در شبکه های مختلف صنعتی همچون Foundation Fieldbus و Profibus PA به صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است اما با توجه به رشد سریع تکنولوژی ارتباطات و شبکه های صنعتی به ویژه شبکه های سطح فیلد که بخش زیادی از حلقه های کنترلی فرآیندهای صنعتی از طریق این شبکه ها پیاده سازی می شوند، همچنان افق های جدیدی در این رابطه پیش روی محققان قرار دارد. در ادامه تحلیل و ارزیابی تاخیر زمانی در حلقه های کنترلی شبکه PA و FF H1 بررسی می گردد.

۲-۴ ارزیابی تاخیرهای زمانی ایجاد شده در شبکه PROFIBUS PA

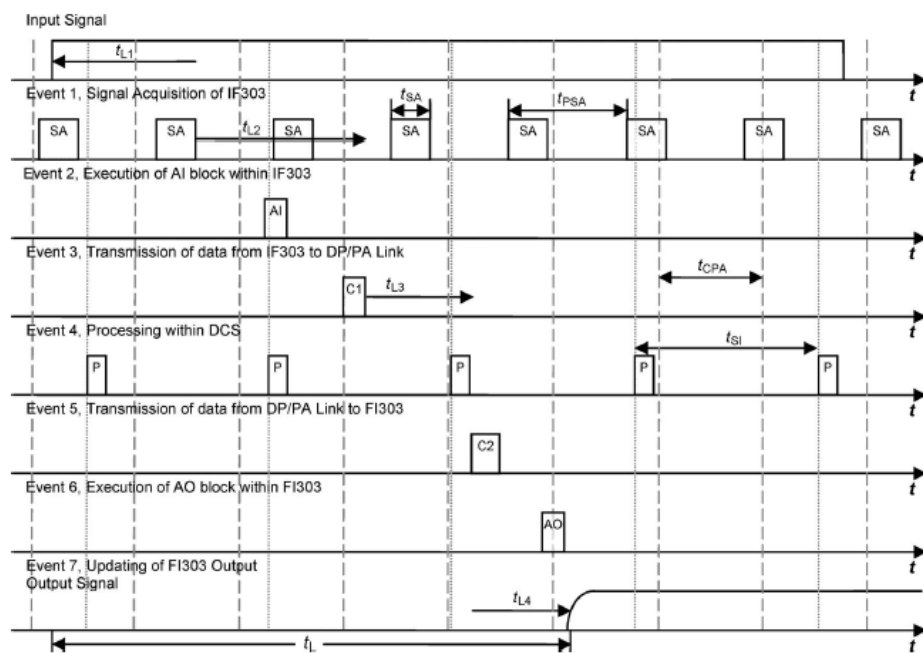
انواع مختلفی از شبکه های دیجیتال صنعتی در سیستمهای اتوماسیون ارائه شده اند. امروزه این شبکه ها در کنترل صنعتی به منظور جایگزینی کانالهای آنالوگ مورد استفاده قرار می گیرند. در صنایع فرآیندی Pofibus PA و Foundation Fieldbus (FF) H1 دو تکنولوژی برتر شبکه های سطح فیلد^۱ هستند که در کنترل فرآیند مورد استفاده قرار می گیرند. در [۳] تاخیر زمانی ناشی از شبکه FF H1 به صورت تحلیل و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار تاخیر زمانی شبکه به عنوان زمان اضافه ای تعریف می شود که به علت جایگزینی یک حلقه کنترلی آنالوگ با نوع دیجیتالی آن در سیستم DCS ایجاد می گردد. به منظور تست و ارزیابی زمان های تاخیر در شبکه PA و مقایسه آن با نوع FF H1 و آنالوگ، حلقه های کنترلی به صورت شکل (۲-۲) در نظر گرفته شده است.

¹ Filed Level



شکل ۲-۲ حلقه های کنترلی تست برای تحلیل تاخیرهای زمانی حلقه های تحت شبکه PA و مقایسه آن با حلقه آنالوگ و شبکه FF H1 [۲]

دیگرام زمانی حلقه کنترل تحت شبکه Profibus PA با زمانبندی های مربوطه در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ دیگرام زمانی حلقه کنترل تحت شبکه Profibus PA [۲]

همانطور که از شکل (۳-۲) مشخص است کل زمان تاخیر شبکه که با t_L نشان داده می‌شود از مجموع چهار قسمت که به صورت زیر فرمول بندی و محاسبه می‌شوند، تشکیل شده است.

$$\bar{t} = 0.5t_{PSA} + t_{SA} \quad (۱-۲)$$

$$\bar{t}_{L2} = 0.5t_{PAI} + t_{AI} + 0.5t_{CPA} + t_{CI} \quad (۲-۲)$$

$$\bar{t}_{L3V} = 2t_{CPA} - \frac{t_{CPA}^2}{t_{SI}} \quad (۳-۲)$$

$$\bar{t}_{L4} = t_{c2} + 0.5t_{PAO} + t_{AO} + t_{RF} \quad (۴-۲)$$

جدول (۱-۲) مقایسه بین مقادیر تاخیر زمانی حلقه کنترلی تحت شبکه های PA، FF H1 و حلقه آنالوگ را به ازای مقادیر مختلف زمان پردازش t_{SI} در کنترلر نشان می‌دهد.

جدول ۲- ۱ مقایسه بین مقادیر تاخیر زمانی در حلقه های کنترلی تحت شبکه های PA ، FF و آنالوگ [۶]

t_{SI} (ms)	Communication Channels	Mean (ms)	Min (ms)	Max (ms)
100	Analog	149	90	220
	Profibus PA	1123	590	1790
	FF H1 (Hybrid)	727	490	1030
	FF H1 (CiF)	566	270	800
200	Analog	198	100	310
	Profibus PA	1159	620	1690
	FF H1 (Hybrid)	777	500	1200
	FF H1 (CiF)	554	280	840
500	Analog	358	110	600
	Profibus PA	1307	700	2110
	FF H1 (Hybrid)	918	480	1370
	FF H1 (CiF)	552	270	830
1000	Analog	582	100	1070
	Profibus PA	1567	600	2510
	FF H1 (Hybrid)	1159	550	1830
	FF H1 (CiF)	546	270	770
2000	Analog	1096	130	2050
	Profibus PA	2048	540	3470
	FF H1 (Hybrid)	1654	500	2800
	FF H1 (CiF)	550	290	810

۲-۵ ارزیابی تاخیرهای زمانی ایجاد شده توسط شبکه FF $H1$

در [۵] تاخیرهای زمانی ناشی از دریافت، تبدیل و انتقال سیگنالهای اندازه گیری و کنترل یک حلقه کنترلی در شبکه FF $H1$ به جزئیات مورد تحلیل قرار گرفته است و محدوده تغییرات این تاخیرهای زمانی تعیین شده اند. سپس یک کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل برای جبران سازی این تاخیرهای زمانی بسط یافته و استفاده شده است.

از لحاظ تحلیل در حوزه فرکانس، تاخیرهای زمانی در حلقه های کنترل باعث ایجاد یک پس فازی اضافی و کاهش حاشیه فاز سیستم میگردند، بنابراین علاوه بر تضعیف مشخصات عملکرد حلقه کنترلی، تاخیرهای زمانی مستقیماً بر پایداری سیستم تاثیر میگذارند.

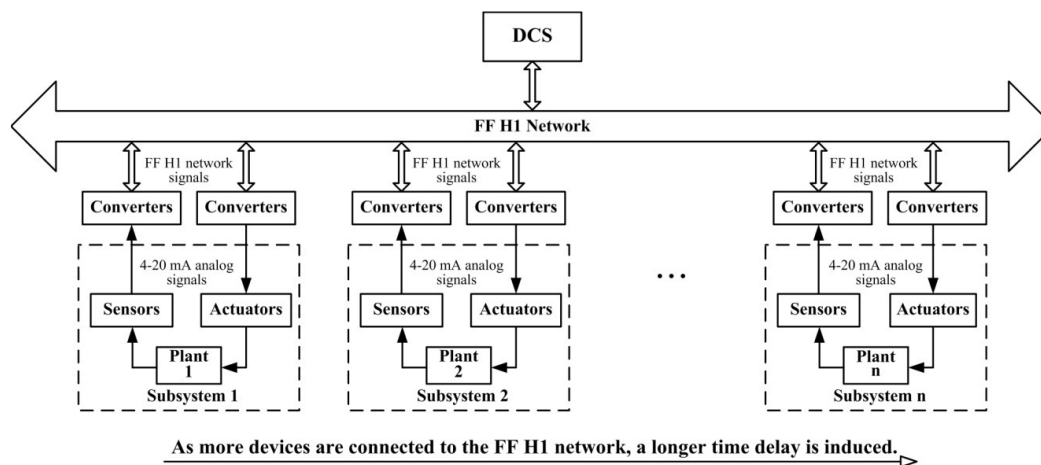
در [۹] نشان داده شده است که تاخیرهای زمانی در شبکه FF $H1$ ثابت نیستند. در بهترین حالت میتوان تخمینی از محدوده تغییرات این تاخیر زمانی بدست آورد که مستقیماً به زمان اسکن تنظیم شده

شبکه و تعداد تجهیزات متصل به شبکه مرتبط است. بنابراین اولین گام در جبرانسازی تاخیر زمانی در شبکه FF H1 تحلیل و تخمین مقادیر تاخیر زمانی است.

۲-۵-۱ ساختار NCS در شبکه FF H1

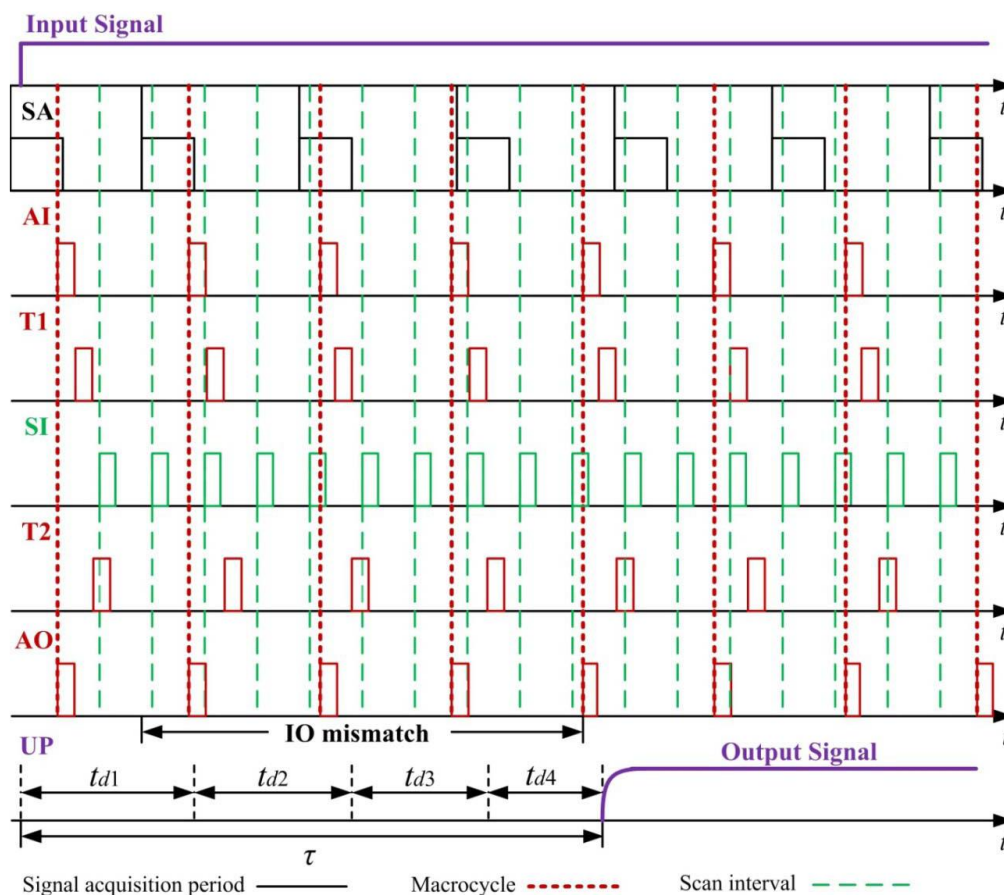
در کاربردهای صنعتی مشخصات هشت شبکه فیلدباس در استاندارد IEC61158 تعریف شده است. برای کاربردهای مختلف و بر اساس پهنای باند و سایر موارد یکی از این فیلدباس ها به کار گرفته میشوند. یک از محبوب ترین فیلدباسها در فرآیندهای صنعتی، شبکه Foundation Fieldbus H1 یا به اختصار FF H1 است. FF H1 یک شبکه دیجیتال سریال با قابلیت اتصال چندین تجهیز (تا ۳۲ نود) بر روی باس است. این قابلیت باعث شده تا شبکه FF H1 جایگزین مناسبی برای استاندارد آنالوگ ۴ تا ۲۰ میلی آمپر در سطح فیلد گردد.

در شکل (۲-۴) بلوک دیاگرام NCS ها در شبکه FF H1 نشان داده شده است که در آن سیگنالهای بین DCS، اکچویتورها و سنسورها از طریق شبکه FF H1 مورد تبادل قرار میگیرند. افزایش تعداد تجهیزات متصل به شبکه در یک چنین ساختاری به زمان تاخیر بزرگتری در حلقه می انجامد.



شکل ۲-۴ بلوک دیاگرام کلی NCS در شبکه FF H1 [۵]

دیاگرام زمانی اجزای مختلف شبکه FF H1 جهت محاسبه تاخیر زمانی با در نظر گرفتن تمام جنبه های دخیل در ایجاد تاخیر زمانی در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل ۵-۲ دیگرام زمانی حلقه کنترل تحت شبکه FF H1 [۵]

که در آن متغیرهای نشان داده شده در شکل (۵-۲) به صورت جدول (۲-۲) تعریف می‌شوند:

جدول ۲-۲ تعریف متغیرهای شکل ۵-۲ [۵]

متغیر	مفهوم سمبل
T_{SA}	مدت زمان مورد نیاز جهت تکمیل دریافت یک دیتا
T_{PSA}	پریود دریافت سیگنال در سنسور
T_{AI}	مدت زمان اجرای تابع AI در سنسور
T_{T1}	مدت زمان مورد نیاز برای ارسال دیتا از IF302 به ماژول FF H1
T_{SI}	فاصله زمانی اسکن توسط کنترلر DeltaV (پریود اجرای برنامه کنترل)
T_{T2}	مدت زمان مورد نیاز برای ارسال دیتا از ماژول FF H1 به FI302
T_{AO}	مدت زمان اجرای تابع AO در اکچویتر
T_{UP}	مدت زمان مورد نیاز برای افزایش سیگنال در خروجی به میزان ۱۰ درصد
T_M	سیکل ماکرو
N_d	تعداد تجهیزات متصل به شبکه FF H1

۲-۵-۲ محاسبه محدوده تاخیر زمانی در شبکه FF H1

همانطور که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است، کل تاخیر زمانی τ حلقه کنترل از چهار قسمت به صورت روابط (۵) تشکیل میشود:

$$\begin{aligned} t_{d1} &\in [T_{SA} \cdot T_{SA} + T_{PSA}] \\ t_{d2} &\in [T_{AI} + N_d \times T_{T1} \cdot T_M + T_{AI} + N_d \times T_{T1}] \quad (۵-۲) \\ t_{d3} &= T_M \\ t_{d4} &= T_M - (T_{AI} + N_d \times T_{T1}) + T_{AO} + T_{UP} \\ \tau &= t_{d1} + t_{d2} + t_{d3} + t_{d4} \end{aligned}$$

و حد بالا و پایین کل تاخیر زمانی به صورت زیر حاصل میشود:

$$\tau \in [\underline{\tau}, \overline{\tau}] = [(2T_M + T_{SA} + T_{AO} + T_{UP}) \cdot (3T_M + T_{SA} + T_{PSA} + T_{AO} + T_{UP})] \quad (۶-۲)$$

بنابراین محدوده تاخیرهای زمانی برای شبکه FF H1 به صورت رابطه (۶-۲) به دست می‌آید. با داشتن حد بالا و پایین تاخیرهای زمانی که به صورت ثابت - کراندار می‌باشد، امکان اعمال روش‌های جبرانسازی وجود دارد.

۲-۶-۲ جبرانسازی تاخیر زمانی در NCSs

روشهای مختلفی برای جبرانسازی تاخیر زمانی در NCSs ارائه شده است که استفاده از راهکار سیستم‌های تاخیردار، روشهای مقاوم، روش سیستم‌های اتفاقی و روشهای پیش بین مبتنی بر مدل از مهم‌ترین این روشها به شمار می‌رود که در این بخش خلاصه‌ای از هر روش بیان می‌گردد

۲-۶-۱-۲ روش سیستم‌های تاخیردار

در این روش که از روش تاخیر ورودی در سیستم‌های نمونه برداری دیتا مشتق شده است، سیستم حلقه بسته به صورت یک سیستم با تاخیر متغیر با زمان مدل می‌شود. کل تاخیر NCS، به طور ضمنی در حد بالای تاخیر ورودی لحاظ می‌شود:

سیستم نمونه برداری دیتا به فرم زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t). \quad x(t_0) = x_0 \\ u(t) &= Kx(t_k). \quad t_k \leq t < t_{k+1}\end{aligned} \quad (۷-۲)$$

طبق روش تاخیر ورودی، ابتدا سیستم فوق را به صورت سیستم زمان پیوسته زیر تعریف می‌کنیم:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + BKx(t - T_1(t)). \quad t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (۸-۲)$$

که در آن $T_1(t) = t - i_k h$ تاخیر ورودی نامیده می‌شود و h زمان نمونه‌برداری است و داریم:

$$T_{min} \leq T_1(t) < T_{max}$$

سپس با استفاده از تابع لیاپانوف - کراسوفسکی که به صورت رابطه (۹-۲) تعریف می‌شود، ماکزیمم

مقدار مجاز حد بالای تاخیر زمانی به نحوی که مشخصات مطلوب سیستم حفظ گردند به دست می‌آید:

$$V(t, x_t) = x^T(t)Px(t) + \int_{-T_{max}}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s)R\dot{x}(s)dsd\theta \quad (۹-۲)$$

۲-۶-۲ - روشهای کنترل مقاوم

در روش مقاوم ابتدا تقریبی مرتبه اول از تاخیر زمانی به دست می‌آید. اگر تاخیر شبکه را با τ^n

نمایش دهیم، داریم:

$$\begin{aligned}\tau^n &= \frac{1}{2}(\tau_{max} + \tau_{min}) + \frac{1}{2}(\tau_{max} - \tau_{min})\delta. \quad -1 \leq \delta \leq 1 \\ &= (1 - \alpha)\tau_{max} + \alpha\tau_{max}\delta. \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2}\end{aligned} \quad (۱۰-۲)$$

و تقریب مرتبه اول ترم $e^{-\tau^n s}$ به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned}e^{-\tau^n s} &= e^{-s(1-\alpha)\tau_{max}} e^{-s\alpha\tau_{max}\delta} \approx \frac{1 - \frac{s\tau^n}{2}}{1 + \frac{s\tau^n}{2}} \\ &\approx \left(\frac{1-s(1-\alpha)\tau_{max}/2}{1+s(1-\alpha)\tau_{max}/2} \right)\end{aligned} \quad (۱۱-۲)$$

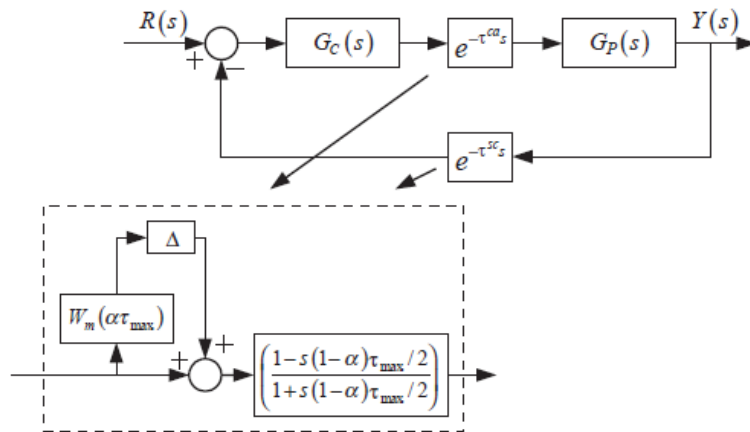
$$\approx \frac{1 - s\alpha\tau_{max}\delta/2}{1 + s\alpha\tau_{max}\delta/2}$$

بخش غیر قطعی از این تقریب به فرم زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{1-s\alpha\tau_{max}\delta/2}{1+s\alpha\tau_{max}\delta/2} = 1 + W_m(s)\Delta \quad (12-2)$$

$$W_m(s) = \frac{\alpha\tau_{max}s}{1+\alpha\tau_{max}s/3.465} \quad (13-2)$$

سپس از این روابط و با استفاده از روش H^∞ و آنالیز μ کنترل کننده $G_c(s)$ برای سیستم $G_p(s)$ طراحی می‌گردد. حلقه کنترل در روش کنترل مقاوم با استفاده از روابط (۱۰-۲) تا (۱۳-۲) در شکل (۶-۲) نشان داده شده است:



شکل ۶-۲ پیکربندی یک NCS در روش کنترل مقاوم [۱]

۳-۶-۲ روش سیستم های اتفاقی

در یک NCS، تاخیرهای زمانی ناشی از شبکه در مواقعی مشخصه اتفاقی دارند. روشهای اتفاقی یک ابزار قدرتمند برای تحلیل و کنترل NCS هایی با تاخیر زمانی رندوم ارائه می‌کند. مدل زمان گسسته تاخیر دار یک NCS را به فرم زیر در نظر می‌گیریم:

$$x(k+1) = Ax(k) + BKx(k-d(k)) \quad (14-2)$$

که در آن تاخیر زمانی متغیر با زمان $d(k)$ یک عدد صحیح مثبت متعلق به مجموعه زیر است:

$$\{T_1, \dots, T_q\} \text{ with } T_j < T_{j+1} \ (j = 1, 2, \dots, q-1)$$

با توزیع احتمال $Pr\{d(k) = T_j\}$ و همچنین داریم:

$$\sum_{j=1}^q \alpha_j = 1 \text{ و } Pr\{d(k) = T_j\} = \alpha_j$$

در اینصورت یک تعریف اتفاقی از رابطه (۲-۱۴) به فرم زیر است:

$$x(k+1) = Ax(k) + \sum_{j=1}^q I_{d(k)=T_j} BKx(k-T_j) \quad (2-15)$$

روش سیستم های تاخیر دار بر اساس رابطه (۲-۱۴) به یافتن ماکزیمم تاخیر زمانی مجاز برای پایداری مجانبی سیستم می انجامد در حالی که روش اتفاقی مبتنی بر رابطه (۲-۱۵) چک می کند که آیا سیستم به ازای برخی احتمالات α_j که مرتبط با مقادیر تاخیر زمانی T_j ($j = 1, 2, \dots, q$) می باشد، پایدار با معیار متوسط مربعات می باشد یا خیر. بنابراین روش سیستم های اتفاقی نسبت به روش سیستم های تاخیر دار از محافظه کاری کمتری برخوردار است. همچنین برای مقادیر اتفاقی تاخیرهای زمانی، روش سیستم های تاخیردار هیچ گونه نظری در رابطه با پایداری سیستم نمی تواند داشته باشد.

