بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–کنترل

بررسی پایداری سیستم‌های کلیدزنی با تأخیر ورودی، با استفاده از نظریه تلف‌کنندگی

توسط:

علیرضا برزگر

استاد راهنما:

دکتر علی خاکی صدیق

زمستان ۹۱

تقدیم به

خانواده عزیزم

تشکر و قدردانی

جای دارد از زحمات استاد ارجمندم، دکتر علی خاکی صدیق، که با راهنمایی‌ها و حمایت‌های خویش این‌جانب را در پیمودن این راه کمک کردند، سپاسگزاری کنم. از جناب آقایان دکتر حمیدرضا مؤمنی و دکتر بابک توسلی که قبول دعوت نموده و داوری این پایان‌نامه را پذیرفتند، کمال تشکر را دارم.

از سرکار خانم مهندس لیلا رجب‌پور که با تلاش فراوان این‌جانب را در انجام این پایان‌نامه یاری فرموده و در نگارش و ویرایش متن این پایان‌نامه نقش چشمگیری داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

همچنین از دوستان و دانشجویان آزمایشگاه کنترل پیشرفته که محیطی مناسب را جهت انجام پژوهش‌های علمی فراهم آوردند، تشکر می‌کنم. در نهایت از زحمات دلسوزانه خانواده‌ام، خصوصاً پدر و مادر عزیزم، که همواره دعای خیرشان بدرقه راهم بوده تقدیر نموده و مراتب سپاس خود را تقدیم حضورشان می‌کنم.

چکیده

سیستم‌های واقعی بسیاری قابل مدلسازی بصورت یک سیستم کلیدزنی هستند. بنابراین تحلیل پایداری آنها ضروری و پر اهمیت است، که در اینجا با دیدگاه ورودی-خروجی به بررسی این مسئله پرداخته می‌شود. بر اساس تئوری تلف‌کنندگی، پایداری سیستم‌های کلیدزنی تحت شرایطی که عبارت تأخیر ورودی دارند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شرایط پسیو بودن این سیستم‌ها مطرح گردیده و این شرایط برای سیستم‌های با زیرسیستم خطی، بصورت نامساوی‌های ماتریسی ارائه می‌شوند. پایداری مجانبی سیستم‌های کلیدزنی با تأخیر ورودی که شرایط پسیو بودن را برآورده کنند، تحت فیدبک خروجی در قالب یک قضیه ارائه و اثبات می‌گردد. در نهایت اتصال فیدبکی دو سیستم کلیدزنی مطرح گردیده و شرایط پسیو بودن سیستم کلی حاصل از این اتصال مورد بحث و اثبات قرار می‌گیرد.

کلید واژه: سیستم کلیدزنی، پایداری ورودی-خروجی، تلف‌کنندگی، عبارت تأخیر ورودی.

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل ۱- مقدمه	**۱**
۱-۱- پیشگفتار	۱
۱-۲- سیستم‌های کلیدزنی و اهمیت آنها	۱
۱-۳- تحلیل پایداری سیستم‌های کلیدزنی	۳
۱-۳-۱- بررسی روش‌های تحلیل پایداری سیستم‌های کلیدزنی	۴
۱-۳-۱-۱- پایداری تحت کلیدزنی دلخواه	۴
۱-۳-۱-۲- پایداری تحت کلیدزنی مقید	۶
۱-۴- پایداری ورودی کراندار-خروجی کراندار	۶
۱-۵- پدیده‌ی تأخیر	۸
۱-۶- روند پایان‌نامه	۹
فصل ۲- مطالب زمینه‌ای	**۱۱**
۲-۱- سیستم‌های هیبریدی و سیستم‌های کلیدزنی	۱۱
۲-۱-۱- طبقه‌بندی سیستم‌های کلیدزنی	۱۲
۲-۱-۱-۱- کلیدزنی وابسته به حالت	۱۲
۲-۱-۱-۲- کلیدزنی وابسته به زمان	۱۴
۲-۱-۲- پاسخ‌های سیستم‌های کلیدزنی	۱۵
۲-۱-۲-۱- معادلات دیفرانسیل معمولی	۱۵
۲-۱-۳- کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری سیستم‌های کلیدزنی	۱۶
۲-۲- پایداری سیستم‌های کلیدزنی	۱۷
۲-۳- پایداری ورودی کراندار-خروجی کراندار	۱۸
۲-۳-۱- تعاریف و مفاهیم اولیه	۲۰
۲-۳-۲- نظریه تلف‌کنندگی	۲۱
۲-۳-۲-۱- غیرفعال بودن	۲۳
۲-۳-۲-۲- بهره‌ی L_2	۲۳
۲-۴- سیستم‌های کلیدزنی تأخیردار	۲۴

