

تحلیل پایداری سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه حین حملات محرومیت سرویس با تئوری سیستم‌های سوئیچینگ

محمد صیاد حقیقی*^۱ فائزه فریور**^۲

* استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

** استادیار گروه مهندسی کامپیوتر- مکترونیک، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با رشد روز افزون استفاده از شبکه‌های کامپیوتری برای انتقال داده، سیستم‌های سایبری- فیزیکی^۱ بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه^۲، از انواع صنعتی این سیستمها هستند که در آن سنسورها و عملگرها، از طریق شبکه اطلاعات را بین واحد های مختلف تبادل می‌کنند. از دست رفتن داده در شبکه بر عملکرد سیستم فیزیکی و پایداری آن تاثیرگذار است. از دست رفتن عمده داده می‌تواند بدلیل حمله محرومیت سرویس^۳ باشد. در این مقاله، به تحلیل پایداری سیستم‌های خطی کنترل شده تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده در مسیر پیشرو بدلیل حمله پرداخته شده است. سیستم کنترل شده تحت شبکه در حین حمله با یک سیستم سوئیچینگ تصادفی با مدل پرش مارکوف دو وضعیته مدل شده است. در وضعیت شماره یک شبکه داده ارسالی کنترل کننده را به سیستم انتقال میدهد و در وضعیت شماره دو، داده از دست رفته و سیستم از داده دیگری مانند یک مقدار پیش فرض به عنوان ورودی استفاده می‌کند. در این مقاله پایداری سیستم فیزیکی کنترل شده تحت شبکه حین حملات محرومیت سرویس هم در حوزه زمان پیوسته و هم زمان گسسته مورد تحلیل قرار گرفته است که دستاورد آنها، معرفی شرایط پایداری لیاپانوف برای سیستم با توجه به زمانهای اقامت تصادفی در هر وضعیت است. همچنین با استفاده از نتایج تحلیل انجام شده، یک روش جدید برای پایداری سازی چنین سیستمهایی تحت حمله محرومیت از سرویس از طریق مدیریت مقدار پیش فرض پیشنهاد می‌شود. در نهایت، مطالعه انجام شده بر روی چند سیستم کنترلی نمونه شبیه‌سازی شده است. نتایج ضمن تایید تئوری استخراج شده، نشان می‌دهند که چگونه سیستمی تحت حمله که حدود ۸۰٪ بسته کنترلی خود را از دست می‌دهد، با روش پیشنهادی پایدار نگاه داشته می‌شود.

واژگان کلیدی: سیستم کنترل شده تحت شبکه، اتلاف بسته، محرومیت سرویس، سیستم سوئیچینگ، سیستم خطی پرش مارکوف، پایداری لیاپانوف.

^۱ Cyber Physical Systems

نویسنده مسئول: محمدصیاد حقیقی sayad@ieee.org

^۲ Networked Control Systems

^۳ Denial of Service (DoS)

۱. مقدمه

سیگنال سویچ امکان ارتباط و همکاری بین دینامیک‌های گسسته و پیوسته سیستم را فراهم می‌کند. این سیگنال مشخص می‌کند که در هر لحظه از زمان، کدام یک از زیرسیستم‌ها فعال است. دسته‌ای از این سیستم‌ها، سیستم‌های سوئیچینگ تصادفی هستند که در آنها، سیگنال سویچ بصورت تصادفی در هر لحظه از زمان مشخص می‌کند که کدام زیرسیستم فعال باشد. این سیستم‌ها دارای ساختاری متغیر هستند و می‌توانند به عنوان مدل‌هایی برای سیستم‌های تحت تاثیر تغییرات تصادفی ساختاری مورد استفاده قرار گیرند. سیستم‌های خطی پرش مارکوف^{۱۱}، زیرمجموعه‌ای از این سیستم‌های تصادفی هستند که در آنها یک سیستم خطی با یک سیگنال سویچ تولید شده از حالت‌های سیستم در یک زنجیره مارکوف در نظر گرفته می‌شود.

در این مقاله، پایداری سیستم‌های خطی کنترل شده تحت شبکه در حضور از دست رفتن بسته داده در مسیر ارسال اطلاعات، برای مثال در اثر یک حمله محرومیت سرویس، بررسی می‌شود. از آنجایی که اتلاف داده موجب تغییر عملکرد سیستم می‌شود، پایداری سیستم کنترلی حلقه بسته تحت تاثیر قرار می‌گیرد. عامل اتلاف، چه تداخل باشد و یا حمله، موجب میشود در برخی از بازه‌های زمانی سیستم فیزیکی بدرستی در حلقه کنترلی عمل نکند و بسته داده تولیدی توسط کنترلر بدرستی و در زمان درست در اختیار سیستم قرار نگیرد و یا بسته داده فیدبک از سنسورها بدرستی و یا در زمان درست در اختیار کنترلر قرار نگیرد. در چنین حالتی، سیستم فیزیکی در برخی بازه‌های زمانی احتمالاً ناپایدار میشود و مود کنترلی سیستم حلقه بسته بین دو وضعیت پایدار و ناپایدار سوئیچ خواهد کرد. از اینرو، در این مقاله، از مفاهیم پایداری در سیستم‌های سوئیچینگ استفاده خواهد شد تا با توسعه آنها، بتوان به تحلیل پایداری سیستم‌های خطی کنترل شده تحت شبکه در حین از دست دادن داده پرداخت و در نتیجه آن، شرایط لازم و کافی برای پایداری این سیستم‌ها را ارائه کرد. در این مقاله بطور خاص، تحلیل پایداری سیستم خطی کنترل شده تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده در مسیر پیشرو مطالعه می‌شود. سیستم کنترل شده تحت شبکه (با احتمال از دست دادن داده)، با یک سیستم سوئیچینگ تصادفی با مدل پرش مارکوف دو وضعیت مدل می‌شود. در وضعیت ۱، داده ارسالی کنترل‌کننده توسط شبکه به سیستم انتقال می‌یابد و در وضعیت ۲ داده از دست می‌رود. سیستم

در سالهای اخیر، با توجه به رشد روز افزون استفاده از شبکه‌های کامپیوتری برای انتقال داده، سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه^۴، اینترنت اشیا^۵ و سیستم‌های سایبری- فیزیکی^۶ بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه نظیر سایر سیستم‌های فیزیکی متداول، قسمت فیزیکی با استفاده از عملگرها فرمانهای کنترلی را دریافت میکند و اطلاعات سیستم از طریق حسگرها اندازه‌گیری ارسال میشود، با این تفاوت که فرآیند انتقال و تبادل داده در این سیستم‌ها بر بستر شبکه صورت می‌گیرد که امکان کنترل سیستم از راه دور را نیز میسر می‌کند. استفاده از کانال‌های ارتباطی شبکه در انتقال و تبادل داده بر دینامیک سیستم حلقه بسته تاثیر می‌گذارد. از این رو، عواملی نظیر زمان انتقال، الگوهای سیگنال‌ها و همچنین ویژگیهای شبکه بر رفتار سیستم کنترل تحت شبکه تاثیرگذار است. همچنین، ارتباطات بر بستر شبکه با عدم قطعیت^۷ در انتقال داده و احتمال از دست رفتن بسته داده^۸ همراه است. بنابراین، در مدلسازی رفتار کانال‌های ارتباطی از مدل‌های احتمالاتی استفاده می‌شود.

سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه، سیستم‌هایی در کنترل فرآیندهای صنعتی توزیع شده هستند که در آن سنسورها و عملگرها از طریق شبکه با سرعت و ظرفیت انتقال محدود، اطلاعات را بین سیستم تحت کنترل و کنترل‌کننده جابجا می‌کنند. در مقایسه با سیستم‌های کنترل متداول که در آن ارتباط بین بخشها با کابل و به صورت نقطه به نقطه است، در این‌گونه سیستم‌ها اتصال همیشه قابل اعتماد نیست. البته چنین سیستمی دارای مزایایی از قبیل، امکان تنظیم مجدد کنترل‌کننده، نظارت بر داده‌ها و غیره است. تنظیم مجدد کنترل‌کننده روشی برای تضمین عملکرد سیستم کنترل شده تحت شبکه است که می‌تواند با توجه به تاخیر زمانی متغیر در ارسال بسته‌های داده و یا از دست رفتن بسته‌ها در شبکه، عملکرد قابل قبولی از سیستم را تضمین نماید. از دست رفتن بسته و تاخیر در ارسال و دریافت بسته‌ها، بر عملکرد کنترل‌کننده و در نتیجه بر پایداری و عملکرد سیستم تحت کنترل تاثیر می‌گذارد.

سیستم‌های سوئیچینگ^۹ یک دسته خاص از سیستم‌های ترکیبی^{۱۰} ترکیبی^{۱۰} گسسته و پیوسته هستند. در سیستم‌های سوئیچینگ،

^۸ Packet Loss

^۹ Switching Systems

^{۱۰} Hybrid Systems

^{۱۱} Markov Jump Linear Systems

^۴ Networked Control Systems

^۵ Internet of Things

^۶ Cyber Physical Systems

^۷ Uncertainty

یکی در صورت عدم دریافت سیگنال کنترلی از طریق کانال، معمولاً از یک سیاست پیش فرض پیروی می‌کند. این سیاست میتواند اعمال ورودی صفر (سیستم حلقه باز)، اعمال آخرین ورودی دریافت شده، و یا اعمال ورودی خاص برای اهدافی مانند حفظ پایداری سیستم باشد. در این مقاله، سیستم‌های خطی کنترل شده تحت شبکه در حضور از دست رفتن بسته داده در مسیر پیشرو به صورت سیستم سویچینگ تصادفی مدل می‌شود و پایداری لیاپانوف آنها در حوزه زمان پیوسته و زمان گسسته بررسی می‌گردد. بطور خلاصه می‌توان نوآوری‌های این مقاله را بصورت زیر فهرست کرد:

یکی از مهمترین مسائل مورد بررسی در زمینه سیستم‌های سویچینگ، پایداری سیستم‌های سویچینگ است. پایداری سیستم‌های سویچینگ برای انواع مختلف سیستم‌های سویچینگ مطالعه شده است. در [۱۲]–[۱۰] مفاهیم پایداری سیستم‌های سویچینگ توضیح داده شده است.