۲-۶-۴ روشهای کنترل پیش بین مبتنی بر مدل

یکی از روشها برای جبران سازی تاخیرهای زمانی در شبکه ها، استفاده از مدل هایی از سیستم است که بتواند رفتار سیستم را پیش بینی کند. این دسته از روشهای کنترلی به اختصار کنترل پیش بین مبتنی بر مدل^۱ نامیده میشود. در واقع در اکثر تحقیقات صورت گرفته، MPC به عنوان کاندیدی برای جبران تاخیرهای زمانی در NCS ها در نظر گرفته شده است. در [۱۰] و [۱۱] برای جبران سازی مقادیر تصادفی تاخیر زمانی از MPC اصلاح شده استفاده شده است. در [۱۲] تا [۱۴] استراتژی های MPC برای جبران تاخیر زمانی در یک سیستم کنترل سروو مبتنی بر شبکه اینترنت، مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۵] از یک MPC با قابلیت جبران سازی اثرات تاخیر زمانی بر عملکرد سیستم کنترل تحت شبکه در شبکه های اترنت استفاده شده است. در این بخش راهکار جبران سازی تاخیر زمانی با استفاده از کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل ارائه می گردد.

۲-۷- جبران سازی تاخیر زمانی به روش کنترل مقاوم پیش بین

در این بخش روش جبران سازی تاخیر زمانی در NCS ها با تکنیک کنترل پیش بین مبتنی بر مدل مقاوم^۲ ارائه می گردد.

^۱ Model Predictive Control (MPC)

^۲ Robust Model Predictive Control (RMPC)

۲-۷-۱- طراحی جبرانساز MPC

مدل حلقه باز سیستم نشان داده شده در شکل (۲-۴) به فرم فضای حالت و با در نظر گرفتن تاخیر زمانی $\tau \in [\underline{\tau}, \bar{\tau}]$ ناشی از شبکه را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (۲-۱۶)$$

که در آن $x \in R^n$ ، $u \in R^m$ ، $y \in R^p$ به ترتیب بردارهای خروجی، ورودی و حالت می‌باشند.

پارامتر $\tau \in [\underline{\tau}, \bar{\tau}]$ نشان دهنده تاخیر زمانی نامعین ثابت اما با حد بالا و پایین مشخص است. با انتخاب مناسب دوره نمونه برداری برابر با T_{PSA} مدل گسسته فضای حالت (۲-۱۶) به فرم زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} x_{k+1} = (I + \tilde{A})x_k - \tilde{A}x_{k-1} + \tilde{B}_{\underline{d}}\Delta u_{k-\underline{d}} + \dots + \tilde{B}_{\bar{d}}\Delta u_{k-\bar{d}} \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (۲-۱۷)$$

نکته‌ای که در گسسته‌سازی سیستم پیوسته در زمان وجود دارد این است که در رابطه (۲-۱۷) تاخیر

زمانی کل سیستم حلقه بسته لحاظ می‌شود نه فقط تاخیر زمانی مسیر ورودی در سیستم حلقه باز. متغیرهای رابطه (۲-۱۷) به فرم جدول (۲-۳) تعریف می‌شوند:

جدول ۲-۳ تعریف متغیرهای رابطه (۲-۱۷) [۵]

متغیر	تعریف
$\tilde{A}$	$\tilde{A} = e^{A \times t_{PSA}}$
$\tilde{B}_i$	$\tilde{B}_i = \int_0^{t_{PSA}} e^{A \times s} B_i ds ; i = \underline{d}, \dots, \bar{d}$
t_{PSA}	$t_{PSA} = t_k - t_{k-1}$ مدت زمان بین دونمونه متوالی بر حسب ثانیه
k	شاخص زمانی
Δu_j	$\Delta u_j = u_j - u_{j-1} ; j = k - \bar{d}, \dots, k - \underline{d}$
$\underline{d}$	$\underline{d} = fl(\underline{\tau}/t_{PSA}),$
$\bar{d}$	$\bar{d} = cl(\bar{\tau}/t_{PSA}),$
$fl(\cdot)$	تابعی که نزدیکترین عدد صحیح کوچکتر از (.) را برمی‌گرداند
$cl(\cdot)$	تابعی که نزدیکترین عدد صحیح بزرگتر از (.) را برمی‌گرداند
$I_{n \times n}$	ماتریس همانی $n \times n$

از چند ضلعی نامعینی برای تعریف مدل NCS شامل تاخیر زمانی نامعین در فضای گسسته استفاده می‌شود. برای تعریف نامعینی در تاخیر زمانی از سیستم $M_i; (i = \underline{d}, \dots, \bar{d})$ به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$M_i : x_{k+1} = (I + \tilde{A})x_k - \tilde{A}x_{k-1} + \tilde{B}\Delta u_{k-i} \quad (۱۸-۲)$$

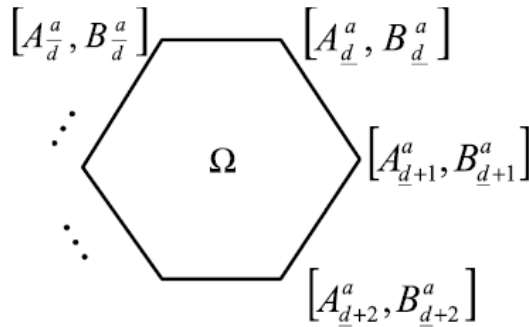
که در آن $\tilde{B} = \int_0^{T_{PSA}} e^{As} B ds$ ، یک بردار حالت به صورت زیر تعریف می‌کند:

$$x_k^a = [x_k, x_{k-1}, \Delta u_{k-\bar{d}}, \dots, \Delta u_{k-\underline{d}}, \dots, \Delta u_{k-1}] \quad (۱۹-۲)$$

با تعریف بردار حالت جدید به فرم (۱۹-۲)، روابط (۱۷-۲) و (۱۸-۲) به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$x_{k+1}^a = A^a x_k^a + B^a \Delta u_k \quad (۲۰-۲)$$

که در آن ماتریسهای (A^a, B^a) توابعی از تاخیر زمانی نامعین هستند. شکل (۷-۲) نمایش گرافیکی ای از چندضلعی توصیف کننده سیستم با تاخیر زمانی نامعین را نشان می‌دهد:



شکل ۷-۲ نمایش گرافیکی چند ضلعی نامعینی [۵]

و مجموعه (A^a, B^a) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega = \left\{ (A^a, B^a) \mid (A^a, B^a) = \sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_i (A_i^a, B_i^a); i = \underline{d}, \dots, \bar{d} \right\} \quad (۲۱-۲)$$

$$\sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0 \quad (۲۲-۲)$$

بنابراین مدل گسسته فضای حالت (۱۶-۲) با معلوم بودن حد بالا و پایین نامعینی تاخیر زمانی و پیروی نمونه برداری T_{PSA} ، به فرم مجموعه نامعین (۲۱-۲) با شرط قیدی رابطه (۲۲-۲)، نمایش داده می‌شود.

۲-۷-۲- الگوریتم RMPC با در نظر گرفتن تاخیر زمانی ناشی از شبکه

الگوریتم MPC بر اساس مدل رابطه (۲-۲۰) و بر اساس مساله بهینه سازی زیر طراحی می شود. در هر لحظه K، بهره^۱ کنترلر فیدبک حالت به فرم زیر:

$$\Delta u_k = K_k x_k^a \quad (2-23)$$

از مینیمم سازی تابع هزینه درجه ۲ رابطه (۲-۲۴) با افق در نظر گرفته شده به صورت بی نهایت (افق بی نهایت برای تضمین پایداری MPC انتخاب شده است) حاصل می شود:

$$J_k = \sum_{i=0}^{\infty} ((x_{k+i}^a)^T Q x_{k+i}^a + (\Delta u^k)^T R \Delta u^k) \leq \gamma \quad (2-24)$$

با توجه به حجم محاسبات بسیار زیاد لازم برای حل این مساله بهینه سازی و عدم امکان پیاده سازی عملی آن به دلیل زمان نمونه برداری T_{PSA} نسبتاً پایین که محاسبه بهره کنترلر به صورت برخط را غیر ممکن می سازد، با تغییرات اندکی و با در نظر گرفتن حد بالا و پایین معلوم، محاسبات به صورت برونخط^۲ انجام و نتایج جهت پیاده سازی و تست در جدول جستجو^۳ ذخیره می گردد. روش برونخط تحت عنوان کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل پیشنهادی^۴ نامیده شده است و روش برخط تحت عنوان کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل معمولی^۵ نامیده شده است.

۲-۷-۳- تست و تصدیق الگوریتم RMPC در NCS تحت شبکه FF H1

سیستم مورد تست در شکل (۲-۸) نشان داده شده است:

¹ Gain

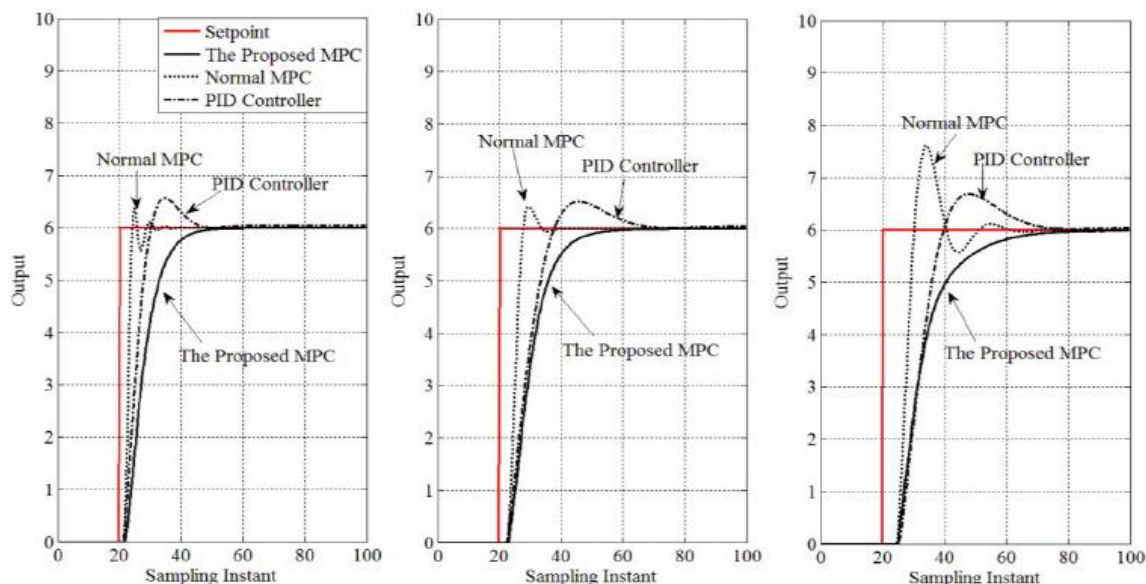
² Offline

³ Lookup Table

⁴ Proposed MPC

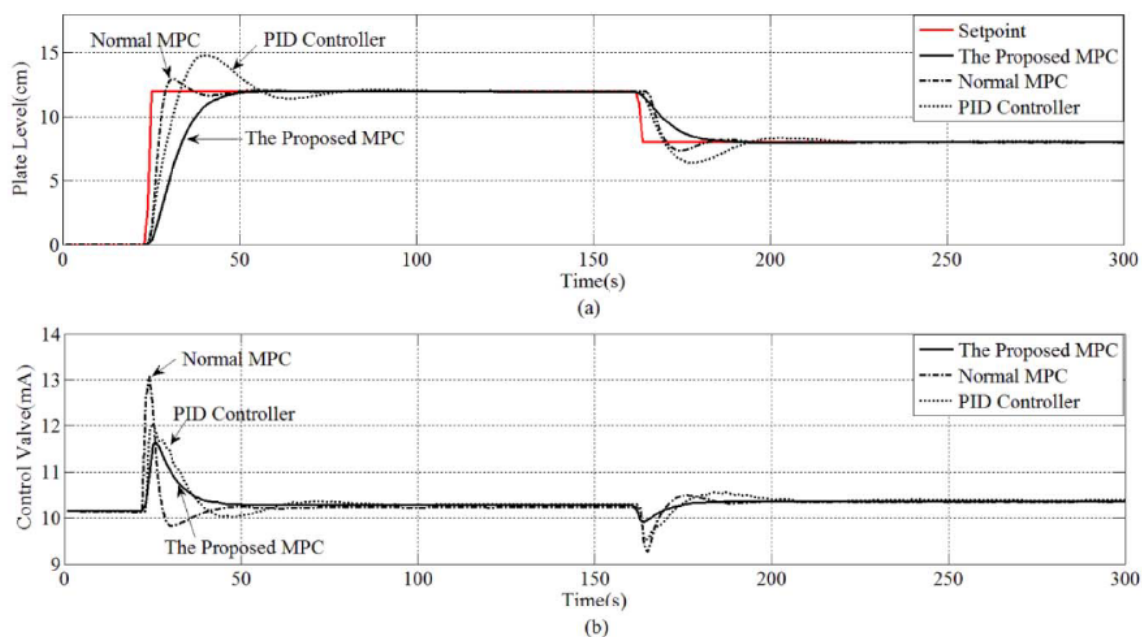
⁵ Normal MPC

نتایج شبیه سازی برای سه بازه تاخیر زمانی و سه استراتژی کنترلی MPC، RMPC و کنترلر PID به ازای ورودی پله واحد در شکل (۹-۲) نشان داده شده است.

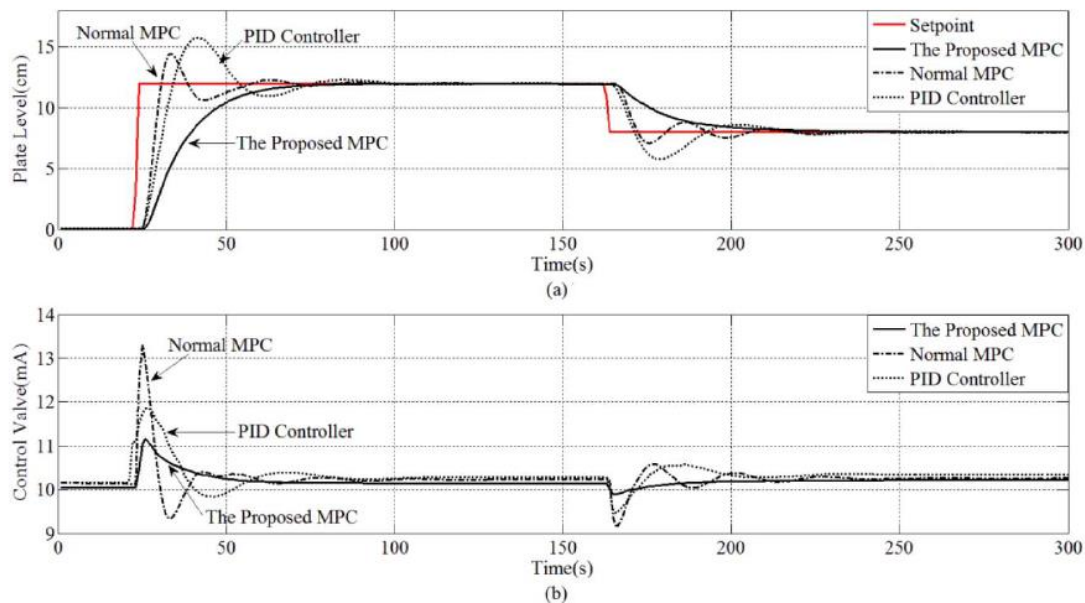


شکل ۹-۲ نتایج شبیه سازی به ازای ورودی پله واحد و سه بازه متفاوت تاخیر زمانی [۵]

همچنین نتایج حاصل از پیاده سازی عملی الگوریتم های ارائه شده بر روی سیستم تست در دو سناریو با بازه تاخیر زمانی مختلف در شبکه FF H1 در شکل های (۱۰-۲) و (۱۱-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۲ پاسخ سطح فرآیند به ورودی پله (a) و سیگنالهای کنترلی اعمالی به اکچویتر (b) در استراتژیهای کنترلی MPC، RMPC و PID Controller در سناریوی اول (بازه تاخیر زمانی کوچکتر) [۵]



شکل ۲-۱۱ پاسخ سطح فرآیند به ورودی پله (a) و سیگنالهای کنترلی اعمالی به اکچویتر (b) در استراتژیهای کنترلی MPC، RMPC و PID Controller در سناریوی دوم (بازه تاخیر زمانی بزرگتر) [۵]

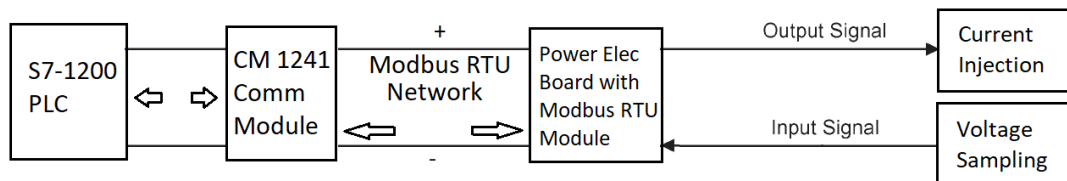
۲-۸- تحلیل تاخیرهای زمانی در شبکه Modbus

در این بخش روش تحلیلی ای به منظور ارزیابی تاخیرهای زمانی در شبکه Modbus RTU ارائه می شود. روش ارائه شده مبتنی بر استخراج دیاگرام زمانی NCS و ارزیابی تجربی استوار است. هدف از ارائه این روش تحلیلی، محاسبه محدوده تاخیرهای زمانی NCS های مبتنی بر این شبکه پرکاربرد و جبران سازی موثر با دانستن حدود آنها در کاربردهای عملی است.

Modbus RTU، یک شبکه دیجیتال سریال دوطرفه با قابلیت آدرس دهی تا ۱۲۷ نود می باشد. با توجه به سادگی، پهنای باند مناسب و هزینه کم راه اندازی این شبکه، کاربرد زیادی در پیاده سازی حلقه های کنترلی در کاربردهای صنعتی دارد و امروزه بسیاری از تجهیزات اندازه گیری و کنترل صنعتی مجهز به چپهای ارتباطی این شبکه می باشند.

به منظور ارزیابی دقیقتر تاخیرهای زمانی در سیستمهای کنترل تحت شبکه Modbus RTU از یک میز تست^۱ که بلوک دیاگرام آن در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است، استفاده می شود.

^۱ Test Bench



شکل ۲-۱۲ بلوک میز تست NCS تحت شبکه Modbus RTU

NCS آزمایشی شامل یک کنترلر مرکزی که از نوع کنترل‌کننده‌های منطقی برنامه‌پذیر شرکت زیمنس با مدل S7-1200، یک ماژول ارتباطی Modbus RTU مدل CM1241، یک اکچویتر (برد الکترونیکی تزریق‌کننده جریان به آندها در یک سیستم حفاظت کاتدی) و یک سنسور (اندازه‌گیر ولتاژ) تشکیل شده است. همانطور که از شکل (۲-۱۲) مشخص است، کنترل‌کننده مرکزی مقادیر خروجی و ورودی کنترلی را از طریق شبکه دریافت و ارسال می‌کند.

به منظور ارزیابی تاخیر زمانی NCS، دیاگرام زمانی سیستم حلقه بسته که شامل ۷ مرحله می‌باشد، در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است. این هفت مرحله عبارتند از: (۱) دریافت سیگنال^۱ توسط سنسور، (۲) تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال^۲، (۳) انتقال سیگنال از سنسور به ماژول CM1241، (۴) زمان اجرا^۳ در کنترل‌کننده مرکزی، (۵) ارسال ورودی کنترلی از ماژول CM1241 به اکچویتر، (۶) تبدیل سیگنال دیجیتال به آنالوگ^۴ و (۷) اعمال سیگنال کنترلی^۵.