فصل ۳- پایداری سیستم‌های کلیدزنی برپایه نظریه تلف‌کنندگی **۲۵**
۳-۱- "مفهوم عدم فعالیت یا پسیویتی برای سیستم‌های پیوندی" ۲۵
۳-۲- "مفهوم پسیویتی برای سیستم‌های کلیدزنی با کلیدزنی وابسته به حالت" ۲۷
۳-۳- "نظریه تلف‌کنندگی برای سیستم‌های کلیدزنی" ۳۱
۳-۳-۱- غیرفعال بودن یا پسیویتی ۳۴
۳-۳-۲- بهره‌ی L_2 ۳۵
فصل ۴- پایداری سیستم‌های کلیدزنی با ترم تأخیر ورودی بر مبنای نظریه تلف-کنندگی **۳۷**
۴-۱- مقدمات و مدل سیستم ۳۷
۴-۲- تلف‌کنندگی ۳۹
۴-۳- غیرفعال بودن یا پسیویتی ۴۱
۴-۴- پایداری تحت فیدبک خروجی ۴۳
۴-۵- اتصال فیدبکی ۴۷
فصل ۵- نتایج شبیه‌سازی **۵۳**
فصل ۶- نتایج و پیشنهادات **۶۳**
فهرست مراجع **۶۵**
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی **۶۹**
واژه‌نامه انگلیسی به فارسی **۷۳**

فهرست شکل‌ها

عنوان	شماره صفحه
شکل ۱-۱. اتومبیل در کویر	۳
شکل ۲-۱. نمایش یک سیستم هیبریدی	۱۱
شکل ۲-۲. کلیدزنی وابسته به حالت	۱۳
شکل ۲-۳. یک سیگنال کلیدزنی	۱۴
شکل ۲-۴. ساختار چند-کنترل‌کننده‌ای با سرپرستی	۱۷
شکل ۲-۵. پاسخ های ممکن ناشی از کلیدزنی	۱۸
شکل ۲-۶. آهنگ تغذیه	۲۲
شکل ۳-۱. اتصال فیدبکی دو سیستم هیبریدی	۲۷
شکل ۴-۱. اتصال فیدبکی دو سیستم کلیدزنی	۴۸
شکل ۵-۱. خروجی سیستم کلیدزنی برای شرایط اولیه $[1\ \ 1]^T$، تحت فیدبک خروجی	۵۵
شکل ۵-۲. خروجی سیستم کلیدزنی تحت فیدبک خروجی برای ورودی مرجع پله واحد	۵۴
شکل ۵-۳. سیستم کلیدزنی تحت فیدبک حالت کلیدزنی و پیش‌جبرانساز استاتیکی	۵۵
شکل ۵-۴. خروجی سیستم کلیدزنی تحت فیدبک حالت و پیش‌جبرانساز استاتیکی برای ورودی مرجع پله واحد	۵۵
شکل ۵-۵. خروجی سیستم کلیدزنی تحت فیدبک خروجی و کنترل‌کننده PID برای ورودی مرجع پله واحد	۵۶
شکل ۵-۶. خروجی سیستم کلیدزنی برای شرایط اولیه $[2\ \ 2]^T$، تحت فیدبک خروجی	۵۷
شکل ۵-۷. خروجی سیستم کلیدزنی تحت فیدبک خروجی برای ورودی مرجع پله واحد	۵۷
شکل ۵-۸. خروجی سیستم کلیدزنی تحت فیدبک حالت و پیش‌جبرانساز استاتیکی برای ورودی مرجع پله واحد	۵۸
شکل ۵-۹. خروجی سیستم کلیدزنی برای شرایط اولیه $[1\ \ -1]^T$، تحت فیدبک خروجی	۵۹
شکل ۵-۱۰. خروجی سیستم کلیدزنی تحت فیدبک خروجی برای ورودی مرجع پله واحد	۶۰
شکل ۵-۱۱. خروجی سیستم کلیدزنی تحت فیدبک حالت و پیش‌جبرانساز استاتیکی برای ورودی مرجع پله واحد	۶۰
شکل ۵-۱۲. خروجی سیستم کلیدزنی تحت فیدبک خروجی و کنترل‌کننده PID برای ورودی مرجع پله واحد	۶۱

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
فضای خطی L	L
فضای گسترش یافته	L_e
نرم القایی	$\| \quad \|$
تابع ذخیره انرژی	$S(x(t))$
نرخ تغذیه	ω_i^i
نرخ تغذیه متقابل	ω_i^j
کلیدزنی وابسته به زمان	Σ_t
مشتق لی S بر روی f	$L_f S$

۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

در سه دهه‌ی گذشته پیشرفت در قدرت محاسبات منجر به این شد که تحلیل و پیاده‌سازی سیستم‌های دینامیکی پیچیده[1] افزایش یابد. دسته‌ای از سیستم‌های دینامیکی که سیستم‌های واقعی و عملی بسیاری را شامل می‌شوند، سیستم‌های هیبریدی یا پیوندی[2] نامیده می‌شود، که شامل یک ارتباط، اتصال و تداخل بین دینامیک‌های پیوسته در زمان و رویدادهای گسسته در زمان است. برای بررسی رفتار هیبریدی می‌توان به چند مثال اشاره کرد: یک شیر کنترل یا سوییچ قدرت که باز یا بسته می‌شود، ترموستاتی که گرما را روشن و خاموش می‌کند، سلول‌های زنده که رشد می‌کنند و تقسیسم می‌شوند، هواپیمایی که به یک حوزه هوایی وارد می‌شود، در آن پرواز می‌کند و از آن خارج می‌شود و ... . مسائل کنترلی که می‌توانند به این صورت بیان شوند صنایع مختلفی را شامل می‌شوند: کنترل اجسام پرنده [۱،۲]، کنترل ترافیک [۳-۵]، کنترل وسایل نقلیه [۶،۷]، و سیستم های قدرت [۸،۹]. به درستی می‌توان گفت هم‌اکنون نظریه سیستم‌های هیبریدی یک زمینه تحقیقاتی قوی را با ترکیب و نوآوری از علوم مختلف مانند: مهندسی، ریاضیات و علوم کامپیوتر پیش روی محققان قرار داده است.

۱–۲– سیستم های کلیدزنی و اهمیت آن‌ها

در این پایان‌نامه یک کلاس خاص و مهم از سیستم‌های هیبریدی تحت عنوان سیستم‌های کلیدزنی[3] مدّ نظر است. در این حالت سیستم‌های زمان-پیوسته رابه همراه رویدادهای کلیدزنی گسسته مورد بررسی قرار می‌گیرند، بدین صورت که دینامیک‌های پیوسته در زمان سیستم کلیدزنی بوسیله مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی تغییرناپذیر در زمان، که متغیر حالت‌های یکسانی را در بر می‌گیرند، توصیف می‌شود. دینامیک-های گسسته نیز بوسیله منطق خاص درونی یا توسط واحد کلیدزنی خارجی مشخص می‌شوند که معادلات دینامیک‌های پیوسته در زمان را در هر بازه‌ی زمانی تعیین می‌کنند.

1- Complex Dynamic Systems
2- Hybrid Systems
3- Switched Systems

سیستم‌های کلیدزنی به چندین دلیل قابل توجه و بررسی هستند از جمله:

۱- فرآیندهای کلیدزنی[1]: شاید واضح‌ترین دلیل استفاده و توسعه نظریه‌های سیستم‌های کلیدزنی همین باشد که خود فرآیند و سیستم موردنظر ذاتاً چند-مدلی[2] است، به گونه‌ای که دینامیک‌های آن در طول زمان تغییر می‌کند.

۲- اهداف کنترلی چندگانه[3]: حتی اگر سیستم تحت کنترل خودش رفتار کلیدزنی نداشته باشد، کنترل‌کننده‌های کلیدزنی می‌توانند به منظور برآورده ساختن اهداف کنترلی چندگانه مورد استفاده قرار بگیرند. این مسئله زمانی اهمیت پیدا می‌کند که فرآیند موردنظر با تغییر محیط کار و اغتشاش مواجه شود. یک مثال خوب برای این گونه مسائل، کنترل توربین بادی است [۱۰].

۳- کارایی و محدودیت‌ها[4]: طراحی کنترل‌کننده‌ها عموماً یک مصالحه بین چندین هدف شامل: سرعت پاسخ[5]، فراجهش[6]، قوام[7]، ردّ اغتشاش[8]، محدودیت‌های کنترلی و محدودیت‌های حالت‌های سیستم[9] است. بعضی از محدودیت‌های کنترل‌کننده‌های کلاسیک خطی و غیرخطی بوسیله کلیدزنی مناسب بین کنترل-کننده‌هایی، که برای هدف خاصی طراحی شده‌اند، قابل رفع و غلبه هستند. مثال‌هایی در [۱۱،۱۲] آمده است. بطور مثال عملکرد یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی[10] با غیرفعال کردن بخش انتگرالی زمانی که خطا زیاد است، قابل بهبود است.

۴- کنترل تطبیقی[11]: برای فرآیندهایی که با عدم قطعیت و تغییر زیاد اغتشاش مواجه هستند، کنترل-کننده‌های تطبیقی می‌توانند به سیستم برای شرایط کار متغیر اعمال شوند. سیستم‌های کلیدزنی نیز می-توانند در این بخش وارد عمل شوند [۵۸]، بدین صورت که فرایند را بصورت یک فرآیند تطبیقی چند-مدلی در نظر گرفت و برای هر مدل در بازه‌ای که تغییرات آن کم باشد از یک کنترل‌کننده‌ی تطبیقی متناسب با آن استفاده کرد، که پارامترهایش تغییرات کمی خواهند داشت [۱۳،۱۴] و زمانی که شرایط بطور ناگهانی تغییر کند، مدلی انتخاب می‌شود که مناسب‌ترین مدل برای توصیف شرایط موجود باشد و به تناسب آن

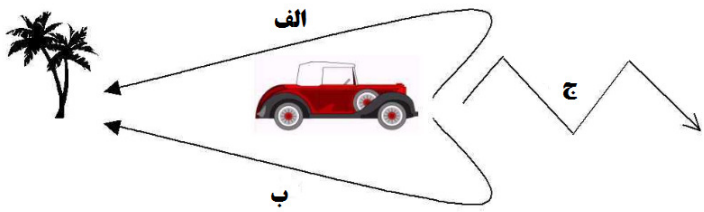
1- Switching Process
2- Multi-Model
3- Multiple Control Objectives
4- Performance and Constraints
5- Response speed
6- Overshoot
7- Robustness
8- Disturbance Attenuation
9- Control and State Constraints
10- Proportional-Integral Controller
11- Adaptive Control

بهترین کنترل‌کننده از بین کنترل‌کننده‌های تطبیقی موجود انتخاب می‌گردد. این راهکار باعث افزایش سرعت تطابق نسبت به کنترل‌کننده‌های تطبیقی تک-مدلی می‌شود.