انواع سویچینگ قطعی و سویچینگ تصادفی در [۱۲] و [۱۳] بررسی شده‌اند و شرایطی که در آن یک سیستم سویچینگ برای تمام حالات سویچینگ ممکن، پایدار باقی می‌ماند، استخراج شده‌اند. فرکانس سویچینگ در سیگنال سویچینگ را می‌توان با استفاده از مفاهیم زمان اقامت و متوسط زمان اقامت محدود کرد. مقاله [۱۴] سیستم‌های سویچینگ متشکل از زیرسیستم‌های پایدار (که در [۱۵] و [۱۶] آورده شده است) را به سیستم‌های سویچینگ متشکل از زیرسیستم‌های ناپایدار بسط و توسعه می‌دهد. علاوه بر این، مشکل طراحی قوانین سویچینگ وابسته به حالت، برای تضمین پایداری در [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است.

در مقاله [۱۸] مسئله پایداری سیستم‌های کنترل سویچ، با تاخیر زمانی برای هر دو مورد خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، یک مفهوم جدید پایداری پذیری عمومی در رابطه با فیدبک و قانون سویچینگ ارائه شده است. در این مقاله براساس توابع چندگانه لیاپانوف، یک کنترل‌کننده فیدبک حالت و قانون سویچینگ برای اطمینان از اینکه سیستم‌های سویچینگ حلقه بسته با تاخیر زمانی به طور عمومی پایدار مجانبی و پایدار نمایی باشند، ارائه شده است. در مقالات [۲۱]–[۱۹] پایداری سیستم‌های سویچینگ تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است.

مقاله‌های [۲۲]، [۲۳]، مفاهیم پایداری سیستم‌های سویچینگ را در سیستم‌های کنترل تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده و تاخیر زمانی بررسی کرده‌اند. مقاله [۱۹] مربوط به تحلیل پایداری سیستم‌های سویچینگ زمان پیوسته با یک سیگنال سویچینگ تصادفی است. سیگنال سویچینگ که زمان اقامت در هر زیرسیستم را مشخص می‌کند، شامل یک قسمت ثابت و یک قسمت تصادفی

فیزیکی در صورت عدم دریافت سیگنال کنترلی از طریق کانال، معمولاً از یک سیاست پیش فرض پیروی می‌کند. این سیاست میتواند اعمال ورودی صفر (سیستم حلقه باز)، اعمال آخرین ورودی دریافت شده، و یا اعمال ورودی خاص برای اهدافی مانند حفظ پایداری سیستم باشد. در این مقاله، سیستم‌های خطی کنترل شده تحت شبکه در حضور از دست رفتن بسته داده در مسیر پیشرو به صورت سیستم سویچینگ تصادفی مدل می‌شود و پایداری لیاپانوف آنها در حوزه زمان پیوسته و زمان گسسته بررسی می‌گردد. بطور خلاصه می‌توان نوآوری‌های این مقاله را بصورت زیر فهرست کرد:

- معرفی یک مدل پیشنهادی دو وضعیت مارکوف و استفاده از مدل سوئیچینگ در سیستم‌های کنترلی تحت شبکه حین حمله محرومیت سرویس (یا تداخل).
- تحلیل ریاضی و ارزیابی شرایط پایداری سیستم کنترل شده تحت شبکه حین حملات محرومیت سرویس در حوزه زمان پیوسته و زمان گسسته با استفاده از مدل پیشنهادی.
- انجام چند مطالعه موردی برای صحت سنجی شرایط پایداری بدست آمده بصورت تئوری و نیز ارائه یک راهکار جدید برای مقاوم سازی سیستم‌های خطی کنترل شده تحت شبکه در برابر حمله محرومیت سرویس با استفاده از ورودی محلی تطبیقی.

ساختار ادامه مقاله بدین شرح است؛ در بخش دوم، مطالعات پیشین مرور می‌شود. در بخش سوم، به معرفی سیستم کنترل شده تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده/بسته پرداخته می‌شود. در این بخش، ساختار کنترلی سیستم کنترل شده تحت شبکه و مدل سویچینگ پیشنهادی برای عملکرد سیستم حلقه بسته (با احتمال از دست رفتن داده) آورده شده است. همچنین، مسئله پایداری سیستم کنترل شده تحت شبکه و ارتباط مفهومی آن با پایداری سیستم‌های سوئیچینگ تبیین شده است. تحلیل پایداری سیستم کنترل شده تحت شبکه در حین حمله در بخش چهارم آورده شده است. همچنین، شرایط پایداری لیاپانوف برای سیستم در حوزه زمان-پیوسته و زمان-گسسته ارائه شده است. در بخش پنجم، شرایط پایداری بدست آمده با شبیه‌سازی بر روی سیستم‌های نمونه مورد بررسی قرار گرفته و راه‌حلهایی جهت مقاوم سازی سیستم در برابر حمله محرومیت از سرویس ارائه می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری این مقاله ارائه خواهد شد.

۲. مطالعات پیشین

در این بخش، مطالعات پیشین مرتبط با این تحقیق مرور می‌شود. در مطالعات اخیر سیستم‌های ترکیبی و سیستم‌های سویچینگ،

فعلی نیز وابسته است، شرایط پایداری برای سیستم سوئیچ تصادفی حلقه بسته بدست آمده است. در مقاله [۳۳]، پایداری سیستم کنترل شده تحت شبکه حین حملات تزریق داده‌های کاذب با استفاده از یک روش کنترل پیش بینی تحلیل و بررسی می‌شود. در مدلسازی حملات، از تئوری بازی برای بدست آوردن نتایج موازنه‌ای تکرار و مدت زمان استفاده شده است. سپس، تحت استراتژی حمله، پایداری سیستم کنترل شده تحت شبکه توسط کنترل پیش بین با استفاده از روش سیستم سوئیچینگ بررسی شده است. در مقاله [۳۴]، کنترل شبه رویداد سوئیچینگ برای سیستم کنترل شده مبتنی بر شبکه تحت حملات محرومیت سرویس بررسی شده است. یک طرح ارتباطی رویدادی که باعث ایجاد سوئیچ می‌شود، طراحی شده است تا با حملات متناوب برای بهبود ارتباطات مقابله کند. سپس، با محدودیت تعداد حداکثر افت داده‌های مجاز ناشی از حملات، یک معیار تثبیت برای تخمین پارامترهای ارتباطی ناشی از رویداد و قانون کنترلی امن بدست آمده است. در مقاله [۳۵]، دو حمله سایبری به سیستم‌های کنترل کروز را تطبیقی طراحی شده است به نحوی که احتمال بروز تصادف را افزایش می‌دهد. در این مقاله، سامانه تشخیص حمله و سیستم جبران‌سازی طراحی شده است. چنانچه سامانه تشخیص نفوذ، رخداد حمله را تشخیص دهد، با اعمال فرمان، سوئیچ بین کنترل کننده اصلی سیستم (کنترل کننده مدل پیش‌بین) و سیستم جبران‌ساز (کنترل کننده PID) انجام می‌شود. مطالعه مشابهی بر روی سیستم موتور DC در مقاله [۳۶] انجام شده است که در صورت تشخیص حمله، با اعمال سوئیچ کنترل کننده اصلی که PID است با یک کنترل کننده هوشمند شبکه عصبی جایگزین می‌شود. در این دو مقاله، سامانه تشخیص نفوذ، یک سیستم یادگیرنده است که در طول دوره امن در آغاز کار سیستم، رفتار نرمال سیستم را یاد می‌گیرد. در مقاله [۳۷]، یک پروتکل جدید کنترل کننده پیش بین مبتنی بر رویداد برای ایجاد ثبات در سیستم‌های کنترل مبتنی بر شبکه تحت حملات محرومیت سرویس ارائه شده است. دو نوع مدل حمله DOS در این مقاله معرفی شده است که برای کانال‌های ارتباطی سنسور به کنترل کننده و کنترل کننده به عملگر می‌تواند اعمال شود. سپس با توجه به حملات معرفی شده، کنترل کننده‌های پیش بین ارائه شده است. سعی شده است تا کنترل کننده‌های جبران‌ساز، پهنای باند شبکه را کاهش دهد و تأثیر منفی حملات بر عملکرد سیستم را جبران کند. در مقاله [۳۸]، نواقص طراحی کنترل کننده سیستم‌های کنترل شده مبتنی بر شبکه تحت حملات سایبری بررسی شده است. برای صرفه جویی در منابع محدود ارتباطی، از یک استراتژی ارتباطی

است. پایداری تصادفی سیستم‌های سوئیچینگ با استفاده از رویکرد لیاپانوف مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه یک روش مبتنی بر حل نامعادلات خطی ماتریسی برای پایداری مقاوم سیستم‌های سوئیچینگ خطی دارای نامعینی پارامتری ارائه شده است. در مقاله [۲۴] شرایط پایداری برای سیستم سوئیچینگ خطی زمان گسسته در حضور عدم قطعیت پارامتری و تاخیر زمانی مورد مطالعه قرار گرفته است. تاخیر به صورت متغیر با زمان اما محدود فرض شده و براساس توابع لیاپانوف، شروط کافی جهت تعیین حد بالای مجاز برای تاخیر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، روش زمان اقامت میانگین که یکی از ابزارهای موثر جهت بررسی پایداری در سیستم‌های سوئیچینگ است، جهت استخراج این شروط مورد استفاده قرار گرفته است. شروط بدست آمده، شرایطی برای سیگنال کلیدزنی مشخص کرده است که هیچ وابستگی به عدم قطعیت موجود در سیستم ندارد. برای سیگنال‌های سوئیچینگ تصادفی، مفاهیم مربوط به پایداری در [۲۶]، [۲۵] بررسی شده‌اند. در بیشتر موارد، نتایج پایداری برای چنین سیستم‌هایی به اطلاعات آماری در سیگنال سوئیچینگ مانند احتمال سوئیچ‌های حالت و توزیع‌های ثابت در ارتباط با حالتها، وابسته است. یک کلاس مهم از سیستم‌های سوئیچینگ تصادفی، پرش مارکوف است که سیگنال سوئیچینگ بر اساس یک مدل مارکوف تولید می‌شود [۲۹]–[۲۷]. سیستم پرش مارکوف به عنوان یک زیر سیستم از سیستم‌های تصادفی بسیار مورد توجه محققان در مطالعه سیستم‌های سوئیچینگ قرار گرفته است. در این رویکرد فرض می‌شود سیستم سوئیچینگ بین حالت‌های مختلف سیستم مارکوف تغییر وضعیت می‌دهد. زمان اقامت در هر وضعیت از سیستم پرش مارکوف از دو بخش زمان اقامت ثابت و زمان اقامت تصادفی تشکیل شده است. زمان اقامت ثابت نقش مشابهی را با زمان اقامت در سیستم‌های سوئیچینگ قطعی ایفاء می‌کند [۳۰]، و زمان اقامت تصادفی شبیه به زمان توزیع بصورت نمایی در سیستم‌های پرش مارکوف است [۳۱]. مقاله [۳۲] به مسئله پایداری در سیستم‌های سوئیچینگ تصادفی زمان گسسته، با زمان اقامت محدود پرداخته است. سیستم‌های سوئیچینگ تصادفی با سیستم‌های خطی پرش نیمه مارکوف مدل شده و سپس از روش پایه ای نیمه مارکوف برای بررسی مسائل پایداری استفاده می‌شود. زمان اقامت در هر وضعیت سیستم دارای دو حد بالا و پایین است. این عمومی تر از سناریوهای قبلی است که در آنها فقط محدودیت بالایی از زمان اقامت را در نظر می‌گرفتند. در این مقاله، با استفاده از یک تابع لیاپانوف که نه تنها به وضعیت فعلی سیستم بستگی دارد بلکه به زمان سپری شده در وضعیت

را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که تصمیمات کنترل کننده به نفع مهاجم تغییر کند. مهاجم تابع توزیع احتمال^{۱۳} انحرافات جانبی از خط مرکز جاده را یاد می‌گیرد و حمله با حداکثر قدرتی را اعمال می‌کند که برای مسافران/راننده مخفی باقی می‌ماند، اما از نظر آماری احتمال تصادف را افزایش می‌دهد. حداکثر قدرت این حمله توسط سیستم یادگیری عملگر-نقاد تنظیم می‌شود.