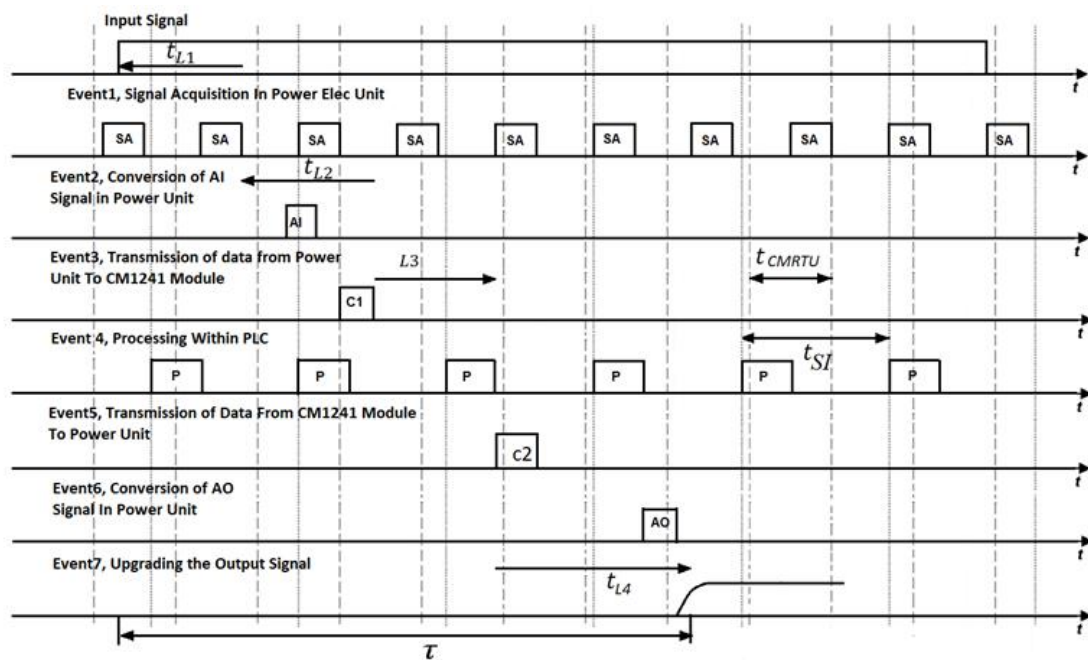
^۱ Signal Acquisition (SA)

^۲ Analog Input (AI)

^۳ Scan Interval Time (SI)

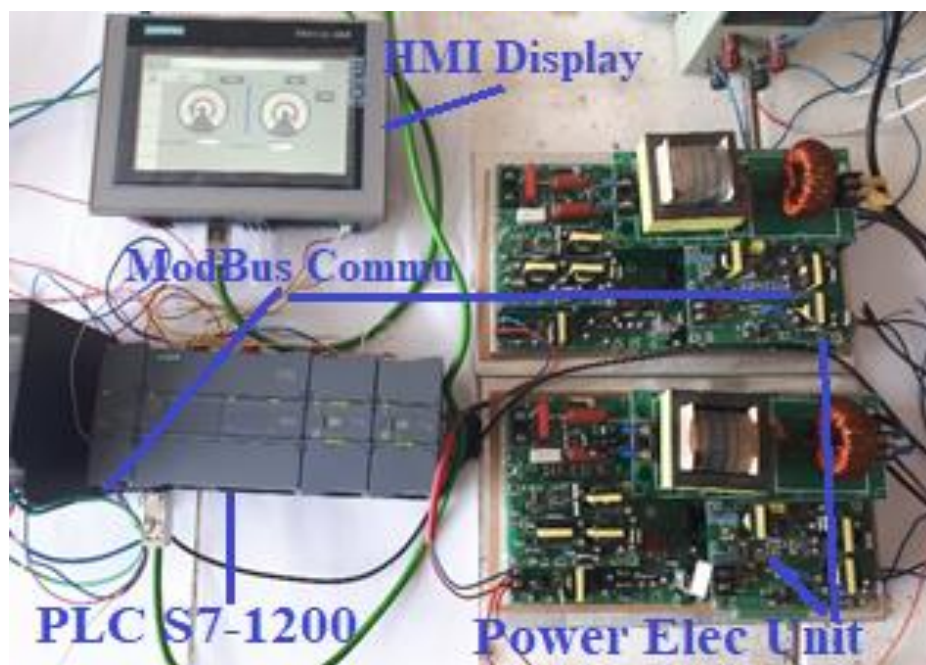
^۴ Analog Output (AO)

^۵ Upgrading Output (UP)

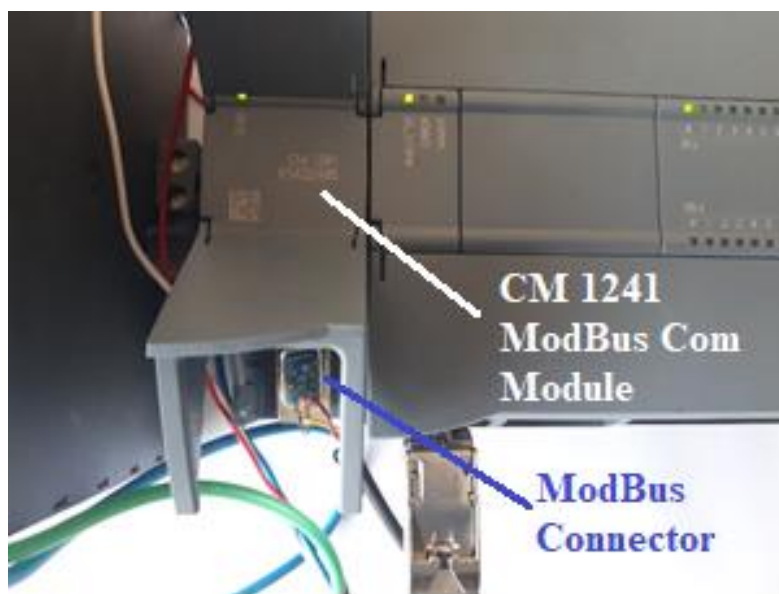


شکل ۲-۱۳ دیگرام زمانی NCS تحت شبکه Modbus

شکلهای (۲-۱۴) و (۲-۱۵)، میز تست مورد استفاده در این کار را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۴ میز تست



شکل ۲-۱۵ کنترل کننده مرکزی و ماژول ارتباطی

اجرای برنامه کنترل کننده مرکزی، در دوره‌های زمانی معینی که با عنوان دوره اسکن یا زمان اسکن شناخته می‌شود، صورت می‌گیرد. در مراحل تست آزمایشگاهی این دوره برابر با 100ms تنظیم شده است. علاوه بر این ماژول شبکه مدباس شامل دوره اسکن مجزایی است که با عنوان t_{CMRTU} نامیده می‌شود. این زمان تاثیر زیادی بر کل تاخیر زمانی سیستم حلقه بسته دارد و بدین منظور در ارزیابی آزمایشگاهی مقادیر مخالفی برای آن در نظر گرفته شده است. جدول (۲-۵)، میانگین مدت زمان هر کدام از مراحل ۷ گانه سیستم حلقه بسته را نمایش می‌دهد.

جدول ۲-۵ مدت زمان میانگین اجرای هر مرحله در سیستم حلقه بسته

مرحله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
زمان اجرا (ثانیه)	۰/۱	۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۱	۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۲

میانگین حدود بالا و پایین تاخیر زمانی حلقه بسته حاصل از نتایج آزمایش را به ازای مقادیر متفاوت t_{CMRTU} ، نشان می‌دهد.

جدول ۲-۶ حدود بالا و پایین تاخیر زمانی حاصل از تست به ازای مقادیر مختلف زمان اسکن شبکه

t_{CMRTU}	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱/۵
$[\underline{\tau}, \bar{\tau}]$	$[۱/۲, ۱/۵۵]$	$[۱/۴, ۱/۷۵]$	$[۱/۷, ۲/۲۵]$	$[۲/۰۵, ۲/۹]$	$[۲/۳۵, ۳/۵]$

۲-۹ نتیجه گیری

در این فصل، مروری بر تحقیقات گذشته در زمینه تحلیل و روشهای جبرانسازی تاخیرهای زمانی ارائه شد. نتایج تحلیلی ارائه شده در تحقیقات صورت گرفته بر روی NCS های تحت شبکه های Profibus و Fieldbus نشان داد که پارامترهای شبکه تا چه میزان در افزایش یا کاهش حدود تاخیر زمانی موثرند. در انتهای فصل نتایج حاصل از تست تجربی یک NCS تحت شبکه Modbus RTU ارائه شد. در این روش تحلیل در ابتدا دیاگرام زمانی اجزای مختلف NCS رسم و سپس بر اساس مقادیر مختلف مراحل دیاگرام زمانی، حدود تاخیر زمانی NCS از نتایج تجربی حاصل گردید. این نتایج در طراحی روشهای جبرانسازی و به دست آوردن ابعاد جبرانساز بسیار موثرند و دید مناسبی نسبت به زمان تاخیر در مقایسه با زمان پردازش جبرانساز به صورت آنلاین به طراح می دهد.

فصل سوم

کنترل پیش بین مدل مقاوم و کاربرد آن

در جبرانسازی تاخیرهای زمانی

فصل ۳- کنترل پیش بین مدل مقاوم و کاربرد آن در جبرانسازی تاخیرهای زمانی

۳-۱- مقدمه

در این بخش تاریخچه ای از تحقیقات صورت گرفته در زمینه جبرانسازی تاخیرهای زمانی و پدیده از دست دادن داده‌ها (فقدان داده) در حلقه های کنترل تحت شبکه ارائه می‌شود. تمرکز بیشتر بر تحقیقاتی است که از روشهای پیش بین مبتنی بر مدل بدین منظور بهره برده اند. نقطه ضعف کنترل کننده های پیش بین مدل در مواجهه با مدل‌های شامل عدم قطعیت و حل آن در کنترل پیش بین مدل مقاوم بررسی خواهد شد. وجود عدم قطعیت در تاخیرهای زمانی در NCS ها که یک پدیده رایج در این گونه از سیستم هاست، منجر به توسعه الگوریتم های کنترل پیش بین مدل مقاوم گردیده است. تکنیک های مختلفی در روش کنترل پیش بین مقاوم ارائه شده است که مهم ترین آنها عبارتند از چند ضلعی های عدم قطعیت و روش تیوپ. کنترل پیش بین به عنوان یک کاندید مناسب به منظور جبرانسازی تاخیرهای زمانی در سیستم های کنترل تحت شبکه مطرح گردیده است اما لزوماً تنها تکنیک نمی باشد. مطالعات بسیار عمیق و گسترده ای در رابطه با اثبات موثر بودن کنترل پیش بین در جبرانسازی تاخیرهای زمانی صورت گرفته است اما همچنان مسائل باقیمانده ای در این خصوص وجود دارد از جمله اینکه وجود همزمان نامعینی در مدل فرآیند و تاخیر زمانی یا سیستم هایی با تاخیر زمانی نامعین و ورودی اغتشاش. همچنین یکی از مسائل مهم در کنترل پیش بین به خصوص در هنگام پیاده سازی آن در سیستم های زمان حقیقی، مساله حجم محاسباتی است که در ذات روش های پیش بین وجود دارد، در این خصوص روشهایی که برای محاسبه آنلاین بهره فیدبک در تحقیقات ارائه شده اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مساله دیگری که در سیستم های کنترل تحت شبکه وجود دارد، فقدان داده^۱ در شبکه است که اثرات نامطلوبی بر پایداری یا عملکرد سیستم دارد. مسائل مرتبط با جبرانسازی فقدان داده ها در [8]، [10] و [34] مورد بررسی قرار گرفته است.

در این فصل ابتدا تحقیقات مرتبط با توسعه روش کنترل پیش بین مدل مقاوم بررسی خواهد شد سپس تحقیقاتی که در رابطه با توسعه الگوریتم های پیش بین مقاوم به منظور جبرانسازی تاخیرهای زمانی در NCS ها انجام شده، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

¹ Packet Loss

۳-۲- کنترل پیش بین مدل مقاوم

اولین و مهمترین نقص کنترل کننده های پیش بین مدل مرسوم، عدم توانایی در ورود عدم قطعیت مدل به صورت صریح است. در [41] یک روش جدید در کنترل پیش بین مدل مقاوم ارائه شده که در فرمول بندی مساله، عدم قطعیت مدل به صورت صریح وارد شده است. در این مقاله ابتدا مدل گسسته شده سیستم نامعین به صورت یک سیستم LTV به فرم رابطه (۳-۱) تعریف می شود و سپس بر اساس این مدل الگوریتم کنترلی ارائه می شود:

$$\begin{cases} x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases}; \quad (۳-۱)$$

$$[A(k), B(k)] \in \Omega \quad //(۳-۲)$$

که در آن $u \in R^m, \in R^p, x \in R^n$ به ترتیب بردارهای حالت، خروجی و ورودی می باشند. Ω یک مجموعه از پیش تعریف شده است و برای سیستم های چند ضلعی^۱، مجموعه Ω محیط محدب متشکل از رئوس چند ضلعی است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Omega = \text{CO}\{[A_1 \ B_1], [A_2 \ B_2], \dots, [A_L \ B_L]\} \quad (۳-۳)$$

که در آن CO اختصاص به محیط محدب^۲ دارد. به عبارت دیگر اگر $[A \ B] \in \Omega$ در این صورت:

$$[A \ B] = \sum_{i=1}^L \lambda_i [A_i \ B_i] \quad ; \quad \sum_{i=1}^L \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0 \text{ و } i = 1, \dots, L$$

$L = 1$ به معنی مدل نامی سیستم است.

فرمول بندی RMPC به این صورت است که: در هر گام زمانی $k(t_k)$ ، بهره کنترل کننده فیدبک حالت (۳-۴) به گونه ای تعیین می شود که حد بالای تابع هزینه (۳-۵) را مینیمم کند.

$$\Delta u_k = F_k x_k \quad (۳-۴)$$

$$J_k = \sum_{i=0}^{\infty} ((x_{k+i})^T Q_1 (x_{k+i}) + (\Delta u_k)^T R \Delta u_k) \leq \gamma \quad (۳-۵)$$

^۱ Polytopic

^۲ Convex Hull

که در آن $Q_1 \geq 0, R > 0$ ماتریسهای وزنی متقارن می باشند و γ حد بالای تابع هزینه (۵-۳) است. همچنین در رابطه (۵-۳) با در نظر گرفتن افق ∞ در مقایسه با افق محدود، پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می شود [41].

حد بالای تابع هزینه (γ) به صورتی که در ادامه تشریح می شود، به دست می آید:

تابع درجه دوم $V(x_k) = (x_k)^T P_k x_k > 0, V(0) = 0$ را در نظر می گیریم. فرض کنید $V(x_k)$ نامساوی زیر را برآورده می کند.

$$V(x_{k+i+1}) - V(x_{k+i}) \leq -((x_{k+i})^T Q_1 (x_{k+i}) + (\Delta u_k)^T R \Delta u_k) \quad (۶-۳)$$

بنابراین داریم:

$$x(\infty) = 0 \Rightarrow V(x(\infty)) = 0$$

جمع رابطه (۶-۳) از $i = 0$ تا $i = \infty$ نتیجه می دهد:

$$-V(x_k) \leq -J_k$$

$$\max_{[A_{k+i}, B_{k+i}] \in \Omega, i \geq 0} J_k \leq V(x_k)$$

با جایگذاری در مساله اصلی بهینه سازی داریم:

$$\min_{u_{k+i}, i=0,1,\dots} \left(\max_{[A_{k+i}, B_{k+i}] \in \Omega, i \geq 0} J_k \leq V(x_k) \right) \Rightarrow \min_{u_{k+i}, i=0,1,\dots} V(x_k)$$

بنابراین طبق [41] با در نظر گرفتن افق بینهایت کنترل، پایداری سیستم در حضور عدم قطعیت با کنترل فیدبک حالتی که از حل مساله مینیم سازی حاصل می شود، تضمین می گردد. با این فرض شروط کافی برای سنتز کنترل کننده پیش بین مدل مقاوم تحت عنوان تئوری ۱-۳ در ادامه آمده است.

تئوری ۱-۳: برای سیستم (۱-۳) با نامعینی تعریف شده در (۲-۳) تا (۳-۳)، در هر گام زمانی $k(t_k)$ ، بهره فیدبک حالت F_k در قانون کنترل (۴-۳) که حد بالای تابع هزینه (۵-۳) را مینیمم می کند، از رابطه $F_k = Y_k Q_k^{-1}$ به دست می آید که در آن $Q_k > 0$ و Y_k از حل مساله مینیم سازی زیر حاصل می شود.

$$\min \gamma$$

$$\text{subject to } \begin{bmatrix} 1 & (x_k)^T \\ x_k & Q_k \end{bmatrix} \geq 0 \quad (۷-۳)$$

$$\begin{bmatrix} Q_k & Q_k(A_j)^T + Y_k^T(B_j)^T & Q_k Q_1^{\frac{1}{2}} & Y_k^T R^{\frac{1}{2}} \\ A_j Q_k & Q_k & 0 & 0 \\ Q_1^{\frac{1}{2}} Q_k & 0 & \gamma I & 0 \\ R^{\frac{1}{2}} Y_k & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, j = 1, \dots, L \quad (3-8)$$

در این مقاله الگوریتم جدیدی برای کنترل پیش‌بین مدل مقاوم برای سیستم‌های با عدم قطعیت ارائه شد که برای دو کلاس بسیار عمومی و رایج از نامعینی که در مسائل مختلف بروز می‌یابند، کارایی دارد. نویسندگان در مقاله نشان داده‌اند که برتری این روش نسبت به الگوریتم‌های قبلی پیش‌بین مدل مقاوم به این دلیل است که در روشهای قبلی سنتز کنترل پیش‌بین مدل مقاوم صرفاً برای مدل‌های FIR نامعین کارایی داشت. همچنین نویسندگان نشان دادند که با در نظر گرفتن افق کنترل بینهایت، پایداری مقاوم سیستم تضمین می‌گردد. همانطور که در تئوری ۱-۳ نشان داده شده، در این الگوریتم نامعینی سیستم به صورت صریح در طراحی بهره‌فیدبک حالت F_k وارد شده است. توسعه این روش بر اساس فرض فیدبک حالت کامل صورت گرفته. همچنین نامعینی مدل با استفاده از چند ضلعی عدم قطعیت تعریف گردیده و حل مساله بهینه‌سازی در آن بر اساس حل مساله مینیم سازی با استفاده از حل نامساوی‌های ماتریسی خطی^۱ (LMI) است. علاوه بر این، الگوریتم به گونه‌ای ارائه شده که قابلیت در نظر گرفتن قیود ورودی و خروجی را نیز دارد. نویسندگان در پایان خاطر نشان نموده‌اند که روش ارائه شده قابلیت توسعه به منظور پوشش مسائلی همچون جبران‌سازی تاخیر زمانی و ردیابی مسیر مرجع را دارد.

۳-۳- استفاده از چندضلعی عدم قطعیت در توصیف فرآیندهایی با تاخیر زمانی ثابت-

کراندار در الگوریتم RMPC

در [42] کاربرد RMPC در فرآیندهایی که شامل تاخیر زمانی هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله مدل فرآیند به صورت تابع تبدیلی در نظر گرفته می‌شود که مدل گسسته آن به منظور اعمال کنترل کننده‌های دیجیتالی، با زمان نمونه‌برداری مشخص، بدست می‌آید. در ابتدا یک چندضلعی عدم قطعیت به منظور توصیف سیستم شامل تاخیر زمانی ثابت کراندار نامعین توسعه می‌یابد. بر اساس توصیف صورت گرفته، یک الگوریتم RMPC مبتنی بر LMI به کار گرفته شده و تغییر شکل می‌یابد تا کنترل کننده مقاومی برای چنین فرآیندهای مقیدی طراحی شود.

¹ Linear Matrix Inequality

۳-۳-۱- استفاده از چند ضلعی عدم قطعیت در توصیف عدم قطعیت تاخیر زمانی

با فرض اینکه تابع تبدیل فرآیند شامل تاخیر زمانی به فرم کلی زیر باشد:

$$G(s) = G_0(s)e^{-\tau s} \quad (9-3)$$

مدل حلقه باز آن به فرم فضای حالت و با در نظر گرفتن تاخیر زمانی $\tau \in [\underline{\tau}, \bar{\tau}]$ ناشی از شبکه به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (10-3)$$

که در آن $x \in R^n$ و $u \in R^m$ ، $y \in R^p$ به ترتیب بردارهای خروجی، ورودی و حالت می‌باشند.