۱-۳- تحلیل پایداری[1] سیستم‌های کلیدزنی

اگرچه بدون تردید کاربرد و مزایای سیستم‌های کلیدزنی غیر قابل چشم‌پوشی است، اما تحلیل پایداری سیستم حلقه بسته‌ی حاصل به هیچ وجه ساده و ابتدایی نیست. در اولین و ساده‌ترین نگاه ممکن است چنین فرض شود که یک سیستم کلیدزنی تنها ویژگی‌های زیرسیستم‌هایی که شامل می‌شود را از خود نشان می‌دهد، اما نشان دادن اشتباه بودن این نتیجه‌گیری کار دشواری نیست، بطور مثال [۱۵،۱۶]. در واقع کلیدزنی بین عناصر سیستم یک محدوده‌ی گسترده از رفتارهای دینامیکی را بروز می‌دهد که نمی‌توان در هیچ کدام از عناصر سیستم مشاهده کرد.

برای سادگی می‌توان مثال زیر را بیان کرد. این مثال تحت عنوان "اتومبیل در کویر" از [۱۷] آورده شده است.



شکل ۱-۱. اتومبیل در کویر

فرض کنید که راننده و ماشین در بیابان قرار دارند، برای رسیدن به آبادی دو مسیر "الف" و "ب" وجود دارند که هر دوی آنها منجر به نجات راننده می‌گردد (پایدار[2]). حال فرض کنیم راننده ابتدا مسیر "الف" را انتخاب کند و پس از اندک زمانی تغییر نظر داده و مسیر "ب" را برگزیند و همین روند را ادامه دهد. احتمال دارد که در نهایت راننده مسیر "ج" را طی کند که منجر به عدم نجات وی و دور شدن از آبادی می‌شود (ناپایدار[3]). همانطور که ملاحظه شد اگرچه تک تک مسیرها پایدار هستند اما امکان دارد مسیر کلی ناشی از کلیدزنی، ناپایدار باشد.

1- Stability Analysis
2- Stable
3- Unstable

۱-۳-۱- بررسی روش‌های تحلیل پایداری سیستم‌های کلیدزنی

پایداری سیستم حلقه بسته را می‌توان جزو مهمترین اهداف کنترلی برشمرد. مشخص است که طراحی کنترلی مناسب زمانی قابل پیشرفت است که ویژگی‌های پایداری سیستم کاملاً درک شده باشد.

تحلیل سیستم‌های کلیدزنی در دو دهه‌ی گذشته از سوی محققان بسیاری مورد توجه قرار گرفته است. بیشتر نتایج ارائه شده بر پایه‌ی پایداری لیاپانف[1] است که در سده‌ی گذشته نقش عمده‌ای را در تحلیل پایداری سیستم‌های دینامیکی داشته است.

۱-۳-۱-۱- پایداری تحت کلیدزنی دلخواه[2]

نظریه لیاپانف، با شرط اینکه یک تابع با ویژگی‌های معین، معروف به تابع لیاپانف[3]، برای سیستم پیدا شود، پایداری سیستم دینامیکی را تضمین می‌کند. ضروری‌ترین و مهم‌ترین بخش نظریه لیاپانف پیدا کردن تابع لیاپانف است. در هر حال وجود تابع لیاپانف برای پایداری مجانبی سیستم‌ها لازم و کافی است. در مورد سیستم‌های کلیدزنی بحث و تحلیل راجع به پایداری پیچیده‌تر و سخت‌تر می‌گردد زیرا وجود یک تابع لیاپانف برای هر کدام از زیرسیستم‌ها و عناصر، برای تضمین پایداری سیستم کلیدزنی کلی، کافی نیست. اما این امر مشخص شده است که سیستم کلیدزنی پایدار است، اگر تابع لیاپانف مشترکی وجود داشته باشد که شرایط تئوری لیاپانف را بطور همزمان برای همه‌ی زیرسیستم‌ها برآورده کند. در این حالت می‌گوییم سیستم کلیدزنی برای هر کلیدزنی دلخواه پایدار است.

اخیراً چندین قضیه معکوس[4] ارائه شده است [۱۸-۲۰] که نشان می‌دهد چنین تابع مشترکی برای سیستم‌های کلیدزنی پایدار همواره وجود دارد. اگرچه باید گفت که شرایط عمومی برای وجود تابع لیاپانف مشترک برای همه‌ی سیستم‌های کلیدزنی ناشناخته است، بنابراین بیشتر نتایج در زمینه‌ی پایداری سیستم-های کلیدزنی مربوط به کلاس خاصی از این سیستم‌ها یا برای دسته‌ای خاص از توابع لیاپانف مشترک هستند.