۳. سیستم کنترل شده تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده

در این مقاله، تحلیل پایداری سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه (با احتمال از دست رفتن داده مثلا بر اثر حمله محرومیت سرویس) با استفاده از مفاهیم و رویکرد پایداری در سیستم‌های سوئیچینگ تصادفی تحقیق شده است. در این بخش، ابتدا ساختار یک سیستم کنترل شده تحت شبکه معرفی می‌شود. از آنجایی که احتمال از دست رفتن بسته داده‌ای در کانالهای ارتباطی شبکه وجود دارد، فرآیند کنترل سیستم‌ها تحت شبکه یک فرآیند تصادفی است و به وضعیت شبکه ارتباطی وابسته می‌شود. از اینرو در ادامه این بخش، یک مدل مارکوف برای مدلسازی رفتار شبکه در یک سیستم کنترل شده تحت شبکه ارائه شده است. با توجه به مدل پیشنهادی، برای تحلیل پایداری سیستم فیزیکی کنترل شده تحت شبکه از مفاهیم و تئوریهای سیستم‌های سوئیچینگ استفاده می‌شود که تحلیل پایداری در بخش بعدی آورده شده است.

۳_۱ ساختار کنترلی سیستم کنترل شده تحت شبکه و فرضیات

۳_۱_۱ مدل حمله و شبکه

بلوک دیگرام یک سیستم فیزیکی کنترل شده تحت شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که پیش‌تر توضیح داده شد، در این مطالعه رابط شبکه دارای احتمال اتلاف و از دست دادن بسته در حین ارسال است. این شکل بلوک دیگرام تمامی اجزاء یک سیستم حلقه بسته را دارد.

عملکرد تمامی این اجزا همانند سیستم کنترل کلاسیک و متداول است با این تفاوت که داده‌های ارسالی از کنترلر به سیستم فیزیکی و همچنین داده ارسالی از سنسورها به کنترلر از بستر شبکه انتقال می‌یابند. این شبکه می‌تواند دارای تداخل^{۱۴} از نوع طبیعی و یا حمله عمدی باشد که منتهی به از دست رفتن بسته‌های داده‌ای در

برای عملگر استفاده شده است. اندازه‌گیریها از طریق یک شبکه ارتباطی منتقل می‌شوند و ممکن است در اثر حملات سایبری خراب شوند. هدف این مقاله طراحی یک کنترل کننده برای مدل جدید سیستم حلقه بسته با در نظر گرفتن حملات سایبری تصادفی و طراحی کنترل کننده ترکیبی است. با استفاده از تئوری پایداری لیاپونوف و روشهای فرآیند تصادفی، معیار پایداری برای پایداری سیستم بدست آمده است.

مقاله [۳۹]، به طراحی کنترل کننده ردیاب مقاوم برای سیستم کنترل مبتنی بر شبکه تحت حملات سایبری پرداخته است. در این مقاله، مهاجم یک دشمن فعال است که هدف آن به ترتیب کاهش شدید عملکرد ردیابی سیستم با شروع حملات فریب به کانالهای ارتباطی سنسور به کنترل کننده و حملات محرومیت سرویس به کانالهای کنترل کننده به سیستم است. همچنین در این مقاله، یک استراتژی کنترل مقاوم تطبیقی در صورت وجود عدم قطعیت در اطلاعات سیستم و همچنین در حضور حملات، پیشنهاد شده است. از مهمترین سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه، شبکه‌های ارتباطات خودرویی هستند که چنانچه این شبکه‌ها تحت حملات سایبری قرار بگیرد می‌تواند خسارت زیادی ایجاد نماید [۴۰]. از اینرو، بررسی وضعیت پایداری سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند از بروز تصادف، حوادث و خسارات در سیستم حمل و نقل هوشمند جلوگیری بعمل آورد و موجب پایداری و امنیت سیستم‌های نقلیه هوشمند شود. در مقاله [۴۱]، انواع حملات به شبکه اقتضایی وسایل نقلیه^{۱۲} شامل حملات جعل پیام و پخش مجدد، حملات یکپارچگی و جعل هویت، حملات محرومیت سرویس و حمله ناشناس ماندن، بررسی و مطالعه شده است. در مقاله [۴۲]، از شبکه‌های عصبی کانولوشن مبتنی بر توجه چندمرحله‌ای برای تشخیص ناهنجاریها، نفوذ و حملات در وسایل نقلیه خودکار استفاده می‌شود. به طور خاص، در مقاله [۴۳]، روشهایی برای تشخیص نفوذ و جبرانسازی حملات سایبری انجام شده بر روی شبکه ارتباطی سیستم کنترل کروز اتومبیل طراحی شده است. همچنین در مقاله [۳۵] که پیشتر توضیح داده شد، دو حمله سایبری پنهان به سیستم‌های کنترل کروز تطبیقی طراحی شده است به نحوی که احتمال بروز تصادف را افزایش می‌دهد و سپس مکانیزم‌های جبرانسازی مبتنی بر سویچ بین کنترل کننده‌ها ارائه شده است. در مقاله [۴۴]، حملات پنهانی بر روی وسایل نقلیه خودمختار مطالعه شده است. در این مقاله، یک مهاجم هوشمند طراحی شده است که می‌تواند کانال ارتباطی بین سنسورها و کنترل کننده را بدست گرفته و ایمنی خودرو خودران را به خطر بیندازد و ورودی‌های واحد کنترل کننده (قرائت سنسور)

^{۱۳} Interference

^{۱۱} Vehicular Ad hoc Network

^{۱۲} Probability Density Function (pdf)

سیستم خطی در حوزه زمان، کنترل کننده فیدبک حالت خطی است که معادله ریاضی آن در رابطه (۲) آورده شده است.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (2)$$

که در آن K ، بردار بهره فیدبک حالت است. بردار بهره فیدبک حالت به نحوی طراحی می شود که سیستم کنترلی حلقه بسته پایدار باشد. با چنین ورودی ای کنترلی ای، سیستم حلقه بسته بصورت زیر در خواهد آمد.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B(-Kx(t)) \\ &= (A - BK)x(t) \triangleq \tilde{A}x(t) \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن \tilde{A} را میتوان ماتریس حلقه بسته دانست که برای پایداری سیستم باید مقادیر ویژه منفی داشته باشد. در صورتی که هدف رسیدن به یک وضعیت مرجع (بجای وضعیت صفر برای x) باشد، میتوان با یک تغییر متغیر از روابط مشابه استفاده کرد. در این حالت میتوان سیستمی فرضی دوگانی را با معادله زیر در نظر گرفت:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \tilde{A}z(t) \\ z(t) &= x(t) - v \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن بردار v همان مقدار مرجع مطلوب (ثابت) برای سیستم است. میتوان به سادگی نشان داد که این سیستم معادل سیستم رابطه (۲) است و در صورت کنترل پذیری و پایداری، تنها بجای (بردار) صفر در نهایت $x(t) = v$ قرار می گیرد.

۲_۳ مدل سوئیچینگ پیشنهادی برای عملکرد سیستم

حلقه بسته تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده
همانطور که پیش تر بیان شد، در شبکه ارتباطی احتمال از دست رفتن داده وجود دارد که در این مطالعه مطابق فرض، تاثیر این رخداد وقتی بر روی مسیر پیشرو اتفاق می افتد بررسی می شود. در اینصورت بسته‌های داده ارسالی از کنترل کننده در صورت از دست

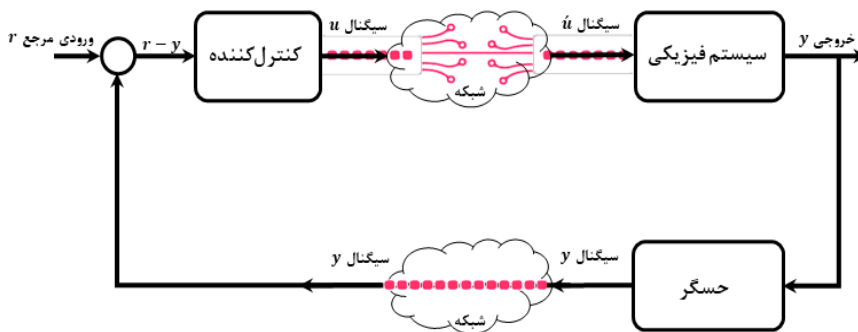
مسیرهای انتقال شود. همانطور که در شکل مشاهده می شود، بدلیل احتمال از دست رفتن بسته داده در شبکه در مسیر پیشرو، سیگنالها قبل از عبور از شبکه در این مسیر، با آنچه به سیستم فیزیکی رسیده و اعمال می شود دارای تفاوت هستند (این تفاوتها شامل عدم وجود سیگنال در اثر از بین رفتن بسته نیز می شود). از اینرو، نامگذاری سیگنال قبل از عبور از شبکه و آنچه که به سیستم اعمال می شود، متفاوت انجام شده است تا بتوان بین آنها تمایز قائل شد. با فرض محافظت از بسته ها با استفاده از کدهای احراز هویت پیام و امضای دیجیتال، گیرنده بسته های تغییر یافته و نامعتبر را دور ریخته و به مانند بسته از دست رفته تلقی می کند. بنابراین هر بسته ارسالی کنترلی یا از شبکه عبور کرده و سالم به سیستم فیزیکی می رسد و یا در طول مسیر از دست می رود. برای ساده سازی حل مساله در این مطالعه، تاثیر از دست رفتن بسته فقط در مسیر پیشرو^{۱۵} مطالعه شده است و فرض شده است که احتمال از دست رفتن داده در مسیر فیدبک وجود ندارد و در مطالعات آتی، به آنها پرداخته خواهد شد.