پارامتر $\tau \in [\underline{\tau}, \bar{\tau}]$ نشان دهنده تاخیر زمانی نامعین ثابت اما کراندار است. با انتخاب مناسب دوره نمونه برداری برابر با T_{PSA} مدل گسسته فضای حالت (۱۰-۳) به فرم ذیل حاصل می‌شود:

$$\begin{cases} x_{k+1} = (I + \tilde{A})x_k - \tilde{A}x_{k-1} + \tilde{B}_{\underline{d}}\Delta u_{k-\underline{d}} + \dots + \tilde{B}_{\bar{d}}\Delta u_{k-\bar{d}} \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (11-3)$$

در محاسبه پارامترهای مدل گسسته، مقدار τ ، کل زمان تاخیر سیستم حلقه بسته در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای رابطه (۱۱-۳) به فرم جدول (۱-۳) تعریف می‌شوند:

جدول ۳-۱ تعریف پارامترهای رابطه (۱۱-۳)

متغیر	تعریف
$\tilde{A}$	$\tilde{A} = e^{A \times t_{PSA}}$
$\tilde{B}_i$	$\tilde{B}_i = \int_0^{t_{PSA}} e^{A \times s} B_i ds ; i = \underline{d}, \dots, \bar{d}$
t_{PSA}	مدت زمان بین دو نمونه متوالی $t_{PSA} = t_k - t_{k-1}$
k	شاخص زمانی
Δu_j	$\Delta u_j = u_j - u_{j-1} ; j = k - \bar{d}, \dots, k - \underline{d}$
$\underline{d}$	$\underline{d} = fl(\underline{\tau}/t_{PSA}),$
$\bar{d}$	$\bar{d} = cl(\bar{\tau}/t_{PSA}),$
$fl(\cdot)$	تابعی که نزدیکترین عدد صحیح کوچکتر از $(\cdot)$ را برمی‌گرداند
$cl(\cdot)$	تابعی که نزدیکترین عدد صحیح بزرگتر از $(\cdot)$ را برمی‌گرداند
$I_{n \times n}$	ماتریس همانی $n \times n$
$0_{n \times m}$	ماتریس صفر $n \times m$

همانطور که در [۴۲] نشان داده شده است، چندضلعی عدم قطعیت یک روش موثر در توصیف مدل‌های نامعین است. در این روش، عدم قطعیت مدل به صورت یک چندضلعی تعریف می‌شود که اضلاع آن معین است. نشان داده می‌شود که مدل سیستم واقعی متعلق به محیط محدب^۱ این چندضلعی است. در واقع مدل سیستم واقعی به صورت ترکیبی خطی از رئوس چندضلعی قابل تعریف است.

با استفاده از چند ضلعی عدم قطعیت برای توصیف مدل سیستم با تاخیر زمانی نامعین، می‌توان از مجموعه $M_i; (i = \underline{d}, \dots, \bar{d})$ جهت نمایش مدل گسسته سیستم استفاده نمود:

$$M_i : x_{k+1} = (I + \tilde{A})x_k - \tilde{A}x_{k-1} + \tilde{B}\Delta u_{k-i} \quad (۱۲-۳)$$

$$\tilde{B} = \int_0^{T_{PSA}} e^{As} B ds \quad \text{که در آن}$$

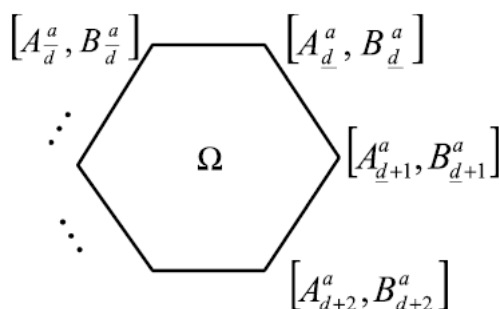
اکنون یک بردار حالت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x_k^a = [x_k, x_{k-1}, \Delta u_{k-\bar{d}}, \dots, \Delta u_{k-\underline{d}}, \dots, \Delta u_{k-1}] \quad (۱۳-۳)$$

با تعریف بردار حالت جدید به فرم (۱۳-۳)، روابط (۱۱-۳) و (۱۲-۳) به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$x_{k+1}^a = A^a x_k^a + B^a \Delta u_k \quad (۱۴-۳)$$

که در آن ماتریسهای (A^a, B^a) توابعی از تاخیر زمانی نامعین هستند. شکل (۱-۳) نمایش گرافیکی ای از چندضلعی توصیف کننده سیستم با تاخیر زمانی نامعین را نشان می‌دهد:



شکل ۱-۳ - نمایش گرافیکی چند ضلعی نامعینی

و مجموعه (A^a, B^a) به صورت زیر تعریف می‌شود:

¹ Convex Hull

$$\Omega = \{(A^a, B^a) | (A^a, B^a) = \sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_i (A_i^a, B_i^a)\} \quad (۱۵-۳)$$

$$\sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_i = 1, \quad \lambda_i \geq 0; \forall i \in [\underline{d}, \dots, \bar{d} - 1] \quad (۱۶-۳)$$

که در آن:

$$A_i^a = \begin{bmatrix} I + \tilde{A}, -\tilde{A}, 0_{n \times (\bar{d}-i)}, \tilde{B}, 0_{n \times (i-1)} \\ I_{n \times n}, 0_{n \times (\bar{d}+n)} \\ 0_{(\bar{d}-1) \times (2n+1)}, I_{(\bar{d}-1) \times (\bar{d}-1)} \\ 0_{1 \times (2n+\bar{d})} \end{bmatrix} \quad (۱۷-۳)$$

$$B_i^a = \begin{bmatrix} 0_{(2n+\bar{d}-1) \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}, i = \underline{d}, \dots, \bar{d} \quad (۱۸-۳)$$

مختصات رئوس چند ضلعی محدب هستند.

بنابراین مدل گسسته در زمان رابطه (۱۰-۳) می تواند با مجموعه نامعین (۱۵-۳) تحت قیود (۱۶-۳) توصیف شود.

۳-۳-۲- الگوریتم RMPC با در نظر گرفتن تاخیر زمانی نامعین

در این بخش سنتز الگوریتم RMPC بر اساس رابطه (۱۴-۳) ارائه می شود. فرمول بندی RMPC در این حالت به شرح ذیل می باشد:

در هر گام زمانی $k(t_k)$ ، بهره کنترل کننده فیدبک حالت (۱۹-۳) به گونه ای تعیین می شود که حد بالای تابع هزینه (۲۰-۳) را مینیمم کند.

$$\Delta u_k = F_k x_k^a \quad (۱۹-۳)$$

$$J_k = \sum_{i=0}^{\infty} ((x_{k+i}^a)^T Q_1 (x_{k+i}^a) + (\Delta u_k)^T R \Delta u_k) \leq \gamma \quad (۲۰-۳)$$

که در آن $Q_1 \geq 0, R > 0$. ماتریسهای وزنی متقارن می باشند و γ حد بالای تابع هزینه (۲۰-۳) است. همچنین در رابطه (۲۰-۳) با در نظر گرفتن افق ∞ در مقایسه با افق محدود، پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می شود [41].

حد بالای تابع هزینه (γ) به صورتی که در ادامه تشریح می شود، به دست می آید:

تابع درجه دوم $V(x_k^a) = (x_k^a)^T P_k x_k^a > 0, V(0) = 0$ را در نظر می‌گیریم. فرض کنید $V(x_k^a)$ نامساوی زیر را برآورده می‌کند.

$$V(x_{k+i+1}^a) - V(x_{k+i}^a) \leq -((x_{k+i}^a)^T Q_1 x_{k+i}^a) + (\Delta u_k)^T R \Delta u_k \quad (21-3)$$

بنابراین داریم:

$$x^a(\infty) = 0 \Rightarrow V(x^a(\infty)) = 0$$

جمع رابطه (21-3) از $i = 0$ تا $i = \infty$ نتیجه می‌دهد:

$$-V(x_k^a) \leq -J_k$$

$$\max_{[A_{k+i}^a, B_{k+i}^a] \in \Omega, i \geq 0} J_k \leq V(x_k^a)$$

از جانشین‌سازی در مساله اصلی بهینه‌سازی داریم:

$$\min_{\Delta u_{k+i}, i=0,1,\dots} \left(\max_{[A_{k+i}^a, B_{k+i}^a] \in \Omega, i \geq 0} J_k \leq V(x_k^a) \right) \Rightarrow \min_{\Delta u_{k+i}, i=0,1,\dots} V(x_k^a)$$

طبق [41] با در نظر گرفتن افق بینهایت کنترل، پایداری سیستم در حضور عدم قطعیت تاخیر زمانی با کنترل فیدبک حالتی که از حل مساله مینیم‌سازی فوق حاصل می‌شود، تضمین می‌گردد.

با این فرض شروط کافی برای سنتز کنترل کننده پیش بین مدل مقاوم تحت عنوان تئوری ۲-۳ در ادامه آمده است.

قضیه ۲-۳: برای سیستم (۱۴-۳) با تاخیر زمانی نامعین به فرم (۱۵-۳) تا (۱۶-۳)، در هر گام زمانی $k(t_k)$ ، بهره فیدبک حالت F_k در قانون کنترل (۱۹-۳) که حد بالای تابع هزینه (۲۰-۳) را مینیمم می‌کند، از رابطه $F_k = Y_k Q_k^{-1}$ به دست می‌آید که در آن $Q_k > 0$ و Y_k از حل مساله مینیم‌سازی زیر حاصل می‌شود.

$\min \gamma$

$$\text{subject to } \begin{bmatrix} 1 & (x_k)^T \\ x_k & Q_k \end{bmatrix} \geq 0 \quad (22-3)$$

$$\begin{bmatrix} Q_k & Q_k(A_j^a)^T + Y_k^T(B_j^a)^T & Q_k Q_1^{\frac{1}{2}} & Y_k^T R^{\frac{1}{2}} \\ A_j^a Q_k & Q_k & 0 & 0 \\ Q_1^{\frac{1}{2}} Q_k & 0 & \gamma I & 0 \\ R^{\frac{1}{2}} Y_k & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, j = \underline{d}, \dots, \bar{d} \quad (23-3)$$

در این مقاله نویسندگان الگوریتم جدیدی برای کنترل پیش‌بین مدل مقاوم برای سیستم‌های با عدم قطعیت در تاخیر زمانی ارائه کرده‌اند. نویسندگان نشان داده‌اند که روش ارائه شده در این تحقیق، در واقع تعمیمی از روش سیستم‌های با عدم قطعیت در مدل به سیستم‌های تاخیردار است. اساس روش ارائه شده در این تحقیق بر پایه همین توصیف بنا شده است به گونه‌ای که در ابتدا مدل پیوسته در زمان شامل تاخیر زمانی نامعین، گسسته سازی شده که در مدل گسسته شده عدم قطعیت تاخیر زمانی به کمک چندضلعی عدم قطعیت توصیف شده است. با کمک تئوری چندضلعی‌ها و الگوریتم RMPC ارائه شده در [۴۱] الگوریتم جبران‌ساز برای NCS هایی که شامل تاخیر زمانی نامعین ثابت-کراندار هستند، توسعه یافته. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی الگوریتم ارائه شده در مقایسه با کنترل‌کننده پیش‌بین مدل مرسوم و کنترل‌کننده‌های PID است. نقطه قوت روش توسعه یافته در مقایسه با دو روش فوق‌الذکر، لحاظ کردن عدم قطعیت تاخیر زمانی به صورت صریح در طراحی جبران‌ساز است. در تحقیق نشان داده شده است که در صورتی که در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، افق کنترل بینهایت در نظر گرفته شود، پایداری سیستم حلقه بسته تحت الگوریتم ارائه شده تضمین می‌شود.

۳-۴- تحلیل و جبران‌سازی تاخیرهای زمانی در حلقه‌های کنترلی شبکه فیلدباس با استفاده

از الگوریتم RMPC

در [۵] تحلیل و جبران‌سازی تاخیرهای زمانی در حلقه‌های کنترلی مبتنی بر شبکه FF H1^۱ ارائه شده است. در واقع این تحقیق از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول روشی تحلیلی مبتنی بر آزمایشات تجربی به منظور تحلیل و محاسبه کران‌های تاخیر زمانی ناشی از شبکه در NCS های تحت شبکه فیلدباس ارائه شده است و در بخش دوم الگوریتم RMPC ارائه شده در مقالات [۴۱] و [۴۲] به منظور کاهش حجم محاسبات، اصلاح شده است. همچنین روشی مبتنی بر انجام محاسبات آفلاین و استفاده از جدول بهره جهت پیاده‌سازی برخط الگوریتم RMPC در سیستم‌های زمان واقعی^۲ ارائه شده است. در واقع بخش تحلیلی تاخیرهای زمانی ارتباط مستقیمی با الگوریتم اصلاح یافته ندارد و با توجه به اینکه هدف مقاله اعمال الگوریتم ارائه شده و آزمایش آن در یک NCS واقعی است، مطرح گردیده است. بخش تحلیلی این تحقیق در بخش ۲ این رساله به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است و در این قسمت صرفاً به بحث و بررسی الگوریتم اصلاح یافته پرداخته خواهد شد.

^۱ Foundation Fieldbus H1

^۲ Real Time

۳-۴-۱- استفاده از الگوریتم RMPC اصلاح شده در جبرانسازی تاخیرهای زمانی

ثابت-کراندار در حلقه های کنترل صنعتی

الگوریتم اصلاح شده در این بخش مبتنی بر مدل توصیفی NCS های شامل تاخیر زمانی ثابت-کراندار است. در این مدل فرض بر این است که تاخیر زمانی کل حلقه در ورودی کنترل دیده می شود. چنین فرضی در کاربردهای صنعتی و عملی مبتنی بر واقعیت است. در کنترل کننده های منطقی برنامه پذیر، عملیات خواندن مقادیر اندازه گیری، انجام محاسبات و نوشتن خروجی های کنترلی در یک مرحله صورت می پذیرد به همین منظور تاخیر زمانی هر کدام از این فرآیندها، نهایتاً در اعمال ورودی کنترل ظاهر می شود. استراتژی کنترلی در این تحقیق، فیدبک حالت است. بدین منظور تاخیر در اندازه گیری حالتها، پردازش کنترل و تاخیر در اعمال ورودی کنترلی را می توان در ورودی کنترلی جمع نمود. مدل توصیفی در بخش ۳-۳-۱ تشریح شد. در این بخش با استفاده از این مدل، الگوریتم اصلاح شده مورد بررسی قرار می گیرد.

فرمول بندی RMPC اصلاح شده به صورتی که در ادامه بیان شده، می باشد:

در هر گام زمانی $k(t_k)$ ، بهره کنترل کننده فیدبک حالت (۳-۲۴) به گونه ای تعیین می شود که حد بالای تابع هزینه (۳-۲۵) را مینیمم کند.

$$\Delta u_k = F_k x_k^a \quad (۳-۲۴)$$

$$J_k = \sum_{i=0}^{\infty} ((x_{k+i}^a)^T Q_1 (x_{k+i}^a) + (\Delta u_k)^T R \Delta u_k) \leq \gamma \quad (۳-۲۵)$$

که در آن $Q_1 \geq 0$ ، $R > 0$ ماتریسهای وزنی متقارن می باشند و γ حد بالای تابع هزینه (۳-۲۵) است. همچنین در رابطه (۳-۲۵) با در نظر گرفتن افق ∞ در مقایسه با افق محدود، پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می شود [41].

حد بالای تابع هزینه (γ) به صورتی که در ادامه تشریح می شود، به دست می آید:

تابع درجه دوم $V(x_k^a) = (x_k^a)^T P_k x_k^a > 0$ ، $V(0) = 0$ را در نظر می گیریم. فرض کنید $V(x_k^a)$ نامساوی زیر را برآورده می کند.

$$V(x_{k+i+1}^a) - V(x_{k+i}^a) \leq -((x_{k+i}^a)^T Q_1 (x_{k+i}^a) + (\Delta u_k)^T R \Delta u_k) \quad (۳-۲۶)$$

بنابراین داریم:

$$x^a(\infty) = 0 \Rightarrow V(x^a(\infty)) = 0$$

جمع رابطه (۲۶-۳) از $i = 0$ تا $i = \infty$ نتیجه می‌دهد:

$$-V(x_k^a) \leq -J_k$$

$$\max_{[A_{k+i}^a \ B_{k+i}^a] \in \Omega, i \geq 0} J_k \leq V(x_k^a)$$

از جانشین‌سازی در مساله اصلی بهینه سازی داریم:

$$\min_{\Delta u_{k+i}, i=0,1,\dots} (\max_{[A_{k+i}^a \ B_{k+i}^a] \in \Omega, i \geq 0} J_k \leq V(x_k^a)) \Rightarrow \min_{\Delta u_{k+i}, i=0,1,\dots} V(x_k^a)$$

بنابراین طبق [41] با در نظر گرفتن افق بینهایت کنترل، پایداری سیستم در حضور عدم قطعیت تاخیر زمانی با کنترل فیدبک حالتی که از حل مساله مینیمم‌سازی حاصل می‌شود، تضمین می‌گردد.

با این فرض شروط کافی برای سنتز کنترل کننده پیش بین مدل مقاوم در تئوری ۳-۳ آمده است.

تئوری ۳-۳: برای سیستم (۱۴-۳) با تاخیر زمانی نامعین به فرم (۱۵-۳) تا (۱۶-۳)، در هر گام زمانی $k(t_k)$ ، بهره فیدبک حالت F_k در قانون کنترل (۲۷-۳) که حد بالای تابع هزینه (۲۸-۳) را مینیمم می‌کند، از رابطه $F_k = Y_k G_k^{-1}$ به دست می‌آید که در آن Q_k و Y_k از حل مساله مینیمم‌سازی زیر حاصل می‌شود.

$\min \gamma$

$$\text{subject to } \begin{bmatrix} 1 & (x_k)^T \\ x_k & Q_k \end{bmatrix} > 0 \quad ; Q_k > 0 \quad (27-3)$$

$$\begin{bmatrix} Q_k - (G_k + G_k^T) & G_k(A_j^a)^T + Y_k^T(B_j^a)^T & Q_k Q_1^{\frac{1}{2}} & Y_k^T R^{\frac{1}{2}} \\ A_j^a G_k + B_j^a Y_k & -Q_k & 0 & 0 \\ Q_1^{\frac{1}{2}} G_k & 0 & -\gamma I & 0 \\ R^{\frac{1}{2}} Y_k & 0 & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \underline{d}, \dots, \bar{d} \quad (28-3)$$

این الگوریتم، پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته را تضمین می‌کند. توجه به این نکته ضروری است که، در مقایسه با سایر الگوریتم‌هایی که در [۴۱] و [۴۲] ارائه شده‌اند، مزیت رابطه (۲۸-۳) در ورود متغیر جدید G_k است که لزومی برای مثبت معین بودن آن نیست. این درجه آزادی جدید باعث می‌شود که در مواردی که ابعاد سیستم بزرگ است، زمان محاسبات کاهش یابد. همچنین نویسندگان به منظور پیاده سازی الگوریتم ارائه شده در یک سیستم واقعی و با توجه به حجم محاسبات الگوریتم RMPC، روشی آفلاین به منظور محاسبه بهره فیدبک حالت ارائه کرده‌اند. به منظور نشان دادن کارایی و امکان پیاده‌سازی واقعی این

الگوریتم در کنترل فرآیندهای صنعتی، یک فرآیند سطح صنعتی را با الگوریتم ارائه شده مورد آزمایش قرار داده‌اند که نتایج تجربی نشان‌دهنده عملکرد موثر در جبران‌سازی تاخیرهای زمانی است. نوآوری تحقیق ارائه شده در دو بخش خلاصه می‌شود. (۱) بهینه‌سازی الگوریتم RMPC به منظور کاهش حجم محاسبات محافظه کاری در حل نامساویهای ماتریسی خطی. (۲) اصلاح الگوریتم ارائه شده جهت پیاده‌سازی جبران‌ساز در سیستم‌های عملی و زمان واقعی.

۳-۵- نتیجه‌گیری

در این فصل سیر تکامل الگوریتم‌های RMPC به منظور جبران‌سازی عدم قطعیت مدل و توسعه الگوریتم‌های مشابه جهت جبران‌سازی مدل‌هایی از سیستم‌ها که شامل تاخیر زمانی نامعین کراندار هستند، ارائه شد. نشان داده شد که محققان چگونه با توسعه روش ارائه شده در [۴۱] و استفاده از مدل توصیفی سیستم‌های با تاخیر زمانی نامعین کراندار که از چندضلعی‌های عدم قطعیت برای نمایش عدم قطعیت در تاخیر زمانی استفاده می‌کنند و همچنین بهره‌گیری از نامساویهای ماتریسی خطی، الگوریتم توسعه یافته‌ای ارائه کرده‌اند که در آن عدم قطعیت به صورت صریح در طراحی کنترل‌کننده وارد و پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می‌گردد. همچنین روشهایی برای اعمال الگوریتم‌های پر محاسبه RMPC در سیستم‌های زمان واقعی با استفاده از انجام محاسبات آفلاین و جدول بهره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی ارائه شده در تحقیقات مورد بررسی نشان‌دهنده موثر بودن الگوریتم‌های ارائه شده در مقایسه با کنترل‌کننده‌های مرسوم پیش‌بین مدل و کنترل‌کننده‌های PID است. در تحقیقات صورت گرفته مسائلی همچون بروز همزمان نامعینی در مدل و تاخیر زمانی و همچنین اغتشاش ورودی در حضور تاخیر زمانی نامعین مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. مساله‌ای که در فصل ۴ به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل چهارم

توسعه الگوریتم پیش‌بین مدل مقاوم در
جبرانسازی تاخیرهای زمانی

فصل ۴- توسعه الگوریتم پیش‌بین مدل مقاوم در جبران‌سازی تاخیرهای زمانی

۴-۱- مقدمه

به طور کلی، NCS ها با مسائل مختلفی از جمله از دست دادن داده‌ها و تاخیر زمانی ناشی از شبکه مواجه می‌شوند. هنگامی که عدم قطعیت مدل سیستم نیز به مسائل فوق اضافه می‌شود، طراحی یک کنترل-کننده مقاوم که پایداری سیستم را تضمین نماید، پیچیده‌تر می‌شود. در این فصل به طرح و توسعه الگوریتم RMPC به منظور جبران‌سازی تاخیرهای زمانی در حضور عدم قطعیت مدل واغتشاش ورودی پرداخته می‌شود. در فصل ۳، سیر تحقیقات مرتبط با الگوریتم RMPC و استفاده از آن در جبران‌سازی تاخیرهای زمانی ثابت-کراندار سیستم‌های کنترل تحت شبکه مورد بحث و بررسی قرار گرفت. الگوریتم‌های RMPC ارائه شده توانستند عدم قطعیت تاخیر زمانی را به صورت صریح در طراحی جبران‌ساز وارد کنند. نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی تجربی الگوریتم‌های ارائه شده، نشان دهنده موثر بودن روش ارائه شده بود. اما هنوز مسائل دیگری در خصوص سیستم‌هایی که دچار تاخیر زمانی هستند، وجود دارد از جمله وجود همزمان عدم قطعیت در مدل سیستم و تاخیر زمانی است. در این خصوص الگوریتم پیش‌بین مدل مقاوم نیازمند توسعه به منظور جبران‌سازی و تضمین پایداری سیستم حلقه بسته در حضور همزمان نامعینی در تاخیر زمانی و مدل سیستم می‌باشد. همچنین بسیاری از سیستم‌های کنترل با مساله اغتشاش (ورودی ناخواسته) روبرو هستند که مدل اغتشاش می‌تواند ثابت یا متغیر بازمان و از نوع معین یا نامعین باشد.