1- Lyapunov Stability
2- Arbitrary Switching
3- Lyapunov Function
4- Converse Theorem

تقریباً می‌توان نتایج پایداری موجود برای کلیدزنی دلخواه را به دو دسته‌ی عددی و تحلیلی تقسیم‌بندی کرد. بیشتر نتایج، از تابع لیاپانف مشترک درجه دوم[1] (CQLF) برای دستیابی به پایداری استفاده می‌کنند. اغلب نتایج تحلیلی، بر اساس ویژگی‌های مقدار ویژه ماتریس سیستم‌ها فرمول‌بندی شده‌اند و قابل اعمال به سیستم‌هایی با زیرسیستم‌هایی هستند که ویژگی خاصی داشته باشند، مثلاً زیرسیستم‌ها مثلثی[2] باشند. بزرگترین عیب این روش‌ها محدود بودن آن‌ها به دسته‌ای خاص از سیستم‌ها است.

روش‌های عددی، برای وجود CQLF، قابل اعمال به دسته‌ای وسیع‌تر از سیستم‌ها هستند. بدین دلیل که مسئله‌ی CQLF قابل فرمول بندی به صورت نامساوی‌های ماتریسی خطی[3] است، که ابزار قدرتمندی برای حل آن‌ها توسط نرم‌افزارهای کامپیوتری ارائه شده است [۲۱].

همانطور که گفته شد در زمینه‌ی پایداری تحت کلیدزنی دلخواه که مبنای آن تابع لیاپانف مشترک است تلاش‌ها و تحقیقات بسیاری انجام شده است که بعضاً برای دسته‌ای خاص از سیستم‌ها ارائه شده‌اند. از جمله این کارها می‌توان به [۲۲،۲۳] اشاره کرد یا پیشنهادی که بر مبنای جبر لی[4] ارائه شده است [۲۴].

باید این نکته مهم را مدّ نظر داشت که وجود CQLF، فقط شرط کافی برای پایداری تحت کلیدزنی دلخواه است. می‌توان مثال‌هایی را بیان کرد که CQLF وجود ندارد اما سیستم تحت کلیدزنی دلخواه پایدار نمایی است [۲۵].

به دلیل محدودیت و سختی‌های CQLF، توجه به روش‌هایی که محافظه‌کاری کمتری را در پی دارند مورد توجه قرار گرفت و محققان به سراغ یک دسته از توابع لیاپانف، معروف به توابع لیاپانف درجه دوم کلیدزنی رفتند [۲۶،۲۷]. بطور مثال برای سیستم‌های کلیدزنی خطی، از آنجا که هرکدام از زیر سیستم‌های خطی پایدار هستند، برای هرکدام از آن‌ها تابع مثبت معین[5] $V_i(x) = x^T P_i x$ با P_i متقارن وجود دارد که رابطه لیاپانف را برای زیرسیستم i-ام برآورده کند.

1- Common Quadratic Lyapunov Function (CQLF)
2- Triangular ystem
3- Linear Matrix Inequalities
4- Lie Algebra
5- Positive Definite Function

در قدم بعدی، این ماتریس‌های P_i بر اساس سیگنال کلیدزنی به هم متصل شده و تابع لیاپانف کلی را برای سیستم می‌سازند. سپس پایداری تحت کلیدزنی دلخواه با برآورده شدن نامساوی‌های ماتریسی خاصی قابل دستیابی است.

۱-۳-۱-۲- پایداری تحت کلیدزنی مقید[1]

سیستم کلیدزنی ممکن است تحت کلیدزنی دلخواه ناپایدار گردد اما قابلیت این را داشته باشد که تحت کلیدزنی مقید و خاصی پایدار گردد.

مبنای این روش بدین گونه است که برای هر زیرسیستم یک تابع لیاپانف در نظر گرفته می‌شود و در زمان‌های کلیدزنی، تابع لیاپانف سیستم نیز کلید می‌خورد و تغییر می‌یابد. شرط لازم برای پایداری سیستم در این حالت این است که مقدار تابع لیاپانف j-ام در ابتدای بازه‌ی زمانی که زیرسیستم j-ام در حال کار است در طی زمان روند کاهشی داشته باشد.

با بررسی مثال‌های [۱۵،۲۸] که واگرایی، بین دو زیرسیستم پایدار رخ داده است، می‌توان چنین حدس زد که نامحدود شدن به دلیل ناتوانی در جذب انرژی ناشی از کلیدزنی رخ داده باشد. همچنین، بطور مثال اگر در بین زیرسیستم‌ها، یکی از آنها ناپایدار باشد و کلیدزنی به آن زیرسیستم برای مدت زیادی یا برای دفعات زیادی رخ دهد میتواند باعث ناپایداری شود. ساده‌ترین راه برای محدود کردن کلیدزنی، مشخص کردن یک بازه‌ی زمانی مشخص τ_d و محدود کردن سیگنال کلیدزنی به این مقدار باشد، بطوری که بازه‌های کلیدزنی از این مقدار کمتر نباشند. این زمان را اصطلاحاً "زمان سکون"[2] می‌گویند [۲۹-۳۱].