۲_۱_۳ مدل سیستم فیزیکی و کنترل حلقه بسته

در این مطالعه، سیستم فیزیکی که کنترل آن از طریق بستر شبکه صورت می گیرد، یک سیستم خطی نامتغیر با زمان^{۱۶} در نظر گرفته شده است. معادلات حالت سیستم فیزیکی در رابطه (۱) آورده شده است:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن x بردار متغیرهای حالت است $x(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ ، u و y به ترتیب ورودی و خروجی سیستم هستند. A ماتریس ژاکوبین سیستم (با ابعاد $n \times n$)، B ماتریس ورودی و C ماتریس خروجی سیستم است. متداول ترین کنترل کننده مورد استفاده برای یک



شکل ۱. بلوک دیاگرام سیستم کنترل شده تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده در بستر شبکه

^{۱۶} Linear Time Invariant (LTI) System

^{۱۵} Feedforward

کنترل‌کننده سویچ خواهد کرد. با این رویکرد، پایداری سیستم در حوزه زمان پیوسته و زمان گسسته بررسی خواهد شد.

برای بررسی پایداری سیستم، معادله فضای حالت سیستم حلقه بسته زمان پیوسته رابطه (۳) بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_S(t)x(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (۶)$$

چنانچه سیستم در وضعیت ۱ از مدل پیشنهادی شکل ۲ باشد و زمان پیوسته در نظر گرفته شود، $A_S(t)$ بصورت $A_1 = A - BK$ خواهد بود.

اگر سیستم در وضعیت ۲ مدل پیشنهادی قرار گیرد، ورودی سیستم، مقدار پیش فرض خواهد بود. در این حالت میتوان $A_S(t)$ را برابر با A_2 بصورت زمان پیوسته در نظر گرفت. برخی ورودی‌های پیش فرض منجر به A_2 متغیر با زمان می‌شوند. ولی در برخی دیگر این مقدار ثابت و نامتغیر با زمان است.

این رویکرد مدلسازی سیستم را برای سیستم با معادله حالت زمان گسسته نیز می‌توان انجام داد که در رابطه (۷) آورده شده است. در این رابطه، $A_S(k)$ یا بصورت $A_1 = A - BK$ برای وضعیت دریافت ورودی از کنترل‌کننده و یا A_2 برای وضعیت عدم دریافت ورودی در حین حمله خواهد بود.

$$\begin{cases} x(k+1) = A_S(k)x(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (۷)$$

با توجه به موارد ذکر شده، در مدل پیشنهادی، سیستم کنترل‌شده تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده، بصورت یک سیستم سویچینگ در نظر گرفته می‌شود که پایداری آن در حوزه زمان پیوسته و در حوزه زمان گسسته برای برخی سیاستهای موثر برای ورودی پیش فرض، در بخش چهارم مقاله بررسی خواهد شد. در سیستم‌های سویچینگ، زمان اقامت T_i در هر وضعیت (یا زیر سیستم) متشکل از دو بخش زمان حداقلی اقامت d_i (حداقل زمان اقامت در هر وضعیت) و زمان تصادفی اقامت η_i (معادل با زمان اقامت در سیستم پرش مارکوف می‌باشد که در بخش ۴-۱ توضیح داده خواهد شد) است. از آنجایی که سیستم سویچینگ را می‌توان بصورت یک سیستم پرش مارکوف (پرش وضعیت در لحظه‌های سویچ) در نظر گرفت، در ادامه این مقاله، مسئله پایداری با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف در سیستم‌های سویچینگ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴. تحلیل پایداری سیستم کنترل‌شده تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده

در این بخش، تحلیل پایداری سیستم کنترل‌شده تحت شبکه در حین از دست رفتن داده (در مسیر پیشرو) ارائه شده است. همانطور

نرفتن داده به عنوان ورودی به سیستم فیزیکی انتقال می‌یابد. هر بسته داده ارسالی از کنترل‌کننده با یک احتمال مشخص امکان رسیدن به سیستم فیزیکی را دارد. از اینرو، سیستم فیزیکی حلقه بسته در وضعیت تصادفی سویچ بین دو وضعیت دریافت بسته داده ورودی درست (و در زمان درست) و یا عدم دریافت بسته داده ورودی قرار می‌گیرد. مدل دریافت داده‌های ارسالی از کنترل‌کننده در ورودی سیستم فیزیکی از مدل سویچینگ پیشنهادی در شکل ۲ پیروی خواهد کرد. این شکل، یک سیستم سویچینگ تصادفی با دو وضعیت کاری را نشان می‌دهد که در آن وضعیت ۱ نشان دهنده رسیدن بسته داده کنترلی به سیستم فیزیکی است و وضعیت ۲ نمایانگر عدم رسیدن بسته داده است که در آن ارتباط بین کنترل‌کننده و سیستم فیزیکی قطع شده است. برای مدل مارکوف پیشنهادی، ماتریس احتمال انتقال Γ ، به صورت رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 - \mu_1 & \mu_1 \\ \mu_2 & 1 - \mu_2 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که در آن μ_1 احتمال انتقال از وضعیت ۱ به وضعیت ۲ است و $1 - \mu_1$ ، احتمال باقی ماندن در وضعیت ۱ است. بطور مشابه، μ_2 احتمال انتقال از وضعیت ۲ به وضعیت ۱ است و $1 - \mu_2$ ، احتمال باقی ماندن در وضعیت ۲ است. در این مطالعه، احتمال از دست رفتن بسته داده‌ای بصورت تصادفی با توزیع پواسون در نظر گرفته شده است. از اینرو، سیگنال سویچینگ در مدل پیشنهادی بصورت تصادفی با توزیع پواسون تحت فرایند مارکوف تولید می‌شود. توزیع پواسون برای رویدادهای مستقل و با نرخ متوسط ثابت مناسب می‌باشد. در این مقاله توزیع پواسون برای احتمال از دست رفتن بسته‌ها در شبکه در نظر گرفته شده است که در اغلب مطالعات حوزه شبکه نیز چنین فرضی معمول است.

۳-۳ پایداری سیستم کنترل‌شده تحت شبکه و ارتباط آن با پایداری سیستم‌های سوئیچینگ

معمولاً سیستم حلقه بسته تحت شبکه، در مواجهه با رویداد از دست رفتن بسته داده کنترلی (بصورت تصادفی) در ورودی سیستم فیزیکی، یک سیاست پیش فرض را در پی می‌گیرد. برای مثال سیستم فیزیکی از مقدار پیش فرض صفر (یا هر عدد دیگری مانند آخرین مقدار) به عنوان ورودی استفاده می‌کند، که با توجه به اینکه این مقدار پیش فرض از واحد کنترل‌کننده دریافت نشده است، هیچ تضمینی براینکه قادر به پایداری سازی سیستم فیزیکی باشد، وجود ندارد. از اینرو، در این شرایط وضعیت پایداری سیستم فیزیکی نامشخص می‌باشد. در این حالت، سیستم فیزیکی بین وضعیت کنترلی حلقه بسته و وضعیت عدم دریافت بسته از واحد

$$\Pr\{s(t + \Delta t) = j | s(t) = i\} = \begin{cases} 0, & j \neq i \\ 1, & j = i \end{cases} \quad (9)$$

که در آن $t_k < \Delta t < t_k + d_i$ است. برای بازه زمانی تصادفی اقامت $t \geq t_k + d_i$ ، احتمال انتقال وضعیت مارکوف به صورت زیر است:

$$\Pr\{s(t + \Delta t) = j | s(t) = i\} = \begin{cases} \pi_{ij}\Delta t + H.O.T(\Delta t), & j \neq i \\ 1 + \pi_{ii}\Delta t + H.O.T(\Delta t), & j = i \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $t_k + d_i < \Delta t < t_{k+1}$ و π_{ij} احتمال انتقال مارکوف ($\pi_{ij} \geq 0$) از وضعیت i ام به وضعیت j ام در این بازه زمانی است که منجر به تغییر $S(t)$ از مقدار i به مقدار j می‌شود، و با احتمال $1 - \pi_{ij}$ تغییری در وضعیت کاری سیستم و سیگنال $S(t)$ رخ نخواهد داد. در رابطه (10)، $\pi_{ii} \triangleq -\sum_{j=1, j \neq i}^M \pi_{ij}$ است و $H.O.T(\Delta t)$ جملات با درجات بالاتر^{۱۷} از Δt می‌باشد که بدلیل کوچک بودن مقدار عددی آن قابل صرفنظر کردن است [۱۹]. در حالت کلی M تعداد وضعیت/حالت‌های مارکوف است.

از متداول‌ترین روش‌ها در تحلیل پایداری سیستم‌های تصادفی، بررسی میانگین مربعات است بدین معنی که برای پایداری، لازم است که میانگین حالت سیستم محدود باشد.

تعریف ۱: اگر بردار متغیر حالت سیستم باشد. سیستم پایدار تصادفی است اگر

$$E\left\{\int_0^\infty \|x(t)\|^2 dt \mid x_0, s_0\right\} < \infty \quad (11)$$

برای هر حالت اولیه سیستم $x_0 \in \mathbb{R}^n$ و هر وضعیت اولیه $s_0 \in \mathcal{M}$ در ادامه برای بررسی پایداری سیستم سوئیچینگ ارائه شده در رابطه (۶)، ابتدا نشان داده می‌شود که پایداری تصادفی سیستم معادل با پایداری تصادفی یک سیستم پرش مارکوف است و سپس پایداری سیستم پرش مارکوف با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف مورد بررسی قرار می‌گیرد تا شرایط لازم و کافی پایداری این سیستم تحت شرایط خاصی معرفی شود.