بخش اول این فصل به توسعه الگوریتم پیش‌بین مدل مقاوم ارائه شده در فصل ۳ اختصاص دارد که به منظور جبران‌سازی همزمان تاخیرهای زمانی و عدم قطعیت مدل تغییر و توسعه یافته است.

در بخش دوم الگوریتم جدید کنترل پیش‌بین مدل مقاوم به منظور جبران‌سازی همزمان تاخیر زمانی و تضعیف اغتشاش ورودی ارائه می‌شود.

۴-۲- توسعه الگوریتم پیش‌بین مدل مقاوم به منظور جبران‌سازی همزمان عدم قطعیت مدل

و تاخیر زمانی

در این بخش، الگوریتم RMPC ارائه شده در بخش ۳-۴ به منظور جبران‌سازی NCS هایی که همزمان شامل تاخیر زمانی نامعین از نوع ثابت-کراندار و عدم قطعیت مدل می‌باشند، توسعه می‌یابد. روش ارائه شده بر پایه تعمیم مدل گسسته به سیستم‌های شامل تاخیر زمانی و عدم قطعیت مدل، استوار است. بنابراین

$$\Omega = \left\{ (A_k^\alpha, B_k^\alpha) \mid (A_k^\alpha, B_k^\alpha) = \sum_{j=1}^L \sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_{ij} (A_{ij}^a, B_{ij}^a) \right\} \quad (۴-۴)$$

$$\sum_{j=1}^L \sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_{ij} = 1; \lambda_{ij} \geq 0; \forall i \in [\underline{d}, \dots, \bar{d} - 1] \text{ and } \forall j \in [1, \dots, L] \quad (۵-۴)$$

که در آن:

$$A_{ij}^a = \begin{bmatrix} I + \tilde{A}_j, -\tilde{A}_j, 0_{n \times (\bar{d}-i)}, \tilde{B}_j, 0_{n \times (i-1)} \\ I_{n \times n}, 0_{n \times (\bar{d}+n)} \\ 0_{(\bar{d}-1) \times (2n+1)}, I_{(\bar{d}-1) \times (\bar{d}-1)} \\ 0_{1 \times (2n+\bar{d})} \end{bmatrix} \quad (۶-۴)$$

$$B_{ij}^a = \begin{bmatrix} 0_{(2n+\bar{d}-1) \times 1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۷-۴)$$

$$i = \underline{d}, \dots, \bar{d}, j = 1, \dots, L$$

و متغیرهای رابطه (۶-۴) و (۷-۴) به فرم جدول (۱-۴) تعریف می‌شوند:

جدول ۴-۱ تعریف پارامترهای رابطه (۶-۴) و (۷-۴)

متغیر	تعریف
$\tilde{A}_j$	$\tilde{A}_j = e^{A_j \times t_{PSA}}$
$\tilde{B}_j$	$\tilde{B}_j = \int_0^{t_{PSA}} e^{A_j \times s} B_j ds$
t_{PSA}	$t_{PSA} = t_k - t_{k-1}$ مدت زمان بین دو نمونه متوالی
k	شاخص زمانی
$\underline{d}$	$\underline{d} = fl(\underline{\tau}/t_{PSA})$
$\bar{d}$	$\bar{d} = cl(\bar{\tau}/t_{PSA})$
$fl(\cdot)$	تابعی که نزدیکترین عدد صحیح کوچکتر از (.) را برمی‌گرداند
$cl(\cdot)$	تابعی که نزدیکترین عدد صحیح بزرگتر از (.) را برمی‌گرداند
$I_{n \times n}$	ماتریس همانی $n \times n$
$0_{n \times m}$	ماتریس صفر $n \times m$
L	بعد نامعینی

همانطور که در [۴۲] نشان داده شده است، چندضلعی عدم قطعیت یک روش موثر در توصیف مدل‌های

نامعین است. در این روش، عدم قطعیت مدل به صورت یک چندضلعی تعریف می‌شود که رئوس آن معین

است. نشان داده می‌شود که مدل سیستم واقعی متعلق به محیط محدب^۱ این چندضلعی است. بنابراین مدل سیستم واقعی به صورت ترکیبی خطی از رئوس چندضلعی محدب قابل تعریف است. ماتریسهای A_{ij}^a و B_{ij}^a مختصات رئوس محیط محدب هستند که یک سیستم دقیقاً معلوم را در چند ضلعی Ω که توسط $(\bar{d} - \underline{d} + 1) \times L$ راس توصیف می‌شود، مشخص می‌کند. بنابراین سیستم پیوسته در زمان (۴-۱) با کران های مشخص نامعینی در مدل و تاخیر زمانی، می‌تواند توسط روابط (۴-۴) و (۴-۵) تعریف شود.

۴-۲-۲- طراحی جبرانساز RMPC برای سیستمهای شامل تاخیر زمانی نامعین و

عدم قطعیت در مدل

همانطور که در فصل ۳ اشاره شده در روش MPC مرسوم، عدم قطعیت به صورت صریح وارد نمی‌شود و بدین منظور الگوریتم توسعه‌یافته‌ای در [۴۱] و [۴۲] ارائه شدند که در آنها عدم قطعیت تاخیر زمانی به صورت صریح در طراحی جبرانساز وارد گردیدند. در این بخش الگوریتم RMPC به کمک مدل توصیف شده در بخش ۴-۲-۱ به گونه‌ای تعمیم می‌یابد که عدم قطعیت مدل و تاخیر زمانی به صورت صریح در طراحی جبرانساز وارد شوند. الگوریتم ارائه شده، پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می‌نماید.

به منظور تمایز الگوریتم های قبلی و الگوریتم توسعه یافته در این تحقیق، الگوریتم RMPC ارائه شده در فصل ۳ با عنوان RMPC ساده^۲ یا به اختصار NRMPC و الگوریتم ارائه شده در این بخش تحت عنوان RMPC بهبود یافته^۳ یا به اختصار IRMPC شناخته می‌شود و در این فصل و در فصول بعدی از این عبارات در توصیف الگوریتم‌ها و نمایش نتیجه شبیه‌سازیها استفاده می‌شود.

فرمول بندی الگوریتم IRMPC به صورت ذیل است:

در هر گام زمانی $t(t_k)$ ، کنترل کننده فیدبک حالت (۴-۸) حد بالای تابع هزینه (۴-۹) را مینیمم می‌کند.

$$\Delta u_k = F_k x_k^a \quad (۴-۸)$$

$$J_k = \sum_{i=0}^{\infty} ((x_{k+i}^a)^T Q_1 (x_{k+i}^a) + (\Delta u_k)^T R \Delta u_k) \leq \gamma \quad (۴-۹)$$

^۱ Convex Hull

^۲ Normal RMPC (NRMPC)

^۳ Improved RMPC (IRMPC)

که در آن $R > 0$ ، $Q_1 \geq 0$ ماتریسهای وزنی، γ حد بالای تابع هزینه، $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ و F_k بهره فیدبک حالت می باشد. مراحل طراحی جبرانساز در ادامه تشریح می شود:

گام ۱: بدست آوردن حد بالای تابع هزینه J_k :

تابع درجه دوم $V(x_k^a) = (x_k^a)^T P_k x_k^a > 0$ ، $V(0) = 0$ را در نظر می گیریم. فرض کنید $V(x_k^a)$ نامساوی زیر را برآورده می کند.

$$V(x_{k+i+1}^a) - V(x_{k+i}^a) \leq -((x_{k+i}^a)^T Q_1 (x_{k+i}^a) + (\Delta u_k)^T R \Delta u_k) \quad (10-4)$$

بنابراین داریم:

$$x^a(\infty) = 0 \Rightarrow V(x^a(\infty)) = 0$$

جمع رابطه (۱۰-۴) از $i = 0$ تا $i = \infty$ نتیجه میدهد:

$$-V(x_k^a) \leq -J_k \quad (11-4)$$

$$\max_{[A_{k+i}^a, B_{k+i}^a] \in \Omega, i \geq 0} J_k \leq V(x_k^a)$$

از جانشین سازی در مساله اصلی بهینه سازی داریم:

$$\min_{\Delta u_{k+i}, i=0,1,\dots} \left(\max_{[A_{k+i}^a, B_{k+i}^a] \in \Omega, i \geq 0} J_k \leq V(x_k^a) \right) \Rightarrow \min_{\Delta u_{k+i}, i=0,1,\dots} V(x_k^a)$$

$$\xleftrightarrow{\text{with } V(x_k^a) = (x_k^a)^T P_k x_k^a \leq \gamma} \min \gamma$$

بنابراین از روابط (۱۰-۴) و (۱۱-۴) می توان نتیجه گرفت که در صورتی که افق کنترل بینهایت باشد، $V(x_k^a)$ یک تابع لیاپانوف برای سیستم حلقه بسته می باشد. همچنین مشاهده می شود که با یافتن حد بالای تابع هزینه J_k ، مساله بهینه سازی min-max به یک مساله مینیمم سازی تبدیل می شود.

گام ۲: مینیمم سازی حد بالای تابع هزینه J_k (بدترین حالت به ازای عدم قطعیت سیستم) با قانون کنترل فیدبک حالت و استفاده از LMI ها

قضیه ۴-۱: برای سیستم (۲-۴) با عدم قطعیت مدل و تاخیر زمانی نامعین به فرم (۴-۴) تا (۵-۴)، در هر گام زمانی $k(t_k)$ ، بهره فیدبک حالت F_k در قانون کنترل (۸-۴) که حد بالای تابع هزینه (۹-۴) را مینیمم می کند، از رابطه $F_k = Y_k Q_k^{-1}$ به دست می آید که در آن Q_k و Y_k از حل مساله مینیمم سازی زیر حاصل می شود.

$$\min \gamma \text{ s.t., } \begin{bmatrix} 1 & (x_k^a)^T \\ x_k^a & Q_k \end{bmatrix} > 0 \quad ; Q_k > 0 \quad (12-4)$$

$$\begin{bmatrix} Q_k & * & * & * \\ A_{ij}^a Q_k + B_{ij}^a Y_k & Q_k & * & * \\ Q_1^{\frac{1}{2}} Q_k & 0 & \gamma I & * \\ R^{\frac{1}{2}} Y_k & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, j = 1, \dots, L, i = \underline{d}, \dots, \bar{d} \quad (13-4)$$

نکته: * در رابطه (13-4) نشاندهنده نماد ترانهاد (T) است.

اثبات: بر اساس تئوری ۱ در [۴۱]، شرط لازم و کافی برای پایداری مجانبی سیستم گسسته در زمان حلقه بسته این است که شروط (14-4) و (15-4) برقرار باشد:

$$\begin{bmatrix} 1 & (x_k^a)^T \\ x_k^a & \tilde{P}_k^{-1} \end{bmatrix} > 0 \quad (14-4)$$

$$\begin{bmatrix} -\tilde{P}_k & * & * & * \\ A_{ij}^a + B_{ij}^a F_k & -\tilde{P}_k^{-1} & * & * \\ Q_1^{\frac{1}{2}} & 0 & -\gamma I & * \\ R^{\frac{1}{2}} F_k & 0 & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (15-4)$$

$$Q_k = \tilde{P}_k^{-1} = \gamma P_k^{-1} \text{ که در آن}$$

بنابراین (15-4) تضمین می‌کند که شرط $(x_k^a)^T P_k x_k^a \leq \gamma$ برقرار است و با استفاده از قضیه

SCHUR complement داریم:

$$\begin{bmatrix} Q(x) & S(x) \\ S(x)^T & R(x) \end{bmatrix} > 0 \Leftrightarrow R(x) > 0, ; \text{ SCHUR complement}$$

$$Q(x) - S(x)R(x)^{-1}S(x)^T > 0 \Rightarrow V(x_k^a) = (x_k^a)^T P_k x_k^a \leq \gamma \Leftrightarrow 1 - (x_k^a)^T \gamma^{-1} P_k x_k^a > 0$$

$$\Leftrightarrow 1 - (x_k^a)^T Q_k^{-1} x_k^a \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & (x_k^a)^T \\ x_k^a & Q_k \end{bmatrix} \geq 0$$

از جایگزین کردن $\Delta u_{k+i} = F_k x_{k+i}^a$ و $(x_{k+i+1}^a) = (x_{k+i}^a)^T P_k x_{k+i}^a$ و $V(x_k^a) = (x_k^a)^T P_k x_k^a$ در

رابطه (10-4) داریم:

$$(x_{k+i}^a)^T H x_{k+i}^a \leq 0 \quad ; H = \begin{pmatrix} (A_{k+i}^a + B_{k+i}^a F_k)^T P_k (A_{k+i}^a + B_{k+i}^a F_k) \\ -P_k + F_k^T R F_k + Q_1 \end{pmatrix} \quad (۱۶-۴)$$

رابطه (۱۶-۴) برقرار است اگر:

$$((A_{k+i}^a + B_{k+i}^a F_k)^T P_k (A_{k+i}^a + B_{k+i}^a F_k) - P_k + F_k^T R F_k + Q_1) \leq 0 \quad (۱۷-۴)$$

از جانشین کردن $Q_k > 0$, $P_k = \gamma Q_k^{-1}$ و $Y_k = F_k Q_k$ و سپس پیش و پس ضرب کردن Q_k در

رابطه (۱۷-۴) و استفاده از قضیه SCHUR complement داریم:

$$\begin{bmatrix} Q_k & * & * & * \\ A_{k+i}^a Q_k + B_{k+i}^a Y_k & Q_k & * & * \\ Q_1^{\frac{1}{2}} Q_k & 0 & \gamma I & * \\ R^{\frac{1}{2}} Y_k & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (\#)$$

نامساوی (#) به ازای همه $[A_{k+i}^a \ B_{k+i}^a]$ برقرار است. بنابراین به ازای همه $[A_k^a \ B_k^a]$ به صورت

زیر نیز برقرار است:

$$[A_k^a \ B_k^a] \in \Omega = \{(A_k^\alpha, B_k^\alpha) | (A_k^\alpha, B_k^\alpha) = \sum_{j=1}^L \sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_{ij} (A_{ij}^a, B_{ij}^a);$$

$$\sum_{j=1}^L \sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_{ij} = 1; \lambda_{ij} \geq 0\}$$

اگر و فقط اگر داشته باشیم:

$$\begin{bmatrix} Q_k & * & * & * \\ A_{ij}^a Q_k + B_{ij}^a Y_k & Q_k & * & * \\ Q_1^{\frac{1}{2}} Q_k & 0 & \gamma I & * \\ R^{\frac{1}{2}} Y_k & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0 \quad ; i = \underline{d}, \dots, \bar{d} \quad ; j = 1, \dots, L$$

بنابراین ماتریس فیدبک حالت از رابطه $F_k = Y_k Q_k^{-1}$ به دست می‌آید.

در این بخش الگوریتم ارائه شده در فصل ۳ به گونه‌ای توسعه یافت تا برای NCS های شامل عدم

قطعیت در تاخیر زمانی و مدل به طور همزمان، کارایی داشته باشد. نشان داده شد که با در نظر گرفتن افق

کنترل بینهایت، پایداری سیستم حلقه بسته تضمین می‌شود. در فصل ۵ با استفاده از نتایج شبیه‌سازی کارایی

و تاثیر الگوریتم ارائه شده در مقایسه با روش NRMPC نشان داده خواهد شد.

۳-۴- طراحی جبرانساز RMPC برای سیستمهای شامل تاخیر زمانی نامعین و ورودی

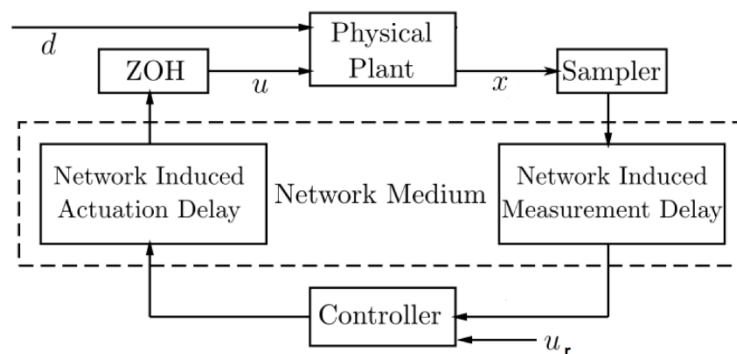
اغتشاف

در این بخش الگوریتم RMPC ارائه شده در فصل ۳ به منظور جبرانسازی تاخیر زمانی نامعین و تضعیف اثرات اغتشاف ورودی توسعه می‌یابد. الگوریتم جدید ارائه شده در این بخش RMPC توسعه یافته یا به اختصار ^۱DRMPC نامیده می‌شود. روش ارائه شده مبتنی بر حل نامساویهای ماتریسی خطی است.

۴-۳-۱- توصیف مدل شامل ورودی اغتشاف و تاخیر زمانی نامعین با استفاده از

چندضلعی‌های عدم قطعیت

در شکل ۴-۱، بلوک دیاگرام یک NCS با ورودی اغتشاف نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱ بلوک دیاگرام یک NCS با ورودی اغتشاف

مدل حلقه باز سیستم پیوسته در زمان تحت شبکه، به فرم فضای حالت (۴-۱۸) نشان داده می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) + Df(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4-18)$$

که در آن $u \in R^m, \in R^d, y \in R^p, x \in R^n$ به ترتیب بردار حالت، خروجی، اغتشاف و ورودی است. پارامتر $\tau \in [\underline{\tau}, \bar{\tau}]$ تاخیر زمانی نامعین ثابت با کران معلوم را نشان می‌دهد. با انتخاب زمان نمونه‌برداری مناسب t_s ، مدل گسسته در زمان رابطه (۴-۱۹) به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$\begin{cases} x_{k+1} = (I + \tilde{A})x_k - \tilde{A}x_{k-1} + \tilde{B}_{\underline{d}}\Delta u_{k-\underline{d}} + \dots + \tilde{B}_{\bar{d}}\Delta u_{k-\bar{d}} + \tilde{D}F_k \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (4-19)$$

¹ Developed Robust Model Predictive Control

در محاسبه پارامترهای مدل گسسته، مقدار τ ، کل زمان تاخیر سیستم حلقه بسته در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای رابطه (۱۹-۴) در جدول (۲-۴) تعریف شده است.

جدول ۲-۴ تعریف متغیرهای رابطه ۱۹-۴

متغیر	تعریف
I	ماتریس همانی
$\tilde{A}$	$\tilde{A} = e^{At_s}$
$\tilde{B}_{\underline{d}}, \dots, \tilde{B}_{\bar{d}}$	$\tilde{B}_i = \int_0^{t_s} e^{As} B ds$
$\tilde{D}$	$\tilde{D} = \int_0^{t_s} e^{As} D ds$
$\tilde{B}_i$	$\tilde{B}_i + \tilde{B}_{i+1} = \int_0^{t_s} e^{As} B ds$
τ	$\tau \in [\underline{\tau}, \bar{\tau}] \subset (\underline{dt}_s, \bar{dt}_s)$
t_s	فاصله زمانی بین دو نمونه متوالی، $t_s = t_k - t_{k-1}$
k	شاخص زمانی
Δu_j	$\Delta u_j = u_j - u_{j-1}, \quad j = k - \bar{d}, \dots, k - \underline{d}$
$\underline{d}$	$\underline{d} = fl(\underline{\tau}/t_{PSA}1)$
$\bar{d}$	$\bar{d} = cl(\bar{\tau}/t_{PSA})$
$fl(\cdot)$	تابعی که نزدیکترین عدد صحیح کوچکتر از $(\cdot)$ را برمی‌گرداند
$cl(\cdot)$	تابعی که نزدیکترین عدد صحیح بزرگتر از $(\cdot)$ را برمی‌گرداند

با تعریف بردار حالت جدید به صورت:

$$x_k^a = [x_k, x_{k-1}, \Delta u_{k-\bar{d}}, \dots, \Delta u_{k-\underline{d}}, \dots, \Delta u_{k-1}] \quad (۲۰-۴)$$

مدل گسسته رابطه (۱۹-۴) را می‌توان به فرم زیر نمایش داد:

$$x_{k+1}^a = A^\alpha x_k^a + B^\alpha \Delta u_k^a + D^\alpha F_k \quad ; \quad D^\alpha = \tilde{D} \quad (۲۱-۴)$$

$$(A^\alpha, B^\alpha) \in \Omega$$

که در آن نامعینی در ماتریسهای (A^α, B^α) نشان داده شده و $x_k^a \in R^s$ و $s = 2n + \bar{d}$ است.