همانطور که گفته شد، در کلیدزنی مقید از توابع لیاپانف چندگانه[3] استفاده می‌شود. نتایجی در این زمینه را می‌توان در [۱۵،۲۸،۳۰] مشاهده کرد.

۱-۴- پایداری ورودی کراندار–خروجی کراندار[4]

سیستم‌ها را می‌توان از دو دیدگاه مورد بررسی قرار داد: یکی از دید درونی یا فضای حالت ودیگری از دید بیرونی یا ورودی–خروجی. همانطور که مطرح شد بررسی پایداری سیستم‌ها از دیدگاه فضای حالت با

1- Constraint Switching
2- Dwell Time
3- Multiple Lyapunov Functions
4- Bounded Input-Bounded Output

قضایای لیاپانف، لازال[1] و ... قابل بررسی است، اما بررسی از دیدگاه ورودی-خروجی نیز امکان‌پذیر است. این روش‌ها عمدتاً بر پایه‌ی نرم‌های ورودی-خروجی بنا شده‌اند.

یکی از قضایایی که بر اساس دیدگاه ورودی-خروجی پایداری سیستم‌ها بررسی می‌کند، نظریه تلف-کنندگی[2] است. این قضیه بر ایده‌ی اتلاف انرژی در [۳۲] بیان شده است و پس از آن توسط سایرین گسترش یافته است [۳۳،۳۴]. این نظریه در بررسی سیستم‌های پیچیده، خصوصاً در تحلیل پایداری آن‌ها، کاربرد چشمگیری داشته است.

تلف‌کنندگی به طور ساده بدین مفهوم است که افزایش انرژی ذخیره شده[3] در سیستم بیشتر از انرژی تغذیه شده[4] به سیستم نباشد. تئوری تلف‌کنندگی را می‌توان از دو جهت حائز اهمیت دانست: اول اینکه، توابع ذخیره انرژی که توسط تئوری تلف کنندگی معرفی می‌شوند، معمولاً کاندیدی برای توابع لیاپانف هستند، بنابراین در بسیاری از موارد مسئله پایداری و پایدارپذیری سیستم‌ها را حل می‌کند. از طرف دیگر، بر اساس این تئوری می‌توان پایداری سیستم‌های متصل به یکدیگر را نیز تحلیل و بررسی نمود، که در این زمینه می‌توان تئوری معروف و پر کاربرد بهره کوچک[5] را مثال زد [۳۵]. کتب و متون بسیاری هستند که بر روی موضوع تلف‌کنندگی و کنترل بر مبنای تلف‌کنندگی، مطالب و مثال‌هایی آورده‌اند از جمله [۳۶-۳۸].

همانطور که گفته شد سیستم‌های کلیدزنی به عنوان شاخه‌ای از سیستم‌های هیبریدی توجه خاصی را به خود جلب نموده‌اند و سیستم‌ها و فرایندهای فیزیکی بسیاری در این طبقه بندی قرار گرفته‌اند.

یکی از تئوری‌هایی که در یک دهه‌ی گذشته به منظور تحلیل پایداری این دسته از سیستم‌ها مورد توجه قرار گرفته است، تئوری تلف‌کنندگی است که البته بررسی‌ها و کارهای انجام شده در این زمینه انگشت‌شمار بوده است.

تلف‌کنندگی و تحلیل پایداری برای سیستم‌های ضربه‌ای[6] و سیستم‌های پیوندی در [۳۹،۴۰] آورده شده‌اند که در آن‌ها شرایط لازم و کافی برای تلف کنندگی بر مبنای توابع ذخیره انرژی مشترک[7] و نرخ

1- Lassale Theory
2- Dissipativity Theory
3- Storage Energy
4- Supplied Energy
5- Small Gain Theorem
6- Impulse Systems
7- Common Storage Function

تغذیه مشترک[1] هستند و از آنجا که سیستم‌های کلیدزنی دسته‌ای از سیستم‌های پیوندی هستند، این نتایج قابل استفاده برای آنها نیز هست.

اخیراً این نتایج برای سیستم‌های ابعاد گسترده[2] نیز تعمیم داده شده‌است [۴۱]. تلف‌کنندگی و عدم-فعالیت یا پسیویتی[3] سیستمهای کنترل خطی بر مبنای کنترل‌کننده‌های کلیدزنی در [۴۲] بررسی شده است. یک روش طراحی بر مبنای پسیویتی برای سیستم‌های کنترل کلیدزنی نیز در [۴۳] ارائه شده است. بهره‌ی القایی L_2 [4] به عنوان زیرشاخه‌ای از تئوری تلف کنندگی نیز در [۴۴] بررسی شده است.