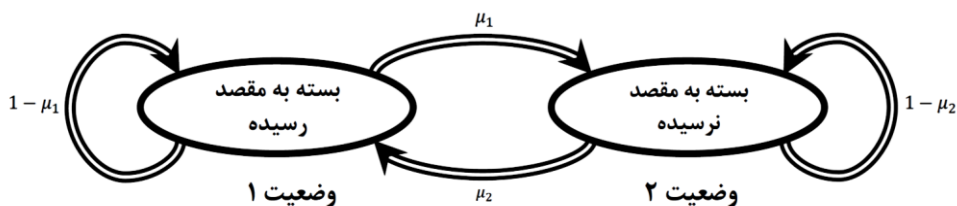
که در بخش قبل توضیح داده شد، سیستم فیزیکی در برخورد با عدم دریافت بسته ارسالی در ورودی از واحد کنترل‌کننده، از یک بسته داده با مقدار صفر یا هر مقدار دیگری به عنوان ورودی استفاده می‌کند. در چنین شرایطی، بررسی پایداری سیستم در حوزه زمان پیوسته و زمان گسسته حائز اهمیت است که در این بخش از مقاله به آن پرداخته می‌شود.

۴-۱ تحلیل پایداری در حوزه زمان پیوسته

همانطور که پیشتر توضیح داده شد، سیستم فیزیکی در مواجهه با عدم دریافت بسته داده ارسالی از واحد کنترل‌کننده، از داده ورودی پیش فرض استفاده می‌کند و در آن لحظه وضعیت پایداری سیستم نامشخص می‌باشد. چنانچه سیستم در وضعیت ۱ از مدل پیشنهادی شکل ۲ باشد، ماتریس سیستم $A_S(t)$ بصورت $A_1 = A - BK$ است. اگر سیستم در وضعیت ۲ مدل پیشنهادی قرار گیرد، $A_S(t)$ برابر با A_2 می‌باشد. از اینرو، معادله فضای حالت سیستم سوئیچینگ پیشنهادی که در برگرنده هر دو وضعیت باشد در رابطه (۶) آورده شده است. در این سیستم، سیگنال سوئیچینگ $S(t) \in \{1, 2\}$ مجموعه مدهای کاری سیستم است (بوده که با توجه به آن مشخص می‌شود سیستم در کدامیک از دو وضعیت کاری است). چنانچه سیستم در زمان t_k وضعیت کاری خود (یعنی i) را به یکی از دو وضعیت ($i \in \mathcal{M}$) تغییر دهد و سوئیچ بعدی در زمان t_{k+1} رخ دهد، زمان اقامت T_i در هر وضعیت (زیر سیستم) بصورت رابطه (۸) می‌باشد:

$$[t_k, t_{k+1}) = [t_k, t_k + d_i) \cup [t_k + d_i, t_{k+1}) \quad (8)$$

که در آن d_i زمان ثابت اقامت در هر وضعیت (زیر سیستم) است و $d_i \geq 0$. در این رابطه، زمان اقامت در هر وضعیت مشتمل بر زمانهای ثابت و تصادفی اقامت است. در بازه زمان ثابت توقف $t \in [t_k, t_k + d_i)$ ، سوئیچ کردن مجاز نیست و یا رخ نمی‌دهد. بنابراین، احتمال اینکه سوئیچی از وضعیت کاری i به j ($i \neq j$) صورت پذیرد، برابر با صفر است. در این بازه زمانی، احتمال انتقال وضعیت مارکوف به صورت زیر است:



شکل ۲. مدل سوئیچینگ پیشنهادی برای حمله محرومیت از سرویس با دو وضعیت کاری

^{۱۷} High Order Terms

$$V(x(t), \rho(t)) \triangleq x^T(t)P(\rho(t))x(t) \quad (۱۳)$$

پایدار تصادفی است اگر و فقط اگر ماتریسهای $P_i, i = 1 \dots M$ در آن S^+ مجموعه‌ای از ماتریسهای معین مثبت متقارن حقیقی است، وجود داشته باشند به نحوی که برای $i = 1, \dots, M$ شرط آورده شده در رابطه (۱۴) قابل برآورده کردن باشد. توجه داشته باشید که $P(\rho(t) = i) \triangleq P_i > 0$ (که در آن $\rho(t)$ فرآیند مارکوف است که مقادیر $1, \dots, M$ را میگیرد و با ماتریس انتقال حالت معرفی شده در رابطه (۱۰) بیان می‌شود).

$$A_i^T P_i + P_i A_i + \pi_{ii} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^m \{ \pi_{ij} e^{A_j^T d_j} P_j e^{A_j d_j} \} < 0. \quad (۱۴)$$

این شرط لازم و کافی پایداری لیاپانوف برای سیستم سویچینگ پیشنهادی زمان پیوسته می‌باشد. بطور خاص، برای سیستم سویچینگ زمان پیوسته با دو وضعیت کاری ($M = 2$) معادل دو زیر سیستم شکل ۲، شروط پایداری لیاپانوف بصورت زیر خواهد بود:

$$A_1^T P_1 + P_1 A_1 + \pi_{11} P_1 + \pi_{12} e^{A_2^T d_2} P_2 e^{A_2 d_2} < 0, \quad (۱۵)$$

$$A_2^T P_2 + P_2 A_2 + \pi_{22} P_2 + \pi_{21} e^{A_1^T d_1} P_1 e^{A_1 d_1} < 0.$$

چنانچه بتوان P_1 و P_2 مثبت معینی یافت که شروط (۱۵) را برآورده کنند، سیستم سویچینگ پایدار و در غیر اینصورت، ناپایدار خواهد بود. حل این نامعادلات، از الگوریتم‌های حل ماتریسی خطی قابل حصول است که نمونه آن در بخش شبیه‌سازی برای سیستم مورد مطالعه آورده شده است.

۲-۴ تحلیل پایداری در حوزه زمان گسسته

در این زیر بخش، تحلیل پایداری مدل سویچینگ پیشنهادی در حوزه زمان گسسته آورده شده است. معادله فضای حالت سیستم سویچینگ پیشنهادی که در برگیرنده هر دو وضعیت باشد در رابطه (۷) آورده شده است. در حوزه زمان گسسته همانند حوزه زمان پیوسته، سیگنال سویچینگ $S(k) \in \mathcal{M} \triangleq \{1, 2\}$ می‌باشد. \mathcal{M} مجموعه مودهای کاری سیستم است. چنانچه سیستم در زمان k_n وضعیت کاری خود (یعنی i) را به یکی از دو وضعیت ($i \in \mathcal{M}$) تغییر دهد و سویچ بعدی در زمان k_{n+1} رخ دهد، زمان اقامت T_i در هر وضعیت (زیر سیستم) بصورت رابطه (۱۶) می‌باشد:

$$[k_n, k_{n+1}) = [k_n, k_n + d_i) \cup [k_n + d_i, k_{n+1}) \quad (۱۶)$$

۱-۱-۴ پایداری تصادفی سیستم سویچینگ پیشنهادی زمان پیوسته

برای تحلیل پایداری یک سیستم سویچینگ در حالت زمان پیوسته، از نتیجه مرجع [۱۹] استفاده می‌شود. بردارهای حالت سیستم سویچینگ تصادفی زمان پیوسته با پرش‌های مارکوف بصورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{S(t)} x(t), & t_k < t < t_{k+1} \\ x(t_k) = e^{A_{S_k} d_{S_k}} x(t_k^-), & k = 0, 1, \dots \end{cases} \quad (۱۲)$$

که در آن $x(t)$ بردار متغیر حالت سیستم است. t_k ها، زمان‌های لحظه‌ای برای $k = 0, 1, 2, \dots$ هستند که وضعیت کاری خود را تغییر می‌دهد. t_k^- زمان ماقبل از t_k است. $S(t)$ یک فرآیند مارکوف است مشتمل بر M وضعیت کاری و دارای یک ماتریس احتمال گذار است. ذکر این نکته ضروری است که تحلیل پایداری برای حالتی که ماتریس‌های $A_{S(t)}$ متغیر با زمان باشند ساده نبوده و مرجع [۱۹] نیز تنها موفق به تحلیل شرایط پایداری برای سویچ بین حالات با $A_{S(t)}$ ثابت شده است.

حال سیستم سویچینگ پیشنهادی در رابطه (۶) را در نظر بگیرید. فرض می‌شود که سیستم در زمان t_k به حالت S_k از بین وضعیتها سویچ می‌کند و متغیر حالت $x(t)$ سیستم، در زمان t_k از $x(t_k)$ به $x(t_k + d_{S_k}) = e^{A_{S_k} d_{S_k}} x(t_k + d_{S_k})$ در زمان $t_k + d_{S_k}$ تغییر می‌کند. می‌توان این فاصله $(t_k, t_k + d_{S_k})$ که در آن سیستم مجاز به تغییر وضعیت و سویچ نیست را معادل با یک نقطه زمانی t_k تعبیر نمود، بدین معنی که سیستم یک پرش حالت از حالت اولیه $x(t_k^-)$ به حالت نهایی $e^{A_{S_k} d_{S_k}} x(t_k^-)$ در زمان t_k دارد، به این صورت که $x(t_k^-) \triangleq \lim_{t \rightarrow t_k^-} x(t)$. در این سیستم، $S(t)$ یک فرآیند مارکوف است و دارای ماتریس احتمال گذار/انتقال معرفی شده در رابطه (۹) و (۱۰) است.

با توجه روابط معرفی شده و توضیحات ارائه شده، سیستم سویچینگ رابطه (۶) معادل و هم ارز سیستم پرش مارکوف رابطه (۱۲) می‌باشد. از اینرو، می‌توان از اثبات پایداری ارائه شده در قضیه ۱ مقاله [۱۹] برای پایداری سیستم پرش مارکوف استفاده نمود و شرایط پایداری تصادفی سیستم سویچینگ پیشنهادی در رابطه (۶) را پیدا نمود. قضیه پایداری برای سیستم سویچینگ پیشنهادی در رابطه (۶) و شرایط لازم و کافی برای آن با توجه نتایج مرجع [۱۹] اینگونه ارائه می‌شود:

قضیه ۱- سیستم سویچینگ پیشنهادی معرفی شده در رابطه (۶) و با تعریف تابع لیاپانوف زیر،

$$\xi(t_{k+1}) = A_{\rho_k}^{d_{\rho_k}} \xi(t_k) \quad (21)$$

برای تحلیل پایداری چنین سیستمی، از یک فضای زمان انتزاعی استفاده می‌کنند [۴۵]، بدین معنی که رابطه (۲۱) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\xi(k+1) = A_{\rho(k)} \xi(k) \quad (22)$$

که در آن k عملاً اندیس زمانهای سوئیچ است و $A_{\rho(k)}$ ماتریس موثر انتقال وضعیت. برای مثال ممکن است $t_1 = 3$ و $t_2 = 10$ باشد، اما k در این حالت فقط یک واحد افزایش یافته است.