¹ Periodic Signal Acquisition time or sampling time. It is equal to t_s ($t_{PSA} = t_s$)

با ترکیب مدل‌های ارائه شده در [۴۱] و [۴۲]، مجموعه Ω به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega = \left\{ (A^\alpha, B^\alpha) \mid (A^\alpha, B^\alpha) = \sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_i (A_i^\alpha, B_i^\alpha); \sum_{i=\underline{d}}^{\bar{d}} \lambda_i = 1; \lambda_i \geq 0 \right\} \quad (22-4)$$

$$\forall i \in [\underline{d}, \dots, \bar{d} - 1] \quad (23-4)$$

که در آن:

$$A_i^\alpha = \begin{bmatrix} I + \tilde{A}, -\tilde{A}, 0_{n \times (\bar{d}-i)}, \tilde{B}, 0_{n \times (i-1)} \\ I_{n \times n}, 0_{n \times (\bar{d}+n)} \\ 0_{(\bar{d}-1) \times (2n+1)}, I_{(\bar{d}-1) \times (\bar{d}-1)} \\ 0_{1 \times (2n+\bar{d})} \end{bmatrix} \quad (24-4)$$

$$B_i^\alpha = \begin{bmatrix} 0_{(2n+\bar{d}-1) \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i = \underline{d}, \dots, \bar{d} \quad (25-4)$$

A_i^α, B_i^α ، رئوس چندضلعی Ω هستند. همچنین F_k کراندار و متعلق به چندضلعی محدب ذیل می‌باشد:

$$\Omega_F = \left\{ F \mid F = \sum_{j=1}^{n_d} \beta_j F_j; \sum_{j=1}^{n_d} \beta_j = 1; \beta_j \geq 0 \right\} \quad (26-4)$$

که در آن F_j رئوس چندضلعی Ω_F و n_d بعد F_j می‌باشد.

۴-۳-۲- طراحی کنترل کننده پیش بین مدل مقاوم به منظور جبران سازی تاخیر

زمانی و ورودی اغتشاش

فرمول بندی الگوریتم RMPC توسعه یافته به شرح ذیل است:

در هر گام زمانی $t(t_k)$ ، کنترل کننده فیدبک حالت $\Delta u^\alpha(k+h/k) = Kx^\alpha(k+h/k)$ (۱) حد بالای (γ) تابع هزینه $J_\infty(k)$ را مینیمم می‌کند، (۲) پایداری سیستم حلقه بسته در حضور تاخیر زمانی نامعین و ورودی اغتشاش را درون مجموعه نامتغیر مثبت^۱ $Z = \{x^\alpha \in R^s / \|x^\alpha\|_p^2 \leq \gamma\}$ تضمین می‌کند. بهره کنترل کننده فیدبک حالت از حل مساله بهینه سازی زیر حاصل می‌شود [۴۳].

$$\min_{\gamma, P, K} \max_{A^\alpha(k+h), B^\alpha(k+h) \in \Omega} J_\infty(k) = \sum_{h=0}^{\infty} [\|x_s^\alpha(k+h/k)\|_\psi^2 + \|Kx_s^\alpha(k+h/k)\|_\delta^2] \quad (27-4)$$

Subject to:

$$x_s^\alpha(k+h+1/k) = [A^\alpha(k+i) + B^\alpha(k+h)K]x_s^\alpha(k+h/k) \quad (28-4)$$

¹ Invariant Set

$$x^\alpha(k+h+1/k) = [A^\alpha(k+h) + B^\alpha(k+h)K]x^\alpha(k+h/k) + \bar{D}(k+h)F(k+h) \quad (29-4)$$

$$\|x_s^\alpha(k+h+1/k)\|_p^2 - \|x_s^\alpha(k+h/k)\|_p^2 \leq -[\|x_s^\alpha(k+h/k)\|_\psi^2 + \|Kx_s^\alpha(k+h/k)\|_\delta^2] \quad (30-4)$$

$$\|x^\alpha(k)\|_p^2 \leq \gamma \quad (31-4)$$

$$\|x^\alpha(k+h+1/k)\|_p^2 \leq \gamma \quad (32-4)$$

که در آن $x_s^\alpha(k+h/k)$ حالت پیش‌بینی شده بدون اثر اغتشاش و ψ و δ ماتریس‌های وزنی هستند. مجموعه نامتغیر مثبت^۱ با رابطه (۳۱-۴) تعریف می‌شود. تمام حالت‌های پیش‌بینی شده در رابطه (۳۲-۴) محدود شده‌اند. الگوریتم RMPC توسعه یافته به این منظور در قضیه ذیل بیان شده است.

قضیه ۴-۱: در هر گام زمانی $t(t_k)$ روابط (۳۰-۴) و (۳۱-۴) برقرارند اگر ماتریس‌های Q_k و Y_k و اسکالر γ چنان وجود داشته باشند که LMI های (۳۳-۴) و (۳۴-۴) برآورده شوند:

$$\begin{bmatrix} Q_k & * & * & * \\ A_i^a Q_k + B_i^a Y_k & Q_k & * & * \\ \psi^{\frac{1}{2}} Q_k & 0 & \gamma I & * \\ R^{\frac{1}{2}} Y_k & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, \quad i = \underline{d}, \dots, \bar{d} \quad (33-4)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ x_k^a & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (34-4)$$

اثبات: طبق [۴۱] قیود (۲۹-۴)، (۳۰-۴) و (۳۱-۴) توسط (۳۳-۴) و (۳۴-۴) تضمین می‌شوند. با جمع کردن (۳۰-۴) از $i = 0$ تا $i = \infty$ و اعمال (۳۱-۴)، $J_\infty(k) < \gamma$ برآورده می‌شود.

قضیه ۴-۲: شرط (۳۲-۴) برآورده می‌شود اگر ماتریس‌های Q_k و Y_k چنان وجود داشته باشند که LMI های ذیل برآورده گردند:

$$\begin{bmatrix} \theta Q_k & * \\ A_i^a Q_k + B_i^a Y_k & Q_k \end{bmatrix} \geq 0, \quad i = \underline{d}, \dots, \bar{d} \quad (35-4)$$

$$\begin{bmatrix} \xi & * \\ D^a F_{jk} & Q_k \end{bmatrix} \geq 0, \quad j = 1, \dots, n_d \quad (36-4)$$

¹ Positively Invariant Set

که در آن $F_{jk} = F_j(k)$ و $0 < \theta < 1$ یک اسکالر از پیش تعریف شده است. در این صورت طبق (۴-۳۲) تمام حالت‌های ممکن پیش‌بینی شونده در مجموعه نامتغیر مثبت محدود می‌شوند (یک مجموعه نامتغیر مثبت شامل حالت‌های اندازه‌گیری شده است که در هر لحظه نمونه‌برداری از رابطه (۴-۳۱) محاسبه می‌شوند).
اثبات:

لم ۱: [۴۴]، فرض کنید $M > 0$ یک ماتریس متقارن باشد و a و b بردارهایی با ابعاد مناسب باشند. در اینصورت به ازای هر $\delta > 0$ داریم:

$$\|a + b\|_M^2 \leq (1 + \delta)\|a\|_M^2 + (1 + \frac{1}{\delta})\|b\|_M^2$$

از جاگذاری (۴-۲۹) و $P = \gamma Q^{-1}$ در (۴-۳۲) و اعمال لم ۱، به ازای هر $\delta_1 > 0$ ، رابطه (۴-۳۲) برقرار است اگر:

$$(1 + \delta_1)\|[A(k+h) + B(k+h)K]x(k+h/k)\|_{Q^{-1}}^2 + (1 + \frac{1}{\delta_1})\|D(k+h)v(k+h)\|_{Q^{-1}}^2 \quad (۴-۳۷)$$

ترم $\|[A(k+h) + B(k+h)K]x(k+h/k)\|_{Q^{-1}}^2$ را در (۴-۳۷) در نظر بگیرید. فرض کنید $\theta\|x(k+h/k)\|_{Q^{-1}}^2$ حداکثر مقدار این عبارت باشد که در آن $0 < \theta < 1$ یک اسکالر از پیش تعریف شده است. در اینصورت داریم:

$$(1 + \delta_1)\|[A(k+h) + B(k+h)K]x(k+h/k)\|_{Q^{-1}}^2 \leq \theta\|x(k+h/k)\|_{Q^{-1}}^2 \quad (۴-۳۸)$$

با جاگذاری $K = YQ^{-1}$ و پیش ضرب کردن Q^T و پس ضرب کردن Q در (۴-۳۸) و با بهره‌گیری از SCHUR Complement، نتیجه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \theta Q & * \\ A(k+h)Q + B(k+h)Y & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (۴-۳۹)$$

از محدب بودن تعریف چندضلعی‌ها، (۴-۳۹) معادل (۴-۳۵) است.

ترم $\|D(k+h)v(k+h)\|_{Q^{-1}}^2$ در (۴-۳۷) را در نظر بگیرید. فرض کنید ξ حداکثر مقدار این عبارت باشد:

$$\|D(k+h)v(k+h)\|_{Q^{-1}}^2 \leq \xi \quad (۴-۴۰)$$

با اعمال SCHUR Complement، نتیجه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \xi & * \\ D(k+h)v(k+h) & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (۴-۴۱)$$

از محدب بودن تعریف چندضلعی‌ها، (۴۱-۴) معادل (۳۶-۴) است.

از (۴۰-۴)، (۳۸-۴) و $\|x(k + h/k)\|_{Q^{-1}}^2 \leq 1$ ، (۳۷-۴) معادل است با:

$$(1 + \delta_1)\theta + (1 + \frac{1}{\delta_1})\xi \leq 1 \quad (42-4)$$

حداکثر مقدار مجاز ξ از حل معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\xi = \max_{\delta_1} \frac{1 - (1 + \delta_1)\theta}{(1 + \frac{1}{\delta_1})} \quad (43-4)$$

از حل این معادله $\xi = (1 + \theta^{\frac{1}{2}})^2$ حاصل می‌شود.

با در نظر گرفتن قضایای ۱-۴ و ۲-۴، یک کنترل‌کننده فیدبک حالت که بتواند پایداری مقاوم را در حضور هر دو عامل تاخیر زمانی نامعین و ورودی اغتشاش تضمین کند، قابل حصول و محاسبه است.

در هر گام زمانی $k(t_k)$ ، کنترل‌کننده فیدبک حالت $Kx^\alpha(k + h/k) = \Delta u^\alpha(k + h/k)$ که در آن $K = Y_k Q_k^{-1}$ ، پایداری مقاوم سیستم حلقه بسته را درون مجموعه نامتغیر $Z = \{x^\alpha \in R^S / \|x^\alpha\|_P^2 \leq \gamma\}$ تضمین می‌کند به شرطی که بهره فیدبک حالت آن از حل مساله بهینه‌سازی زیر حاصل شود.

$$\min_{\gamma, Y, Q} \gamma \text{ subject to (4-33) to (4-36)}$$

با اعمال الگوریتم RMPC ارائه شده، تمام حالت‌های بعدی‌ای که از حالت اولیه حاصل می‌شوند، تضمین می‌شوند که درون یک مجموعه نامتغیر مثبت باقی بمانند.

۴-۴- نتیجه‌گیری

در این فصل دو الگوریتم جهت ۱) جبران‌سازی سیستم‌های کنترل تحت شبکه‌ای که همزمان دچار تاخیر زمانی از نوع نامعین اما ثابت-کراندار و همچنین عدم قطعیت در مدل می‌باشند و ۲) جبران‌سازی سیستم‌های کنترل تحت شبکه‌ای که همزمان دچار تاخیر زمانی از نوع نامعین اما ثابت-کراندار و ورودی اغتشاش هستند، توسعه یافت. در هر دو الگوریتم توسعه یافته، پایداری سیستم حقه بسته تضمین گردید. نشان داده شد که با استفاده از یک کنترل‌کننده فیدبک حالت که از حل مساله بهینه‌سازی مبتنی بر نامساویهای مساویهای ماتریسی خطی حاصل می‌شود، چگونه می‌تواند به جبران‌سازی مسائل مطرح شده کمک کند. در فصل ۵ نتایج شبیه‌سازی ناشی از اعمال این دو الگوریتم بر یک فرآیند کنترل سطح صنعتی ارائه خواهد شد.

فصل پنجم

شبیه‌سازی

فصل ۵ - شبیه‌سازی

۵-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج شبیه‌سازی الگوریتم‌های ارائه شده در فصل (۴) و مقایسه آن با روش‌های مرسوم نشان داده می‌شود. کامپیوتر مورد استفاده برای شبیه‌سازی، یک دستگاه لپ‌تاپ مجهز به پردازنده Corei5 با ۸ گیگابایت رم می‌باشد و از نرم‌افزار MATLAB ورژن R2014b به منظور پیاده‌سازی الگوریتم‌ها، تعریف مدل‌های سیستم و نمایش نتایج و نمودارهای حاصل استفاده شده است. همچنین برای حل نامساویهای ماتریسی خطی مورد نیاز در الگوریتم‌ها از جعبه ابزار^۱ یالمپ^۲ که یکی از قویترین جعبه ابزارهای موجود در این زمینه می‌باشد، استفاده شده است. به منظور مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، پارامترهای قابل تنظیم در الگوریتم‌های مورد مقایسه همچون ماتریسهای وزنی و ... تماماً مشابه در نظر گرفته شده است.

همچنین لازم به ذکر است که کلیه شبیه‌سازی‌ها بر روی یک فرآیند سطح که مدل تابع تبدیل آن در [۵] و [۴۲] تعریف شده است، انجام شده است.

۵-۲- طراحی جبران‌ساز پیش‌بین مدل مقاوم در NCS های شامل عدم قطعیت در مدل و

تاخیر زمانی

مدل تابع تبدیل یک فرآیند سطح طبق [۵] به فرم زیر در نظر گرفته شده است:

$$G_0(s) = \frac{k}{s(s+\alpha)} e^{-\tau s} \quad (۱-۵)$$

این مدل در کلیه شبیه‌سازیها مورد استفاده قرار گرفته است و بسته به نوع سناریویی که انتخاب شده است، متغیرهای آن تغییر یافته است. در این بخش به منظور نمایش اثربخشی الگوریتم ارائه شده، دو سناریو برای مقدار تاخیر زمانی در نظر گرفته شده است. در سناریوی ۱، بازه تغییرات تاخیر زمانی کوچک در نظر گرفته شده است و در سناریوی ۲، بازه تغییرات تاخیر زمانی به نسبت بزرگتر فرض شده است. مقادیر پارامترهای مدل و طراحی در هر سناریو در جدول مربوطه در هر بخش مشخص شده است.

¹ ToolBox

² Yalmip

۵-۲-۱- سناریوی ۱

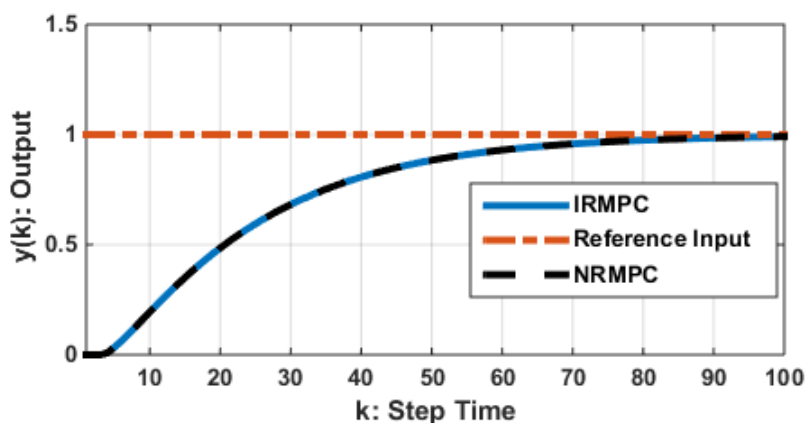
پارامترهای اصلی سناریوی ۱ در جدول (۵-۱) تعریف شده است.

جدول ۵-۱ پارامترهای اصلی سناریوی ۱

سناریوی ۱	پارامتر $(\underline{d}, \bar{d})$	دوره نمونه برداری (h)	(Q, R)	k	α
$\tau \in [0.15 \ 0.35]$	$(2, 4)$	100ms	$(1, 0.5)$	0.9	$[0.1 \ 1]$

Q و R ماتریسهای وزنی هستند که در فصل (۴) تعریف شده اند. در تمام نمودارهای حاصل از شبیه سازی در این بخش، برای الگوریتم مرسوم RMPC از اصطلاح 1 NRMPC استفاده شده و برای الگوریتم تعمیم یافته به سیستم های با نامعینی در مدل، از اصطلاح 2 IRMPC استفاده شده است. همچنین به منظور مقایسه الگوریتم ارائه شده با الگوریتم مرسوم، شبیه سازی در سه حالت انجام شده است. *حالت اول* مدل معین و تاخیر زمانی از نوع نامعین ثابت – کراندار. *حالت دوم* مدل نامعین و تاخیر زمانی از نوع نامعین ثابت – کراندار. *حالت سوم* مدل نامعین و تاخیر زمانی از نوع نامعین ثابت – کراندار با تغییر در ورودی مرجع.

شکل (۵-۱)، پاسخ پله سیستم حلقه بسته برای دو الگوریتم NRMPC و IRMPC را نشان می دهد.



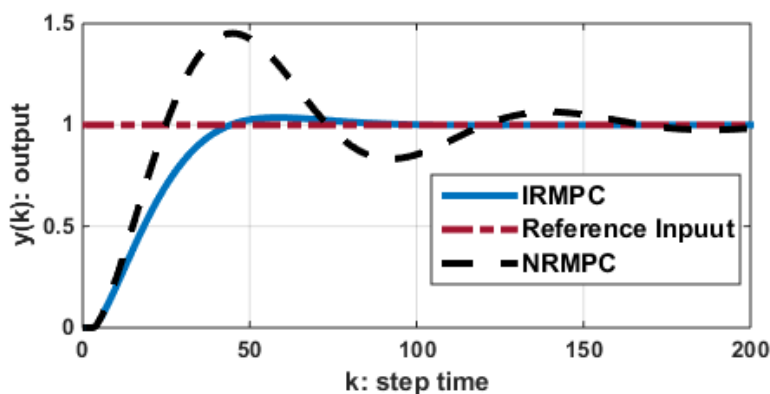
شکل ۵-۱ پاسخ پله سیستم حلقه بسته برای دو الگوریتم NRMPC و IRMPC در *حالت اول* (مدل معین)

همانطور که از شکل (۵-۱) مشخص است، خروجی سیستم حلقه بسته در حالتی که مدل سیستم معین باشد، در هر دو الگوریتم یکسان است.

¹ Normal RMPC

² Improved RMPC

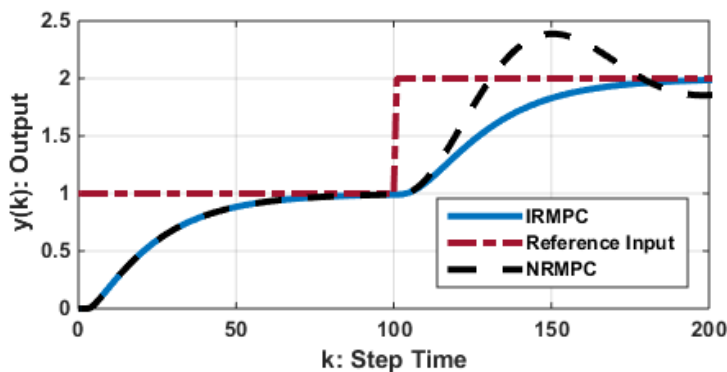
شکل ۵-۲ پاسخ پله سیستم حلقه بسته را در حالتی که هم مدل نامعین باشد و هم تاخیر زمانی (حالت دوم) نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲ پاسخ پله سیستم حلقه بسته برای دو الگوریتم $IRMPC$ و $NRMPC$ در حالت دوم (مدل نامعین)

همانطور که از شکل (۵-۲) مشخص است، عملکرد^۱ سیستم حلقه بسته با استفاده از الگوریتم مرسوم $NRMPC$ به ازای نامعینی در مدل به شدت تضعیف می‌شود.

شکل (۵-۳) پاسخ پله سیستم حلقه بسته را به ازای تغییر در ورودی مرجع در $k = 100$ نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳ پاسخ سیستم حلقه بسته در حالت سوم (تغییر ورودی مرجع)

۵-۲-۲- سناریوی ۲

اگرچه در الگوریتم مرسوم $RMPC$ ، عدم قطعیت تاخیر زمانی و مدل به صورت صریح وارد نشده است، اما در عمل این الگوریتم برای مقادیر کوچک تاخیر زمانی عملکرد قابل قبولی دارد و نتایج شبیه‌سازی نشان

¹ Performance

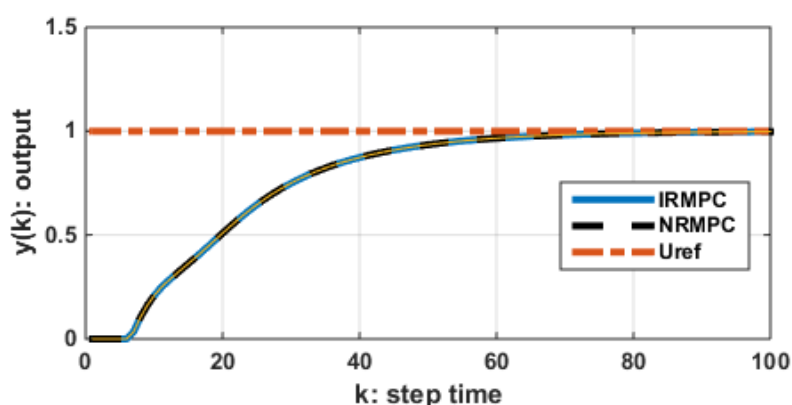
دهنده پایداری سیستم حلقه بسته است. به منظور ارزیابی و مقایسه بهتر الگوریتم توسعه یافته در این تحقیق با الگوریتم NRMPC، در سناریوی دوم بازه تغییرات تاخیر زمانی و حد بالای آن به نسبت بزرگتر در نظر گرفته می‌شود.