همانطور که گفته شد کارهایی که در این زمینه انجام شده است عمدتاً بر مبنای نرخ تغذیه مشترک و توابع ذخیره انرژی مشترک بوده است. اما در سال‌های اخیر تعاریف و قضایایی بر مبنای نرخ تغذیه چندگانه[5] و توابع انرژی چندگانه[6] ارائه شده است که مهمترین آنها سه مقاله می شوند. اولین مقاله [۴۵] در سال ۲۰۰۱ منتشر شده است، که یک توصیف پسیویتی بر مبنای توابع ذخیره انرژی چندگانه را ارائه کرده است. مقاله دیگر [۴۶] در سال ۲۰۰۶ منتشر شده است، که پایداری سیستم‌های کلیدزنی وابسته به حالت را بر اساس تئوری تلف‌کنندگی و با در نظر گرفتن نرخ تغذیه چندگانه و توابع انرژی چندگانه و قیودی بین این نرخ‌ها و توابع ارائه کرده است. کار مهم و بنیادین دیگری که ارائه شده است و این پایان‌نامه نیز بر مبنای آن انجام شده است [۴۷] در سال ۲۰۰۸ ارائه گردیده است. ایده‌ی جالب و خوبی که در این مقاله مورد استفاده گرفته است، تعریف دو دسته نرخ تغذیه متفاوت برای سیستم کلیدزنی و زیرسیستم‌های آن است. توضیح کامل این کارها به دلیل اهمیت آن‌ها، به تفصیل در فصل سوم آورده شده است.

۱–۵– پدیده تأخیر[7]

پدیده‌ی انتقال، که شامل ماده، انرژی و اطلاعات می‌شود، یک بخش از سیستم‌های فیزیکی ساخت بشر است و فیزیکی و واقعی بودن سیستم‌ها توأم با پدیده‌ای به نام تأخیر است، که در تحلیل و بررسی سیستم‌ها تأثیر به سزایی دارد.

1- Common Supply Rate
2- Large Scale Systems
3- Passivity
4- L_2-Gain
5- Multipe Supply Rates
6- Multiple Storage functions
7- Delay

در این پایان‌نامه بررسی پایداری سیستم‌های کلیدزنی با عبارت تأخیر ورودی بر اساس تئوری تلف کنندگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همانطور که گفته شد سیستم‌های واقعی عموماً با تأخیر زمانی مواجه هستند [۴۸] و وجود تأخیر می‌تواند منجر به ناپایداری سیستم‌ها شود. تعدادی از نتایج حاصل شده در زمینه پایداری سیستم‌های با تأخیر زمانی در [۴۹] و [۵۰] ارائه شده است. روش‌های لیاپانف-کاراسوفسکی[1] معمولاً برای حل مسائل مختلف از جمله تأخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵۱].

بررسی تئوری تلف‌کنندگی در مورد سیستم‌های خطی و غیرخطی تأخیر زمانی در مراجع [۵۲-۵۵] مورد بحث قرار گرفته‌اند. در زمینه سیستم‌های کلیدزنی، نتایج و کارهایی که ارائه شده است تحت حالتی بوده است که تأخیر زمانی در متغیرهای حالت وجود داشته است از جمله‌ی این کارها می‌توان به مقاله [۵۶] اشاره کرد که برای سیستم‌های کلیدزنی تأخیر در حالت‌ها[2]، تئوری تلف کنندگی و بررسی پایداری را بحث کرده است.

در این پایان‌نامه هدف ما تحلیل پایداری سیستم‌های کلیدزنی با عبارت تأخیر ورودی با استفاده از تئوری تلف‌کنندگی با استفاده از نرخ‌های تغذیه چندگانه و توابع انرژی چندگانه است که تاکنون بطور مشخص انجام نگرفته است و از این رو می توان نوآوری این پایان‌نامه را در همین بخش دانست.

۱-۶- روند پایان نامه

روند این پایان‌نامه بدین شرح خواهد بود: در فصل دوم، مطالب زمینه‌ای و پایه که برای روشن شدن مسئله نیاز است مطرح می‌گردد. در فصل سوم، پایداری سیستم‌های کلیدزنی بر پایه اطلاعات ورودی-خروجی بررسی می‌گردند، در این بخش سه مقاله‌ی اصلی و بنیادین در این زمینه به تفصیل مطرح خواهد شد. در فصل چهارم، پایداری سیستم‌های کلیدزنی با ترم تأخیر ورودی بر پایه تئوری تلف‌کنندگی بررسی شده و تعاریف و قضایای به همراه اثبات ارائه می‌گردند. دز فصل پنجم، تئوری‌ها و قضایای ارائه شده در بخش قبل بر روی چند مثال پیاده سازی و نتایج بصورت شبیه‌سازی ارائه می‌شود. در پایان، در فصل ششم ، نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای کارهای آتی آورده خواهد شد.