سیستم سوئیچینگ رابطه (۷) می‌تواند بصورت معادل و هم ارز سیستم پرش مارکوف رابطه (۲۲) در نظر گرفته شود. با توجه به اثبات پایداری ارائه شده در مرجع [۴۵] برای پایداری تصادفی سیستم پرش مارکوف، سیستم سوئیچینگ پیشنهادی در رابطه (۷) نیز می‌تواند تحت شرایطی پایدار تصادفی باشد. شرایط لازم و کافی برای پایداری تصادفی سیستم سوئیچینگ پیشنهادی زمان گسسته در رابطه (۷) (که معادل و هم ارز سیستم رابطه (۲۲) است) در قضیه ۲ آورده شده است (از ذکر مجدد اثبات که مشابه [۴۵] است صرف نظر می‌شود).

قضیه ۲- سیستم سوئیچینگ پیشنهادی معرفی شده در رابطه (۷) و با تعریف تابع لیانوف زیر،

$$V(\xi(k), \rho(k)) \triangleq \xi^T(k) P(\rho(k)) \xi(k) \quad (23)$$

که در آن $P(\rho(k) = i) \triangleq P_i > 0$ است، پایدار تصادفی است اگر و فقط اگر ماتریس $P_i (P_i \in S^+)$ که $i \in \mathcal{M}$ است و S^+ مجموعه‌ای از ماتریس معین مثبت متقارن حقیقی است، وجود داشته باشد به نحوی که برای هر $i \in \mathcal{M}$ شرط رابطه (۲۴) برقرار باشد.

$$\gamma_{ii} A_i^T P_i A_i + \sum_{j=1, j \neq i}^m \{ \gamma_{ij} (A_j^T)^{d_j} P_j (A_j)^{d_j} \} - P_i < 0 \quad (24)$$

که در آن A_k ماتریس انتقال حالت ثابت (برای یک واحد زمانی) در وضعیت k ام است. بدیهی است که مانند حالت زمان پیوسته، چون در مساله حمله محرومیت از سرویس با توجه به مدل مارکوف ارایه شده در شکل ۲ تنها دو وضعیت داریم، می‌توان شکل ساده‌تری از رابطه فوق را با دو ضابطه نوشت. در ادامه مقاله، قضایای ارائه شده بر روی چند سیستم خطی کنترل شده تحت شبکه با احتمال از دست رفتن داده در مسیر پیشرو به عنوان نمونه شبیه‌سازی می‌شوند و درستی شرایط پایداری معرفی شده در این مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

که در آن d_i زمان ثابت اقامت در هر وضعیت (زیر سیستم) است و $d_i \geq 0$. در این رابطه، زمان اقامت در هر وضعیت مشتمل بر زمانهای ثابت و تصادفی اقامت است. در بازه زمان ثابت توقف $k \in [k_n, k_n + d_i]$ ، سوئیچ کردن مجاز نیست و رخ نمی‌دهد. بنابراین، احتمال اینکه سوئیچی در این بازه از وضعیت کاری i به j ($i \neq j$) صورت پذیرد، برابر با صفر است. در این بازه زمانی، احتمال انتقال وضعیت مارکوف به صورت زیر است:

$$Pr\{s(k+1) = j | s(k) = i\} = \begin{cases} 0, & j \neq i \\ 1, & j = i \end{cases} \quad (17)$$

برای بازه زمانی تصادفی اقامت $k \geq k_n + d_i$ ، احتمال گذار/انتقال وضعیت مارکوف به صورت زیر است:

$$Pr\{s(k+1) = j | s(k) = i\} = \gamma_{ij} \quad (18)$$

و می‌دانیم که احتمال گذار مارکوف غیرمنفی است ($\gamma_{ij} \geq 0$). چنانچه سوئیچ بعدی در k_{n+1} رخ دهد، زمان اقامت تصادفی η_i در وضعیت کاری i بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_i \triangleq k_{n+1} - (k_n + d_i) \quad (19)$$

تعریف پایداری تصادفی برای سیستم سوئیچینگ پیشنهادی زمان گسسته در رابطه (۷) و شرایط لازم و کافی برای آن (که مشابه آنچه در بخش قبل برای سیستم سوئیچینگ زمان پیوسته توضیح داده شد) در مرجع [۴۶] ارائه شده است.

تعریف ۲- اگر $x(k)$ مسیر متغیر حالت سیستم سوئیچینگ زمان گسسته باشد، سیستم پایدار تصادفی است اگر

$$E\{\sum_{k=0}^{\infty} \|x(k)\|^2 | x_0, s_0\} < \infty \quad (20)$$

برای هر حالت اولیه سیستم $x_0 \in \mathbb{R}^n$ و هر وضعیت اولیه $s_0 \in \mathcal{M}$.

۴_۲_۱ پایداری تصادفی سیستم سوئیچینگ پیشنهادی زمان گسسته

فرض کنید که سیستم سوئیچینگ در لحظه t_k به حالت/وضعیت ρ_k (یا همان S_k) سوئیچ می‌کند و سپس تا رسیدن به لحظه سوئیچ بعدی، مجموعاً d_{ρ_k} واحد زمانی در این وضعیت باقی می‌ماند. مانند گذشته فرض می‌کنیم این بازه زمانی از دو بخش ثابت حداقلی و سپس تصادفی (با توزیع هندسی تابع احتمال گذار مدل مارکوف) ساخته شده است. در اینصورت، اگر ξ را یک تابع بردار حالت کمکی برای نمایش وضعیت سیستم در نظر بگیریم، پس از گذشت d_{ρ_k} واحد زمانی، می‌توانیم وضعیت سیستم را عملاً در ابتدای t_{k+1} چنین بنویسیم:

$$\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} 0.7 & 0 \\ 0 & -0.9 \end{bmatrix}}_K \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

که پس از اعمال ورودی کنترلی، معادله فضای حالت سیستم حلقه بسته بصورت رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -0.4 & 0 \\ 0 & -0.4 \end{bmatrix}}_{A_1} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

سیستم حلقه بسته پایدار است و مقادیر ویژه ماتریس A_1 دارای بخش حقیقی منفی می‌باشند. چنانچه شبکه ارتباطی (لینک پیشرو) تحت حمله محرومیت سرویس قرار گیرد، سیستم ورودی کنترلی دریافت نمی‌کند. فرض کنید در این وضعیت، مقدار صفر بصورت پیش فرض به سیستم فیزیکی اعمال شود (سیستم حلقه باز). این نمونه یک سیستم سویچینگ با دو وضعیت کاری است که بدلیل حمله بین وضعیتهای پایدار و ناپایدار تغییر وضعیت می‌دهد.

بنابراین، معادله فضای حالت سیستم حلقه بسته زمان پیوسته مطابق سیستم سویچینگ معرفی شده در رابطه (۶)، بصورت $\dot{x}(t) = A_S(t)x(t)$ در خواهد آمد که $A_S(t)$ در وضعیت ۱، برابر با A_1 (پایدار) و در وضعیت کاری ۲، برابر با A_2 (ناپایدار) است. در وضعیت ۲، شبکه ارتباطی بین واحد کنترل کننده و سیستم تحت حمله محرومیت سرویس است.

در این مطالعه موردی، فرض می‌کنیم ماتریس احتمال انتقال/گذار مارکوف که بیانگر یک حمله DoS نسبتاً سنگین است، بصورت زیر باشد:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.9 \\ 0.7 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (28)$$

که در اینصورت ماتریس π متناظر آن برابر خواهد بود با:

$$\pi = \begin{bmatrix} -0.9 & 0.9 \\ 0.7 & -0.7 \end{bmatrix} \quad (29)$$

برای بررسی وضعیت پایداری این سیستم از شرایط بدست آمده از رابطه (۱۵) استفاده می‌کنیم. نامعادلات ماتریسی (۱۵) در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از CVX Toolbox به ازاء مقادیر مختلف d_1 و d_2 (زمانهای اقامت حداقلی در وضعیت ۱ و وضعیت ۲) حل گردید. در صورت یافتن پاسخهای متقارن مثبت معین P_1 و P_2 که نامعادله را برآورده کنند، سیستم پایدار است. شکل ۳، تخمین پایداری سیستم مورد مطالعه به ازاء مقادیر مختلف d_1 و d_2 بر اساس خروجی قضیه را نشان می‌دهد. نقاط آبی برای نمایش نواحی پایداری سیستم و نقاط قرمز رنگ برای نمایش نواحی ناپایداری استفاده شده‌اند. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، پایداری

۵. مطالعات موردی، ارزیابی و شبیه سازی

در این بخش از مقاله برای ارزیابی صحت شرایط پایداری لیاپانوف بدست آمده در بخش چهارم، دو مورد از سیستم خطی کنترل شده تحت شبکه در حین حمله محرومیت سرویس جهت بررسی وضعیت‌های مختلف در حوزه زمان پیوسته و زمان گسسته شبیه سازی و ارائه شده است. یافته‌های دیگری نیز جهت مقاوم سازی سیستم تحت حمله نیز ارائه خواهند شد.

ابتدا، برای بررسی قضایا و یا شرایط پایداری معرفی شده در بخش قبل، یک سیستم ریاضیاتی بصورت زمان پیوسته و زمان گسسته مطالعه و شرایط پایداری آن تحت حمله محرومیت سرویس تحلیل می‌شود. در ادامه، سیستم موتور DC که یکی از کاربردی‌ترین و متداول‌ترین سیستم‌های خطی در کنترل خطی کلاسیک است، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و یک روش برای پایدار نگه داشتن آن تحت حمله پیشنهاد می‌شود.

۵-۱ مورد مطالعاتی سیستم زمان پیوسته

در این زیربخش، وضعیت پایداری یک سیستم دینامیکی خطی کنترل شده تحت حمله محرومیت سرویس (در مسیر پیشرو) بررسی می‌شود. معادلات فضای حالت این سیستم در رابطه (۲۵) آمده است. این سیستم فی‌النبغه ناپایدار است زیرا مقادیر ویژه ماتریس A_2 دارای بخش حقیقی غیرمنفی (مثبت) می‌باشد.