پارامترهای اصلی سناریوی ۲ در جدول (۲-۵) نشان داده شده است.

جدول ۲-۵ پارامترهای اصلی سناریوی ۲

سناریوی ۲	پارامتر $(\underline{d}, \bar{d})$	دوره نمونه برداری (h)	(Q, R)	k	α
$\tau \in [1.4 \ 1.75]$	$(7, 9)$	200ms	$(1, 0.5)$	0.9	$[0.1 \ 1]$

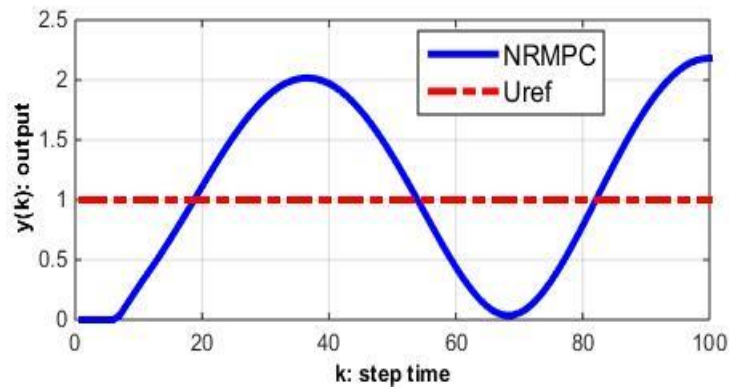
شکل (۴-۵) پاسخ پله سیستم حلقه بسته را در سناریوی ۲ نشان می‌دهد. در این شکل خروجی سیستم حلقه بسته به ازای مدل معین و تاخیر زمانی نامعین نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ پاسخ پله سیستم حلقه بسته برای دو الگوریتم NRMPC و IRMP در سناریوی ۲ و با مدل معین

همانطور که از شکل (۴-۵) مشخص است، خروجی سیستم در حالتی که مدل سیستم معین باشد، در دو الگوریتم یکسان است.

شکل (۵-۵) پاسخ پله سیستم حلقه بسته را در سناریوی ۲ و با استفاده از الگوریتم NRMPC نشان داده شده است.

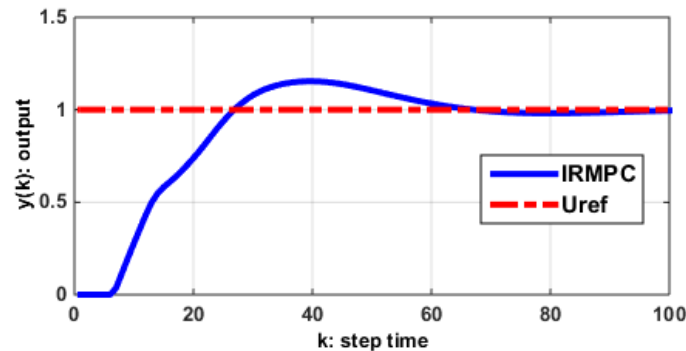


شکل ۵-۵ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با استفاده از الگوریتم *NRMPC* در سناریوی ۲ و با مدل نامعین

از شکل (۵-۵) مشخص است که افزایش تاخیر زمانی در سناریوی ۲، منجر به تضعیف شدید عملکرد سیستم حلقه بسته و حتی ناپایداری گردیده است. نتایج شبیه‌سازی به وضوح نشان می‌دهد که الگوریتم *NRMPC* با افزایش مقدار تاخیر زمانی، کارایی خود را از دست می‌دهد اگر چه شکل‌های (۳-۵) و (۴-۵) نشان داد که به ازای مقادیر کوچک تاخیر زمانی، این الگوریتم عملکرد قابل قبولی دارد.

شکل (۶-۵) پاسخ پله سیستم حلقه بسته را در سناریوی ۲ و با استفاده از الگوریتم *IRMPC* نشان

می‌دهد.



شکل ۵-۶ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با استفاده از الگوریتم *IRMPC* در سناریوی ۲ و با مدل نامعین

در شکل (۶-۵) مشاهده می‌شود که با اضافه شدن عدم قطعیت به مدل سیستم در حضور تاخیرهای زمانی بزرگ، اگرچه عملکرد سیستم تضعیف می‌شود، اما پایداری سیستم حلقه بسته حفظ می‌گردد.

به منظور مقایسه دو الگوریتم *IRMPC* و *NRMPC* از شاخص عملکرد تعریف شده در رابطه ذیل

استفاده می‌کنیم [۵]:

$$E_{perf} = \left(\frac{1}{n}\right) \sqrt{\sum_{k=1}^n (|x_{ref_k} - y_k|^2 + u_k^2)} \quad (۲-۵)$$

که در آن n عدد متناظر با آخرین گام شبیه‌سازی (در این حالت $n = 100$) است. رابطه (۵-۲) بیانگر عملکرد کلی سیستم حلقه بسته در کل مدت زمان شبیه‌سازی است. جدول (۵-۳)، شاخص عملکرد دو الگوریتم کنترلی را در دو سناریوی مختلف ارائه می‌کند.

جدول ۵-۳ شاخص عملکرد دو الگوریتم کنترلی

	NRMP (Scenario I)	NRMP (Scenario II)	IRMP (Scenario I)	IRMP (Scenario II)
E_{perf}	0.1971	0.3396	0.1083	0.1922
$t_{settling\ time}(s)$	15.5	unstable	4	12
Overshoot %	45	unstable	3.6	15.4

۵-۳- نتایج شبیه‌سازی الگوریتم توسعه یافته جهت جبران‌سازی تاخیر زمانی و تضعیف

اغتشاش

در این بخش نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال الگوریتم ارائه شده در فصل (۴) که به منظور جبران‌سازی تاخیر زمانی و تضعیف اغتشاش در سیستم‌های کنترل تحت شبکه‌ای که از هر دو مساله تاخیر زمانی و ورودی اغتشاش رنج می‌برند، ارائه می‌شود. مدل تاخیر زمانی استفاده شده در این الگوریتم مشابه الگوریتم ارائه شده جهت جبران‌سازی همزمان عدم قطعیت در مدل و تاخیر زمانی است و بنابراین از نوع نامعین ثابت – کراندار در نظر گرفته شده است. برای الگوریتم مرسوم RMPC مورد استفاده در نمودارهای این بخش، از اصطلاح Conventional RMPC و برای الگوریتم توسعه یافته از اصطلاح $DRMPC^1$ استفاده شده است.

نتایج شبیه‌سازی برای دو سناریو نشان داده شده است. در سناریوی اول دامنه اغتشاش کوچک در نظر گرفته شده است و در سناریوی دوم دامنه اغتشاش به نسبت بزرگتر در نظر گرفته شده است. همچنین شبیه‌سازی در هر سناریو برای دو نوع اغتشاش ثابت و متغیر با زمان صورت پذیرفته است. مقادیر پارامترهای مدل و طراحی در هر سناریو در جدول مربوط در هر بخش مشخص شده است.

اگرچه الگوریتم ارائه شده پارامترهای مدل نشده را در بر نمی‌گیرد، اما به منظور ارزیابی الگوریتم ارائه شده، در بخش سوم شبیه‌سازی، نتایج حاصل از اعمال الگوریتم توسعه یافته به یک سیستم با پارامترهای مدل نشده همچون بهره، صفر یا قطب ارائه می‌شود.

¹ Developed RMPC

۵-۳-۱ سناریوی ۱ (دامنه اغتشاش کوچک)

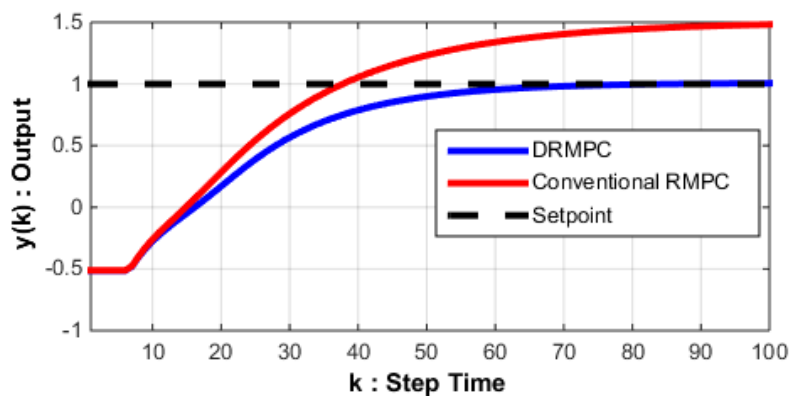
مدل فرآیند مورد استفاده در شبیه‌سازیهای این فصل، مدل فرآیند سطح تعریف شده با رابطه (۵-۱) است. پارامترهای اصلی سناریوی ۱ در جدول (۵-۴) مشخص شده است.

جدول ۵-۴ پارامترهای اصلی سناریوی ۱

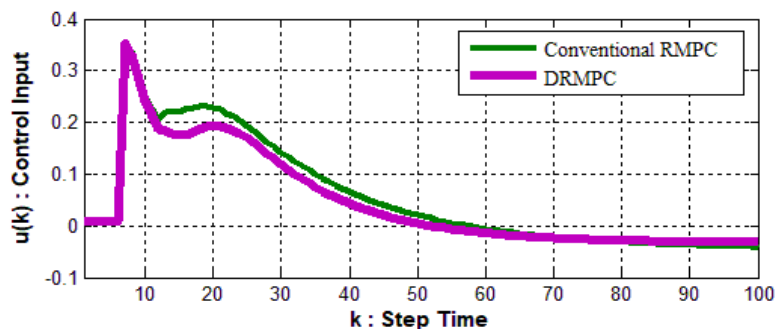
سناریوی ۱	پارامتر $(\underline{d}, \bar{d})$	دوره نمونه برداری (t_s)	ψ	σ	θ
$\tau \in [0.15 \ 0.35]$	(2, 4)	100ms	$I_{s \times s}$ (Ident Mat with dimension s)	0.5	0.97

ماتریسهای وزنی ψ, σ, θ در فصل ۴ تعریف شده است. پارامترهای مدل (۵-۱) به صورت معین و به صورت $\alpha = 0.9$ و $k = 1$ در نظر گرفته شده است.

شکل‌های (۵-۷) و (۵-۸) به ترتیب پاسخ پله سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی دو الگوریتم مرسوم و توسعه یافته را به ازای اغتشاش ثابت $F(k) = 0.05$ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۵-۷) مشخص است، به ازای ورودی اغتشاش با دامنه کوچک پاسخ پله سیستم حلقه بسته در هر دو حالت، پایدار اما در الگوریتم توسعه یافته عملکرد سیستم بهبود یافته است.

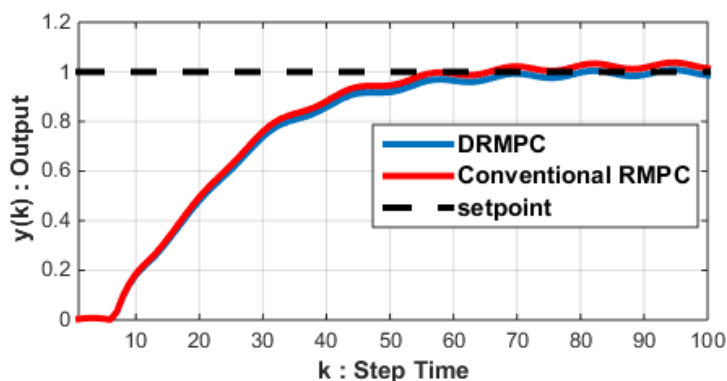


شکل ۵-۷ مقایسه پاسخ پله دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه کوچک

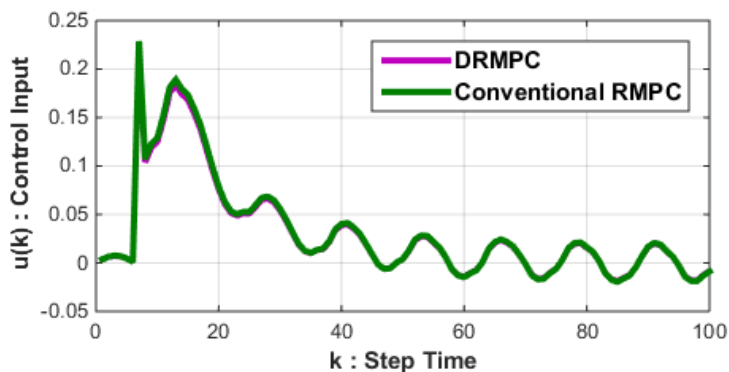


شکل ۵-۸ مقایسه ورودی کنترل دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه کوچک

شکل‌های (۵-۹) و (۵-۱۰) به ترتیب پاسخ پله سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی دو الگوریتم مرسوم و توسعه یافته را به ازای اغتشاش متغیر با زمان $F(k) = 0.05\sin(0.5k)$ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۵-۹) مشخص است، به ازای ورودی اغتشاش متغیر با زمان با دامنه کوچک پاسخ پله سیستم حلقه بسته در هر دو حالت، تقریباً یکسان است هرچند در الگوریتم DRMPC عملکرد سیستم قدری بهبود یافته است.



شکل ۵-۹ مقایسه پاسخ پله دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش متغیر با زمان با دامنه کوچک



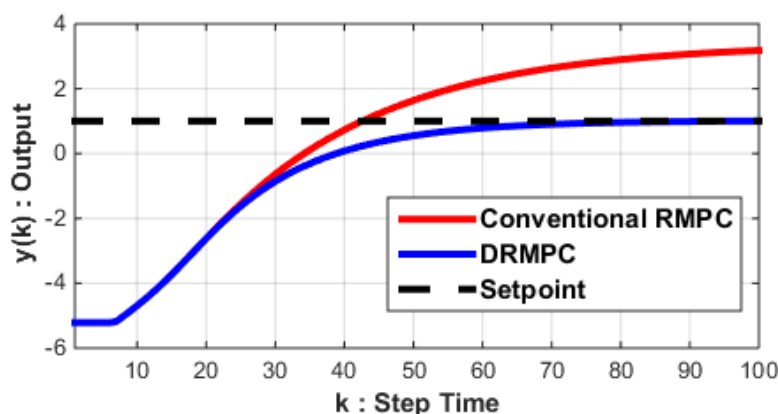
شکل ۵-۱۰ مقایسه ورودی کنترلی دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش متغیر با زمان با دامنه کوچک

۵-۳-۲- سناریوی ۲ (دامنه اغتشاش بزرگ)

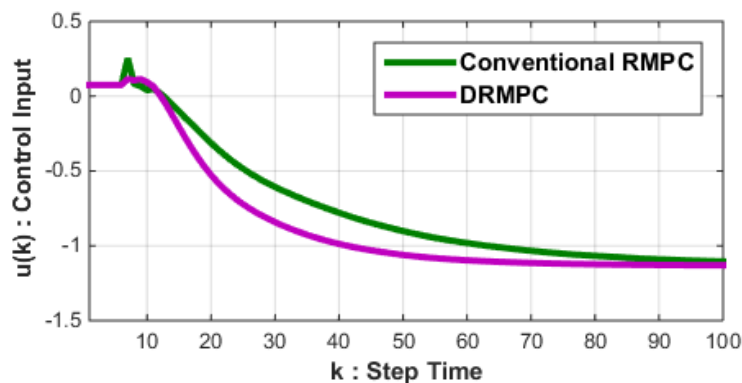
در این بخش پاسخ سیستم به ازای ورودیهای اغتشاش با دامنه بزرگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای اصلی سناریوی ۲ همان پارامترهای جدول (۴-۵) است

در سناریوی ۲ اغتشاش ثابت و متغیر با زمان به ترتیب با $F(k) = 2.5$ و $F(k) = 0.5\sin(0.5k)$ نشان داده می‌شوند.

شکل‌های (۵-۱۱) و (۵-۱۲) به ترتیب پاسخ پله سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی دو الگوریتم Conventional RMPC و DRMPC را به ازای اغتشاش ثابت $F(k) = 2.5$ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل‌های (۵-۱۱) و (۵-۱۲) مشخص است، به ازای ورودی اغتشاش با دامنه کوچک پاسخ پله سیستم حلقه بسته در هر دو حالت، پایدار اما در الگوریتم توسعه یافته عملکرد سیستم بهبود یافته است.

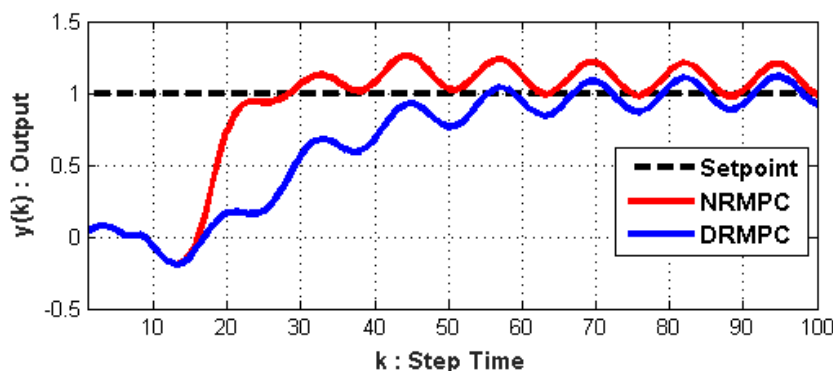


شکل ۵-۱۱ مقایسه پاسخ پله دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه بزرگ

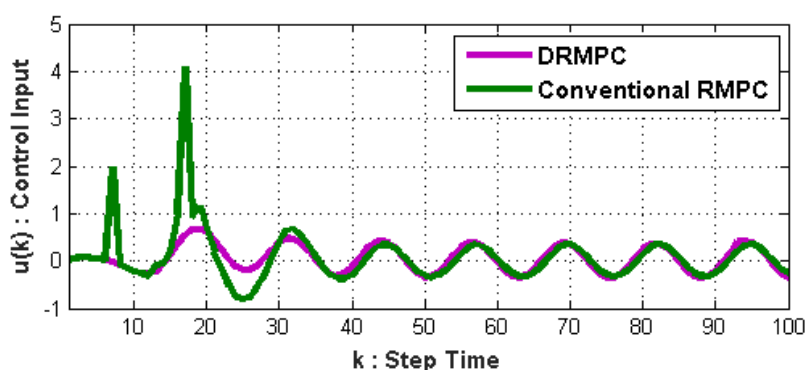


شکل ۵-۱۲ مقایسه ورودی کنترلی دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه بزرگ

شکل‌های (۵-۱۳) و (۵-۱۴) به ترتیب پاسخ پله سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی دو الگوریتم مرسوم و توسعه یافته را به ازای اغتشاش متغیر با زمان $F(k) = 0.5\sin(0.5k)$ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۵-۱۳) مشخص است، به ازای ورودی اغتشاش متغیر با زمان با دامنه بزرگ، عملکرد پاسخ پله سیستم حلقه بسته در روش Conventional RMPC در مقایسه با DRMPC بسیار تضعیف می‌شود.



شکل ۵-۱۳ مقایسه پاسخ پله دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه بزرگ



شکل ۵-۱۴ مقایسه ورودی کنترلی دو الگوریتم به ازای ورودی اغتشاش ثابت با دامنه بزرگ

نتایج شبیه‌سازی یک فرآیند سطح برای یک سیستم کنترل تحت شبکه که علاوه بر تاخیر زمانی نامعین با ورودی اغتشاش نیز مواجه است، در شکل‌های (۵-۷) تا (۵-۱۴) نشان داده شده است. همانطور که از شکل‌های فوق‌الذکر مشخص است، عملکرد سیستم کنترل حلقه بسته با جبران‌ساز Conventional RMPC به ازای ورودی‌های اغتشاش با دامنه کوچک در مقایسه با جبران‌ساز DRMPC تضعیف می‌شود و این تضعیف با افزایش دامنه اغتشاش بسیار بیشتر بروز می‌یابد. علت این مساله در عدم لحاظ ورودی‌های اغتشاش به صورت صریح در طراحی جبران‌ساز Conventional در مقایسه با DRMPC است.