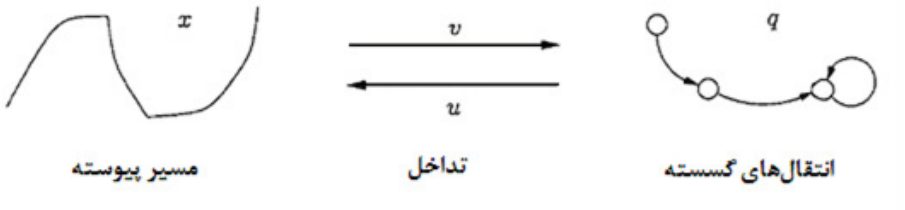
1- Lyapunov- Krasovakii
2- State Delay

۲- مطالب زمینه‌ای و پایه

در این بخش مطالب و تعاریف اولیه و پایه که در فصول بعدی مورد استفاده قرار خواهند گرفت، بطور مختصر و مفید آورده خواهد شد.

۲-۱- سیستم های هیبریدی و سیستم های کلیدزنی

سیستم‌های دینامیکی که بطور همزمان شامل دینامیک‌های پیوسته[1] در زمان و گسسته[2] در زمان و تداخل و ارتباط بین این دینامیک‌ها هستند، سیستم‌های هیبریدی نامیده می‌شوند. متغیرهای پیوسته می‌توانند بصورت فضای حالت خطی باشند. برای متغیرهای گسسته در زمان بطور مثال می‌توان متغیر q را در نظر گرفت که مقدار خود را از یک مجموعه محدود Q اختیار می‌کند که در انتخاب هر یک از این مقادیر وابسته به متغیر ورودی v است. برای واضح‌تر و ساده‌تر شدن مفهوم سیستم هیبریدی، می‌توان دیاگرام شکل ۲-۱ را رسم کرد.



شکل ۲-۱. نمایش یک سیستم هیبریدی

همان طور که می‌بینیم سیستم شامل متغیر های پیوسته و گسسته بطور همزمان هست. u ورودی فضای پیوسته و v ورودی فضای گسسته بوده و همانطور که مشخص است نحوه تداخل و ارتباط دو بخش همین ورودی‌ها هستند به طوری که ورودی فضای پیوسته، u، وابسته به متغیرهای گسسته در زمان است و بالعکس.

بطور کلاسیک، نظریه‌های کنترل اکثراً روی یکی از حالت‌ها و رفتارهای پیوسته یا گسسته پیاده می‌شود. گرچه بسیاری از سیستم‌های دینامیکی، بصورت هیبریدی هستند. در ادامه یک مثال ساده برای واضح‌تر شدن مفهوم ارائه می‌گردد.

1- Continuous States
2- Discerete States

مثال۲-۱: حرکت اتومبیل: یک مدل ساده، که حرکت یک اتومبیل را توصیف کند، بصورت زیر ارائه می-شود:

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(a,q)\end{cases}$$

که در آن x_1، مکان، x_2 سرعت، $a \geq 0$، شتاب و $q\epsilon\{1,2,3,4,5,-1,0\}$، دنده را نشان می‌دهد.

زمانی که q=1 ، f منفی و شتاب a کاهشی است و هنگامی که q=0 است، f مستقل از a است. توجه شود که در حالت دنده اتوماتیک، حالت دنده، q، وابسته به سرعت است. قابل ذکر است که خروجی‌ها هم می‌توانند وابسته به هر دو نوع متغیرها باشند، مثلاً، دور موتور.

بسیاری از محققان در علم کنترل و سیستم علاقه‌مند هستند که سیستم‌های هیبریدی را به صورت سیستم‌های پیوسته در زمان به همراه کلیدزنی بررسی کنند، تا از این نظر بتوانند تأکید بیشتری بر روی متغیرهای پیوسته در زمان داشته باشند.

معمولاً ما به سیستم‌های زمان پیوسته به همراه رویدادهای گسسته، ایزوله شده، که به صورت کلیدزنی اتفاق می‌افتد علاقه‌مند هستیم. به این سیستم‌ها، سیستم‌های کلیدزنی گفته می‌شود. یک سیستم کلیدزنی را می‌توان زیرشاخه‌ای از سیستم‌های هیبریدی دانست، که با چشم‌پوشی از جزئیات رفتار زمان گسسته و در عوض با در نظر گرفتن الگوهای کلیدزنی خاص، ارائه می‌گردد.

۲-۱-۱- طبقه‌بندی سیستم های کلیدزنی

برای بررسی بهتر سیستم‌های کلیدزنی آن‌ها را از چند دیدگاه مورد بررسی قرار داده و طبقه بندی می-کنیم. ابتدا طبقه‌بندی را بر اساس وابستگی کلیدزنی مورد بررسی قرار می‌دهیم. از این دیدگاه دو دسته زیر را خواهیم داشت: کلیدزنی وابسته به حالت[1] و کلیدزنی وابسته به زمان[2].

۲-۱-۱-۱- کلیدزنی وابسته به حالت

در این حالت فرض می‌شود که فضای حالت پیوسته، به تعداد محدود یا نامحدودی ناحیه عملکردی، که خانواده‌ای از صفحات کلیدزنی را تشکیل می‌دهند، تقسیم‌بندی می‌شوند. در هر یک از این نواحی یک

1- State-Dependent
2- Time-Dependent