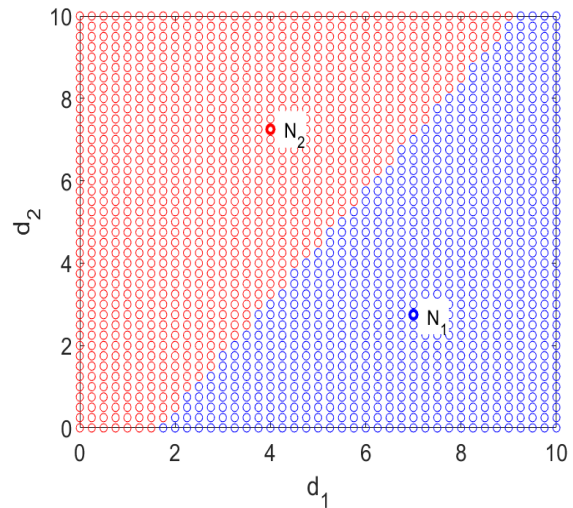
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & -1.3 \end{bmatrix}}_{A_2} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_D \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}$$

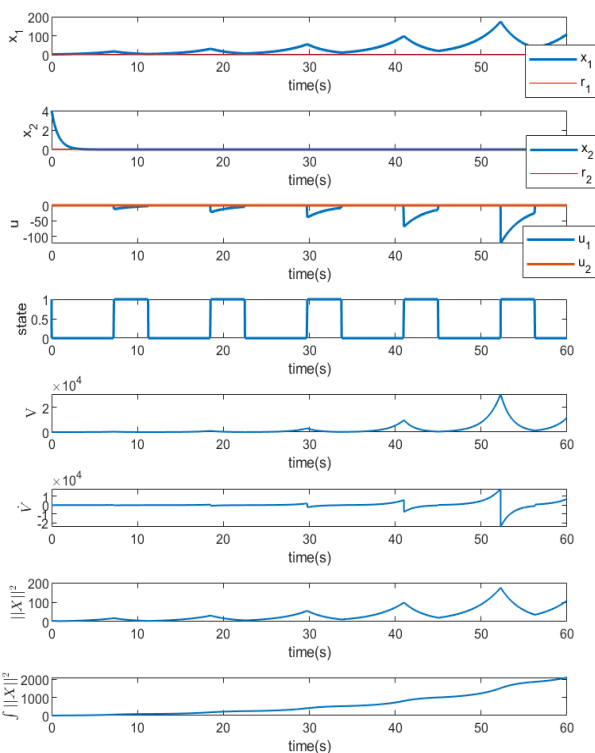
اما این سیستم کنترل پذیر حالت است و بصورت حلقه بسته و با استفاده از کنترل کننده فیدبک حالت خطی، قابل کنترل می‌شود. هدف از کنترل این سیستم، پایداری متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. برای دستیابی به این هدف لازم است مقادیر ویژه ماتریس سیستم حلقه بسته دارای بخش حقیقی اکیدا منفی باشد. بنابراین با طراحی کنترل کننده فیدبک حالت خطی و اعمال ورودی کنترلی مناسب، هدف پایداری برآورده خواهد شد. در این مطالعه موردی، ورودی کنترلی زیر برای سیستم استفاده خواهد شد.

سیستم به مقادیر زمان اقامت در هر وضعیت وابسته است. با افزایش زمان اقامت حداقلی (ثابت) در زیر سیستم پایدار، سیستم کلی در ناحیه کاری پایدار و با افزایش زمان اقامت ثابت در زیر سیستم ناپایدار، سیستم در ناحیه کاری ناپایدار قرار خواهد گرفت. مرز جدا کننده این دو ناحیه حد تاب آوری این سیستم را در برابر حمله محرومیت از سرویس نشان می‌دهد.

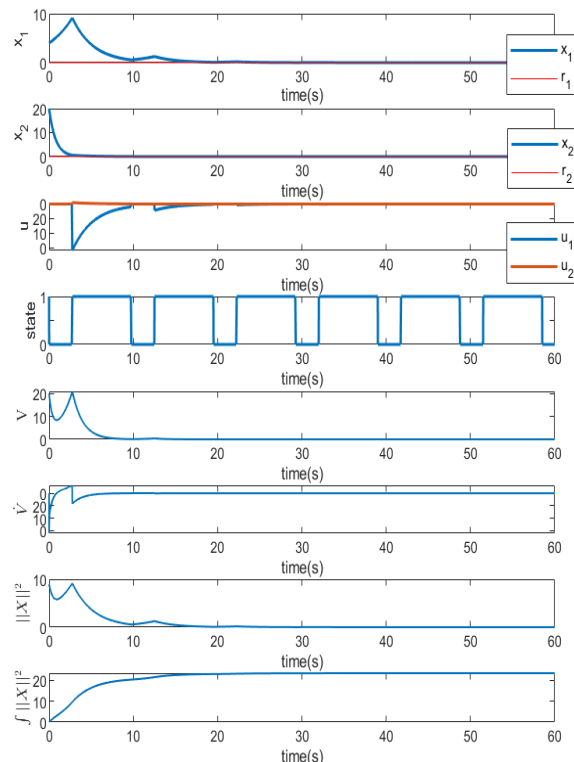
برای بررسی صحت نتایج تئوریک بدست آمده با استفاده از قضیه ۱، سیستم تحت حمله محرومیت سرویس با مشخصات ذکر شده در محیط MATLAB Simulink پیاده سازی و دو نقطه کار (بر اساس زمان حداقلی اقامت در هر یک از دو وضعیت)، برای بررسی انتخاب شدند. دو نقطه مذکور $N_1 = [7, 2.75]$ و $N_2 = [4, 7.25]$ هستند که در شکل ۳ نیز نمایش داده شده اند. همانگونه که در شلکهای ۴ و ۵ دیده می‌شود، مطابق پیش بینی تئوریک، سیستمی که حول نقطه N_1 کار میکند، پایدار، و سیستمی که حول نقطه N_2 کار می‌کند، ناپایدار می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی با پیش‌بینی حل تئوری کاملاً سازگار است. در این شکلها وضعیت عبور بسته (وضعیت ۱ مارکوف) با یک و عدم عبور بسته (وضعیت ۲ مارکوف) با صفر نمایش داده شده است. این



شکل ۳. شبیه‌سازی سیستم نمونه اول (حوزه زمان پیوسته): ناحیه پایداری سیستم سوئیچینگ براساس مدت زمان اقامت در هر زیر سیستم، d_1 مدت زمان اقامت در وضعیت ۱ (زیر سیستم پایدار) و d_2 مدت زمان اقامت در وضعیت ۲ (زیر سیستم ناپایدار)، رسم شده است. نقاط آبی نمایانگر ناحیه پایداری و نقاط قرمز نشانگر ناحیه ناپایداری بر اساس قضیه است. دو نقطه کار $N_1 = [7, 2.75]$ و $N_2 = [4, 7.25]$ برای شبیه‌سازی استفاده می‌شوند.



شکل ۵. شبیه‌سازی سیستم نمونه اول (حوزه زمان پیوسته) در نقطه کار N_2 که در آن حداقل زمان اقامت در وضعیت ۱ برابر ۴ و حداقل زمان اقامت در وضعیت ۲ برابر ۷،۲۵ است. قضیه ۱، ناپایداری چنین سیستمی را پیش‌بینی می‌کند و مقدار تابع لیاپانوف در نتیجه شبیه‌سازی نیز آنرا تایید می‌کند.



شکل ۴. شبیه‌سازی سیستم نمونه اول (حوزه زمان پیوسته) در نقطه کار N_1 که در آن حداقل زمان اقامت در وضعیت ۱ برابر ۷ و حداقل زمان اقامت در وضعیت ۲ برابر ۲،۷۵ است. قضیه ۱، پایداری چنین سیستمی را پیش‌بینی می‌کند و مقدار تابع لیاپانوف در نتیجه شبیه‌سازی نیز آنرا تایید می‌کند.

شده است. از اینرو، ورودی کنترلی متناظر در حوزه گسسته به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} 0.6986 & 0 \\ 0 & -0.8982 \end{bmatrix}}_K \begin{bmatrix} \zeta_1(k) \\ \zeta_2(k) \end{bmatrix} \quad (31)$$

که پس از اعمال ورودی کنترلی، معادله فضای حالت سیستم گسسته حلقه بسته بصورت رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\begin{bmatrix} \zeta_1(k+1) \\ \zeta_2(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.9960 & 0 \\ 0 & 0.9960 \end{bmatrix}}_{A_1} \begin{bmatrix} \zeta_1(k) \\ \zeta_2(k) \end{bmatrix} \quad (32)$$

همانند آنچه در قبل توضیح داده شد، سیستم فیزیکی در مواجهه با عدم دریافت بسته داده ورودی کنترلی، از مقدار پیش فرض صفر برای ورودی استفاده می‌کند (سیستم حلقه باز). A_2 نماینده یک (زیر) سیستم ناپایدار است زیرا برخی از مقادیر ویژه اش دارای اندازه بزرگتر از یک هستند. A_1 نماینده یک (زیر) سیستم پایدار است زیرا تک تک مقادیر ویژه ماتریس A_1 دارای اندازه ای کوچکتر از یک هستند. معادله دینامیکی سیستم سویچینگ زمان گسسته در رابطه (۷) معرفی شده بود. در مورد این مثال، $A_S(k)$ برای وضعیت دریافت ورودی از کنترل‌کننده برابر با A_1 و برای وضعیت عدم دریافت ورودی کنترلی (حین حمله محرومیت سرویس) برابر با A_2 خواهد بود. همچنین، ماتریس احتمال انتقال/گذار مارکوف (که بیانگر یک حمله DoS است) همانند رابطه (۲۸) در نظر گرفته می‌شود.

برای بررسی وضعیت پایداری این سیستم از شرایط بدست آمده از رابطه (۲۴) استفاده می‌کنیم. نامعادلات ماتریسی (۲۴) در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از CVX Toolbox به ازاء مقادیر مختلف d_1 و d_2 (زمانهای اقامت حداقلی در وضعیت ۱ و وضعیت ۲) حل گردید. در صورت یافتن پاسخهای متقارن مثبت معین P_1 و P_2 که نامعادله را برآورده کنند، سیستم پایدار می‌باشد شکل ۶، وضعیت پایداری سیستم مورد مطالعه را به ازاء مقادیر مختلف d_1 و d_2 را نشان می‌دهد. نقاط آبی برای نمایش نواحی پایداری سیستم و نقاط قرمز رنگ برای نمایش نواحی ناپایداری استفاده شده‌اند. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، پایداری سیستم به مقادیر زمان اقامت در هر وضعیت وابسته است. با افزایش زمان اقامت حداقلی (ثابت) در زیر سیستم پایدار، سیستم کلی در ناحیه کاری پایدار و با افزایش زمان اقامت ثابت در زیر سیستم ناپایدار،

موضوع بخصوص با مشاهده مقدار انتگرال $\|x(t)\|^2$ که مطابق رابطه (۱۱) برای پایداری، باید محدود باقی بماند، قابل تایید است.