همچنین به منظور مقایسه بهتر این دو الگوریتم در پاسخ به ورودی‌های اغتشاش در حضور تاخیر زمانی نامعین، از دو شاخص عملکرد (۳-۵) و (۴-۵) استفاده می‌شود:

$$E_{perf1} = \left(\frac{1}{n}\right) \sqrt{\sum_{k=1}^n (|x_{refk} - y_k|^2 + u_k^2)} \quad (3-5)$$

$$E_{perf2} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{k=1}^n (x_{refk} - y_k) \quad (4-5)$$

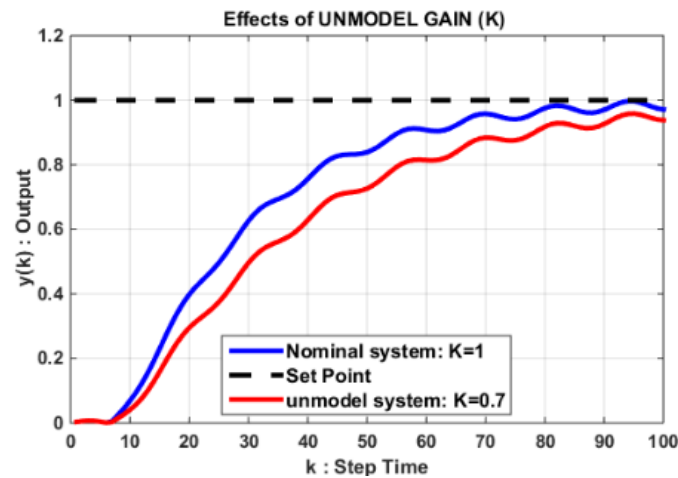
که در آن n عدد متناظر با آخرین گام شبیه‌سازی (در این حالت $n = 100$) است. جدول (۵-۵) شاخص عملکرد دو الگوریتم Conventional و DRMPC را به ازای سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۵-۵ شاخص عملکرد دو روش کنترلی

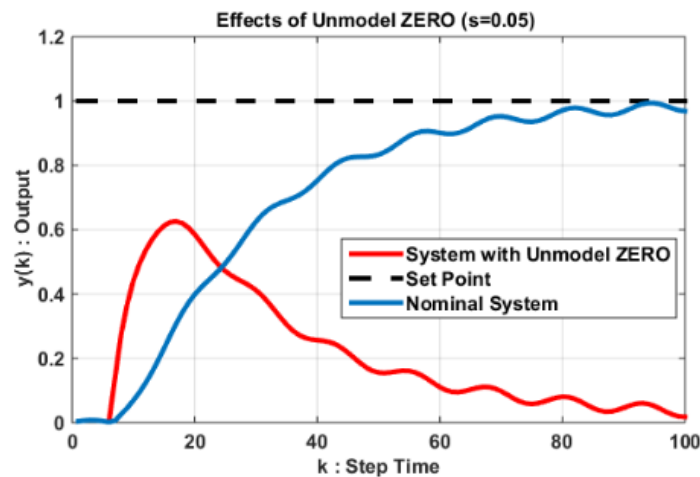
<i>DRMPC with Time-Varying Disturbance in Scenario II</i>	<i>NRMPC with Time-Varying Disturbance in Scenario II</i>	<i>DRMPC with Time-Varying Disturbance in Scenario I</i>	<i>NRMPC with Time-Varying Disturbance in Scenario I</i>	
0.2671	0.3342	0.1898	0.1925	E_{perf1}
0.32	0.47	0.26	0.29	E_{perf2}
71	-	53.5	53	$t_{settling\ time}(s)$
12	26	2	4	%Overshoot

۵-۳-۳- نتایج شبیه‌سازی به ازای دینامیک‌های مدل نشده

به منظور بررسی بیشتر اثربخشی الگوریتم توسعه یافته DRMPC، در این بخش نتایج حاصل از اعمال این الگوریتم به سیستم شامل پارامترهای مدل نشده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین الگوریتم توسعه یافته به سیستمی با تاخیر زمانی نامعین ثابت – کراندار، اغتشاش ورودی و پارامترهای مدل نشده اعمال می‌شود. شکل‌های (۵-۱۵) و (۵-۱۶) به ترتیب پاسخ پله سیستم کنترل حلقه بسته ناشی از اعمال الگوریتم DRMPC به فرآیند سطح شامل بهره مدل نشده و صفر مدل نشده را نشان می‌دهد.

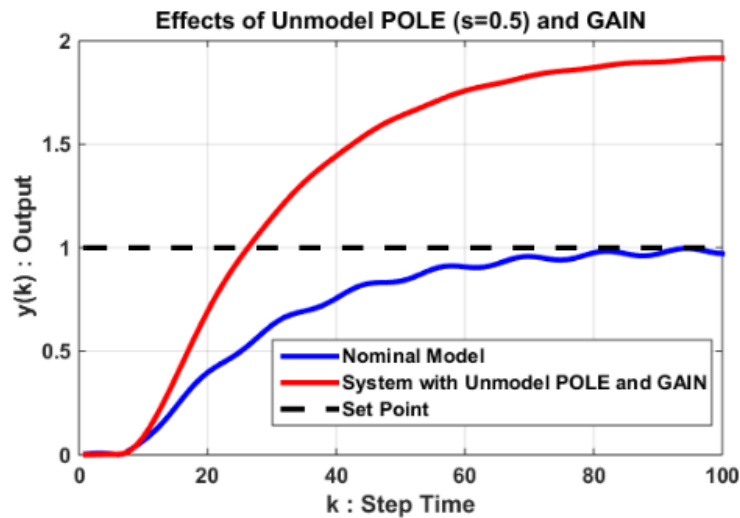


شکل ۵-۱۵ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با جبران‌ساز $DRMPC$ به دینامیک بهره مدل نشده

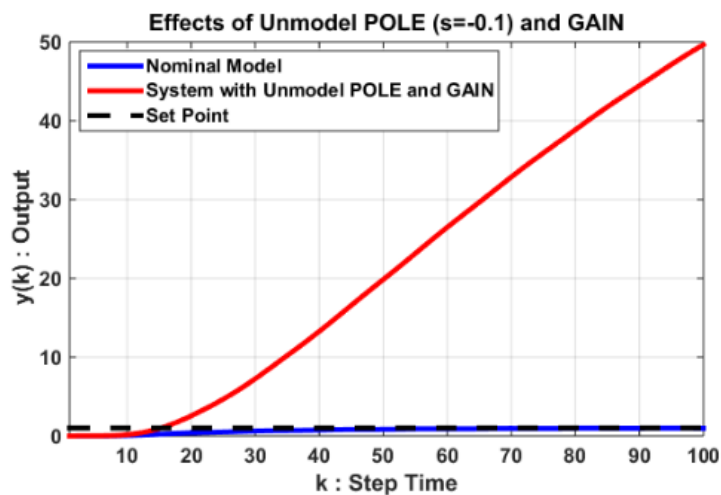


شکل ۵-۱۶ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با جبران‌ساز $DRMPC$ به دینامیک صفر مدل نشده

همانطور که از شکل‌های (۵-۱۵) و (۵-۱۶) مشخص است، به ازای وجود پارامترهای مدل نشده در سیستم، عملکرد سیستم حلقه بسته به ازای ورودی اغتشاش به شدت تضعیف می‌شود. شکل‌های (۵-۱۷) و (۵-۱۸) به ترتیب پاسخ پله سیستم کنترل حلقه بسته ناشی از اعمال الگوریتم $DRMPC$ به فرآیند سطح شامل بهره و قطب‌های مدل نشده را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۷ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با جبران‌ساز $DRMPC$ به ازای بهره و قطب مدل نشده در $s = 0.5$



شکل ۵-۱۸ پاسخ پله سیستم حلقه بسته با جبران‌ساز $DRMPC$ به ازای بهره و قطب مدل نشده در $s = 0.1$

همانطور که از شکل‌های (۵-۱۷) و (۵-۱۸) مشخص است، به ازای وجود قطب مدل نشده در سیستم، به ویژه قطب نزدیک به مبدا، نه تنها عملکرد سیستم حلقه بسته به شدت تضعیف می‌شود بلکه سیستم حلقه بسته با الگوریتم $DRMPC$ ، ناپایدار نیز می‌شود.

۵-۴- نتیجه‌گیری

در این فصل و در بخش ۱ نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال جبران‌ساز تاخیر زمانی طراحی شده در فصل (۴) به سیستم‌هایی با مدل معین و نامعین ارائه شد. نشان داده شد که الگوریتم مرسوم پیش‌بین مدل

مقاوم (NRMPC) در مقایسه با الگوریتم IRMPC از عملکرد ضعیف‌تری برخوردار است و به ازای مقادیر بزرگ‌تر تاخیر زمانی، استفاده از روش NRMPC حتی می‌تواند منجر به ناپایداری سیستم حلقه بسته شود.

همچنین در بخش ۲ نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال جبران‌ساز تاخیر زمانی طراحی شده در فصل (۴) به سیستم‌های با ورودی اغتشاش ثابت و متغیر با زمان و با دامنه کوچک و بزرگ، ارائه شد. نشان داده شد که الگوریتم ارائه شده با عنوان IRMPC در مقایسه با الگوریتم مرسوم با عنوان Conventional RMPC از عملکرد بهتری برخوردار است به ویژه زمانی که مدل اغتشاش از ثابت با زمان به متغیر با زمان تغییر می‌یابد و دامنه اغتشاش افزایش می‌یابد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این رساله، در فصل (۲) انواع روش‌های مورد استفاده در جبرانسازی تاخیرهای زمانی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. سپس از میان این روش‌ها، استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین مدل مورد بحث و بررسی دقیقتر قرار گرفت. سیر تکامل الگوریتم‌های پیش‌بین مدل و لزوم در نظر گرفتن عدم قطعیت تاخیرهای زمانی به صورت صریح در طراحی جبرانساز منجر به ارائه الگوریتم جدیدی تحت عنوان کنترل‌کننده پیش‌بین مدل مقاوم با عنوان RMPC در [۴۱] شد. پس از بحث و بررسی در رابطه با انواع روش‌های جبرانسازی تاخیرهای زمانی مبتنی بر کنترل پیش‌بین، روشی توسعه یافته مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل مقاوم به منظور جبرانسازی تاخیرهای زمانی نامعین ثابت - کراندار، ارائه شد. با توجه به اینکه الگوریتم‌های مرسوم RMPC، در مواجهه با مسائل دیگری در سیستم‌های کنترل همچون عدم قطعیت در مدل کارآمد نبود، الگوریتم RMPC اصلاح و توسعه یافت به گونه‌ای که بتواند همزمان مساله عدم قطعیت در مدل و تاخیر زمانی را حل کند. اساس الگوریتم توسعه یافته، بر پایه توصیف جدیدی از مدل سیستم مبتنی بر چندضلعی‌های عدم قطعیت بود. به صورت تحلیلی نشان داده شد که جبرانساز فیدبک حالتی که از حل مساله بهینه‌سازی با الگوریتم توسعه یافته به دست می‌آید، پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در فصل ۵، نتایج تحلیلی حاصل از تئوری ارائه شده در فصل (۴) را تصدیق نمود. نشان داده شد که، جبرانساز توسعه یافته چگونه در مقایسه با جبرانساز مرسوم در مواجهه با سیستم‌هایی که هم از عدم قطعیت در مدل و هم از تاخیر زمانی نامعین، رنج می‌برند، موثرتر است و پایداری سیستم حلقه بسته را تضمین می‌نماید.

همچنین در قسمت دوم از این تحقیق، الگوریتم RMPC مرسوم، به منظور جبرانسازی همزمان تاخیرهای زمانی نامعین ثابت - کراندار و تضعیف ورودی‌های اغتشاش، بهبود یافت. نشان داده شد که الگوریتم بهبود یافته، پایداری سیستم حلقه بسته را در حضور اغتشاش و تاخیر زمانی نامعین تضمین می‌کند. اکنون و در پایان این رساله دو روش جدید در اختیار محققین است، تا با استفاده از آنها (۱) مساله حضور همزمان عدم قطعیت مدل و تاخیر زمانی ناشی از شبکه را در سیستم‌های کنترل تحت شبکه (NCS) حل نمایند و (۲) مساله تاخیرهای زمانی در سیستم‌هایی با ورودی اغتشاش را برطرف نماید.

۶-۲- پیشنهادات

در خصوص موضوع مورد بحث در این رساله، پیشنهاداتی به شرح ذیل می‌توان در نظر گرفت که زمینه‌ای برای تکمیل و ادامه تحقیقات در این زمینه می‌باشد.

- توسعه الگوریتم‌های ارائه شده در رساله به منظور جبران‌سازی پدیده از دست رفتن داده‌ها^۱ در سیستم‌های کنترل تحت شبکه در حضور عدم قطعیت مدل و تاخیرهای زمانی.
- توسعه روش‌های آنلاین محاسبه بهره فیدبک حالت RMPC به منظور پیاده‌سازی الگوریتم-های ارائه شده در سیستم‌های واقعی

¹ Packet Dropout (Loss)

- [1] X. M. Zhang, Q. L. Han, and X. Yu, "Survey on Recent Advances in Networked Control Systems," *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol. 12, Issue. 5, pp. 1740-1752, Oct. 2016.
- [2] Q. Li, J. Jiang and D.J. Rankin, "Evaluation of Delays Induced by Profibus PA Networks," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 8, pp. 2910-2917, Aug. 2011.
- [3] Q. Li, D. J. Rankin, and J. Jiang, "Evaluation of delays induced by foundation fieldbus H1 networks," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 10, pp. 3684–3692, Oct. 2009.
- [4] G. P. Liu, J. X. Mu, D. Rees, and S. C. Chai, "Design and stability analysis of networked control systems with random communication time delay using the modified MPC," *International Journal of Control*, vol. 79, no. 4, pp. 288–297, Apr. 2006.
- [5] X. Yu, and J. Jiang, "Analysis and Compensation of Delays in FF H1 Fieldbus Control Loop Using Model Predictive Control" *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol. 63, No. 10, pp. 2434-2446, Oct. 2014.
- [6] L. D. Vito, S. Rapuano, and L. Tomaciello, "One-way delay measurement: State of the art," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 12, pp. 2742–2750, Dec. 2008.
- [7] P. Castello, P. Ferrari, A. Flammini, C. Muscas, P. A. Pegoraro, and S. Rinaldi "A Distributed PMU for Electrical Substations With Wireless Redundant Process Bus" *IEEE Trans. Instrum. Meas.*
- [8] Z. H. Pang, G. P. Liu, D. Zhou, and D. Sun "Data-Based Predictive Control for Networked Nonlinear Systems With Network-Induced Delay and Packet Dropout" *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 2, Feb 2016.
- [9] Q. Li, J. Jiang "Evaluation of Foundation Fieldbus H1 Networks for Steam Generator Level Control" *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 19, No.5, Sep 2011.
- [10] G. P. Liu, J. X. Mu, D. Rees, and S. C. Chai, "Design and stability analysis of networked control systems with random communication time delay using the modified MPC," *Int. J. Control*, vol. 79, no. 4, pp. 288–297, Apr. 2006.
- [11] G. P. Liu, Y. Xia, D. Rees, and W. Hu, "Design and stability criteria of networked predictive control systems with random network delay in the feedback channel," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 37, no. 2, pp. 173–184, Mar. 2007.
- [12] S. Chai, G. P. Liu, D. Rees, and Y. Xia, "Design and practical implementation of internet-based predictive control of a servo system," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 158–168, Jan. 2008.

- [13] W. S. Hu, G. P. Liu, and D. Rees, "Networked predictive control over the internet using round-trip delay measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 10, pp. 2231–2241, Oct. 2008.
- [14] R. Wang, G. P. Liu, W. Wang, D. Rees, and Y. B. Zhao, "Guaranteed cost control for networked control systems based on an improved predictive control method," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 18, no. 5, pp. 1226–1232, Sep. 2010.
- [15] A. Onat, T. Naskali, E. Parlakay, and O. Mutluer, "Control over imperfect networks: Model-based predictive networked control systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 3, pp. 300–309, Mar. 2011.
- [16] K. C. Lee, S. Lee, and M. H. Lee, "Worst case communication delay of real-time industrial switched ethernet with multiple levels," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1669–1676, Oct. 2006.
- [17] S. H. Hong and S. M. Song, "Transmission of a scheduled message using a foundation fieldbus protocol," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 7, no. 2, pp. 268–275, Feb. 2008.
- [18] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, "A survey of recent results in networked control systems," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 138–162, Jan. 2007.
- [19] G. C. Walsh, O. Beldiman, and L. G. Bushnell, "Asymptotic behavior of nonlinear Networked control systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 46, no. 7, pp. 1093–1097, Jul. 2001.
- [20] G. C. Walsh, H. Ye, and L. Bushnell, "Stability analysis of networked control systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 438–446, May 2002.
- [21] L. A. Montestruque and P. J. Antsaklis, "Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1562–1572, Sep. 2004.
- [22] D. Nesic and A. R. Teel, "Input-to-state stability of networked control systems," *Automatica*, vol. 40, no. 12, pp. 2121–2128, Dec. 2004.
- [23] D. Nesic and A. R. Teel, "Input-output stability properties of networked control systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, no. 10, pp. 1650–1667, Oct. 2004.
- [24] Y. Zheng, S. Li, and N. Li, "Distributed model predictive control over network information exchange for large-scale systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 19, no. 7, pp. 717–724, Jul. 2011.
- [25] F. Kazempour and J. Ghaisari, "Stability analysis of model-based networked distributed control systems," *J. Process Control*, vol. 23, no. 3, pp. 444–452, Mar. 2013.

- [26] D. S. Kim, Y. S. Lee, W. H. Kwon, and H. S. Park, "Maximum allowable delay bounds of networked control systems," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, no. 11, pp. 1301–1313, Nov. 2003.
- [27] P. V. Zhivoglyadov and R. H. Middleton, "Networked control design for linear systems," *Automatica*, vol. 39, no. 4, pp. 743–750, Apr. 2003.
- [28] S. Seiler and R. Sengupta, "An H_∞ approach to networked control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 50, no. 3, pp. 356–364, Mar. 2005.
- [29] D. Yue, Q. L. Han, and J. Lam, "Network-based H_∞ robust control of systems with uncertainty," *Automatica*, vol. 41, no. 6, pp. 999–1007, Jun. 2005.
- [30] H. Gao and T. Chen, "Network-based H_∞ output tracking control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 53, no. 3, pp. 655–667, Apr. 2008.
- [31] C. L. Lin, C. H. Chen, and H. C. Huang, "Stabilizing control of networks with uncertain time varying communication delays," *Control Eng. Pract.*, vol. 16, no. 1, pp. 56–66, Jan. 2008.
- [32] J. Li, Q. Zhang, H. Yu, and M. Cai, "Real-time guaranteed cost control of MIMO networked control systems with packet disordering," *J. Process Control*, vol. 21, no. 6, pp. 967–975, Jun. 2011.
- [33] T.C. Yang, "Networked Control System: a brief survey" *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, Vol. 153, No. 4, July 2006.
- [34] Z.H. Pang, G. P. Liu, D. Zhou, D. Sun, "Input Design-Based Compensation Control for Networked Nonlinear Systems With Random Delays and Packet Dropouts," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Vol. 64, Issue 3, 2017.
- [35] Z.H. Pang, G. P. Liu, "Design and Performance Analysis of Incremental Networked Predictive Control Systems," *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 46, Issue 6, 2016.
- [36] O. Mirabella, M. Brischetto, "A Hybrid Wired/Wireless Networking Infrastructure for Greenhouse Management," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, Issue 2, 2011.
- [37] H. Gao, X. Meng, T. Chen, "Stabilization of Networked Control Systems With a New Delay Characterization," *IEEE Transactions On Automatic Control*, Vol. 53, NO. 9, OCTOBER 2008.
- [38] Z. Zhou, Y. Liu, "Time Delay Compensation-based Fast Current Controller for Active Power Filters," *IET Power Electronics*, Vol. 5, Iss. 7, pp. 1164, 2012.

- [39] K. Natori, T. Tsuji, K. Ohnishi, A. Haze, K. Jezernik, "Time-Delay Compensation by Communication Disturbance Observer for Bilateral Teleoperation Under Time-Varying Delay," *Ieee Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 57, NO. 3, March 2010.
- [40] T.Sauter, "The Three Generations of Field - Level Networks – Evolution and Compatibility Issues" *IEEE Trans.Industrial Electronics*, Vol. 57, No.11, PP. 3585-3595, Nov. 2010.
- [41] Kothare, M.V., V. Balakrishnan, and M. Morari, Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 1996. 32(10): p. 1361-1379.
- [42] G.Huang and S.Wang, (2009). Use of uncertainty polytope to describe constraint processes with uncertain time-delay for robust model predictive control applications. *ISA transactions*, 48(4), 503-511.
- [43] A. Elahi and A. Alfi, Finite-time h_∞ control of uncertain networked control systems with randomly varying communication delays, *ISA transactions* **69** (2017), 65-88
- [44] B. C. Ding, Y. Xi, M. T. Cychowski, and T. O. Mahony, "A synthesis approach for output feedback robust constrained model predictive control," *Automatica*, vol. 44, pp. 258-264, January 2008.

Abstract

In this thesis, analysis and compensation of time delays in networked control systems is considered. The research framework consists of two stages. The first stage is dedicated to the analysis and modeling of time delay in networked control loops in which, the time delay is modeled as constant-bounded and its higher and lower bounds are obtained. In the second stage, the appropriate compensator is designed based on the results of the first stage. For analysis and modeling of time delays, the networked control systems are considered that specifically use Profibus and Fieldbus networks. The compensation method used in this research is based on the robust model predictive control. The proposed compensation algorithm is developed in such a way that includes the model uncertainty too. It will be proved that the proposed algorithm ensures the stability of the system in the presence of model uncertainty and constant-bounded time delays. Furthermore, in order to compensate time delay and attenuate disturbance, the robust model predictive control algorithm is developed for systems including time delay and input disturbance. The simulation results will show that the proposed algorithm is effective in simultaneously compensation of constant-bounded time delays and model uncertainty. Also, the simulation results for systems with disturbance input, will show that the developed algorithm can reject disturbance.

Keywords: Time Delay, Model Predictive Control, Linear Matrix Inequalities, Uncertainty Polytopic



Kharazmi International Campus

Ph.D. Thesis in Control Engineering

Analysis and Compensation of Bounded-Constant Delay Times
in Networked Control Systems (NCSs) Using Robust Predictive Method

By: Farshid pour Alizadeh Moghadam

Supervisor:

Dr. Hossein Gholizade-Narm

October 2020