۲_۵ مورد مطالعاتی سیستم زمان گسسته

در این زیربخش، به بررسی وضعیت پایداری یک سیستم دینامیکی خطی گسسته کنترل‌شده تحت شبکه حین حمله محرومیت سرویس پرداخته می‌شود. در این مثال نیز سیستم بین دو وضعیت ناپایدار و وضعیت پایدار سویچ می‌کند. در این زیر بخش، سیستم پیوسته معرفی شده در مورد مطالعاتی ۱ به صورت گسسته بازنویسی می‌شود. برای گسسته‌سازی از روش دو خطی^{۱۸} (تاسیتین^{۱۹}) استفاده می‌شود که پرکاربردترین و متداولترین روش می‌باشد. با این روش سیستم گسسته‌شده تا فرکانس‌های بالاتری (نسبت به سایر روشها) رفتار مشابه سیستم پیوسته را از خود نشان می‌دهد. با این روش، نقاط نیم صفحه سمت چپ در صفحه مختصات مختلط (حوزه لاپلاس S) به نقاط درون دایره واحد در صفحه مختصات مختلط (حوزه گسسته Z) نگاشت می‌شوند. برای گسسته‌سازی سیستم پیوسته، لازم است زمان نمونه‌برداری T_S به اندازه کافی کوچک انتخاب شود. معادلات سیستم پیوسته معرفی شده در رابطه (۲۵)، با در نظر گرفتن $T_S = 0.01$ s، بصورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \zeta_1(k+1) \\ \zeta_2(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1.003 & 0 \\ 0 & 0.9871 \end{bmatrix}}_{A_2} \begin{bmatrix} \zeta_1(k) \\ \zeta_2(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0.01002 & 0 \\ 0 & 0.009935 \end{bmatrix}}_B \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k+1) \\ y_2(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1.002 & 0 \\ 0 & 0.9935 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} \zeta_1(k) \\ \zeta_2(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0.005008 & 0 \\ 0 & 0.004968 \end{bmatrix}}_D \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix}$$

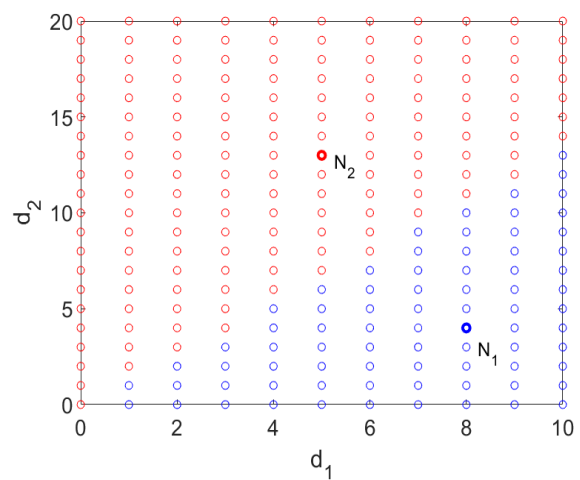
که در آن ζ بردار متغیرهای حالت سیستم زمان-گسسته و متناظر با بردار متغیرهای حالت x در سیستم زمان-پیوسته است. در این مطالعه موردی، تمامی موارد مشابه سیستم پیوسته در نظر گرفته

^{۱۸} Tustin

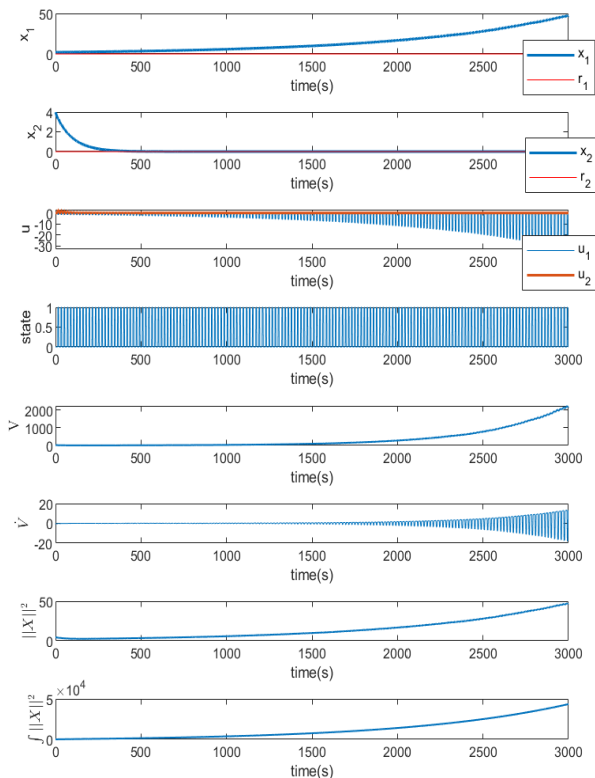
^{۱۹} Bilinear

سیستم در ناحیه کاری ناپایدار قرار خواهد گرفت. مرز جدا کننده این دو ناحیه حد تاب آوری این سیستم را در برابر حمله محرومیت از سرویس نشان می‌دهد.

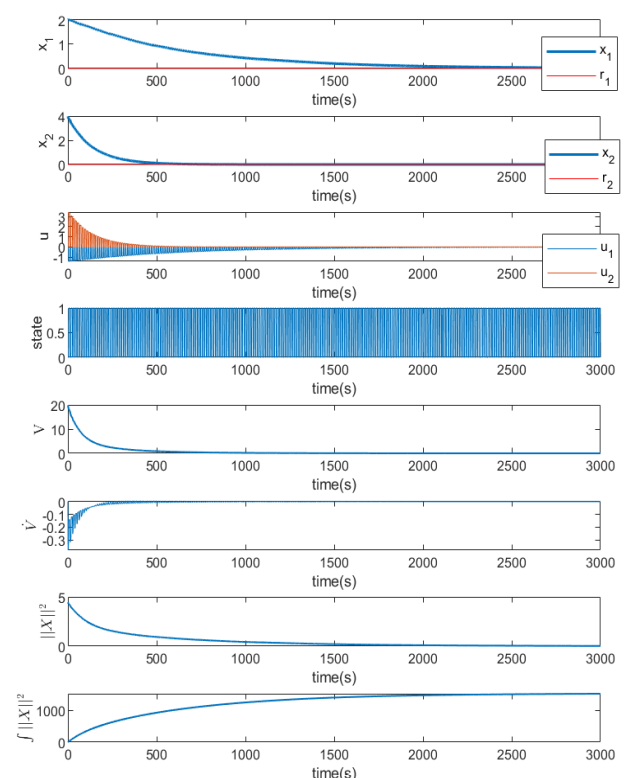
برای بررسی صحت نتایج تئوریک بدست آمده با استفاده از قضیه ۲، سیستم تحت حمله محرومیت سرویس با مشخصات ذکر شده در محیط MATLAB Simulink پیاده سازی و دو نقطه کار (بر اساس زمان حداقلی اقامت در هر یک از دو وضعیت)، برای بررسی انتخاب شدند. دو نقطه مذکور $N_1 = [8, 4]$ و $N_2 = [5, 13]$ هستند که در شکل ۶ نیز نمایش داده شده اند. همانگونه که در شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود، مطابق پیش بینی تئوریک، سیستمی که حول نقطه N_1 کار میکند، پایدار، و سیستمی که حول نقطه N_2 کار می‌کند، ناپایدار است. این موضوع بخصوص با مشاهده مقدار سیگمای $\|x(t)\|^2$ که مطابق رابطه (۲۰) برای پایداری، باید محدود باقی بماند، قابل تایید است. در این شکلها وضعیت عبور بسته (وضعیت ۱ مارکوف) با یک، و عدم عبور بسته (وضعیت ۲ مارکوف) با صفر نمایش داده شده است.



شکل ۶. شبیه‌سازی (حوزه زمان گسسته): ناحیه پایداری سیستم مطالعاتی ۳ کنترل شده تحت شبکه براساس مدت زمان اقامت در هر وضعیت (زیر سیستم)، d_1 مدت زمان اقامت در وضعیت ۱ (سیستم حلقه بسته/پایدار) و d_2 مدت زمان اقامت در وضعیت ۲ (سیستم حلقه باز- با ورودی صفر/ ناپایدار)، نقاط آبی نمایانگر ناحیه پایداری سیستم و نقاط قرمز نشانگر ناحیه ناپایداری است. دو نقطه کار $N_1 = [8, 4]$ و $N_2 = [5, 13]$ برای شبیه سازی استفاده می‌شوند.



شکل ۸. شبیه‌سازی سیستم نمونه دوم (حوزه زمان گسسته) در نقطه کار N_2 که در آن حداقل زمان اقامت در وضعیت ۱ برابر ۵ و حداقل زمان اقامت در وضعیت ۲ برابر ۱۳ است. قضیه ۲، ناپایداری چنین سیستمی را پیش بینی می‌کند و مقدار تابع لیاپانوف در نتیجه شبیه سازی نیز آنرا تایید می‌کند.



شکل ۷. شبیه‌سازی سیستم نمونه دوم (حوزه زمان گسسته) در نقطه کار N_1 که در آن حداقل زمان اقامت در وضعیت ۱ برابر ۸ و حداقل زمان اقامت در وضعیت ۲ برابر ۴ است. قضیه ۲، پایداری چنین سیستمی را پیش بینی می‌کند و مقدار تابع لیاپانوف در نتیجه شبیه سازی نیز آنرا تایید می‌کند.

با جایگذاری (۳۵) در (۳۴) خواهیم داشت:

$$\dot{z}(t) = \frac{(A - BK)z(t)}{\tilde{A}} \quad (36)$$

که در آن K ، بردار بهره فیدبک حالت است و به نحوی طراحی می‌شود تا مقادیر ویژه ماتریس \tilde{A} دارای قسمت حقیقی منفی باشد و سیستم پایدار شود. در نهایت، با طراحی صحیح K ، مولفه‌های بردار $z(t)$ به صفر همگرا می‌شود یعنی بردار متغیرهای حالت $x(t)$ به بردار ورودی مرجع ثابت v همگرا شده است.

در این مطالعه، برای برآورده شدن هدف کنترلی، بردار بهره فیدبک حالت به صورت $k = [0.0071 \quad 0.4167]$ در نظر گرفته می‌شود. با این انتخاب، ماتریس سیستم حلقه بسته کنترل شده تحت شبکه در صورتی که شبکه مورد حمله نباشد، بصورت زیر خواهد بود:

$$\tilde{A} = A - BK = \begin{bmatrix} -1.0 & 1 \\ -0.0343 & -2.8335 \end{bmatrix} \quad (37)$$

چنانچه مشابه مثالهای قبل بخواهیم بیان کنیم، ماتریس A ، ماتریس سیستم حلقه باز (یعنی A_1) و ماتریس \tilde{A} ، ماتریس سیستم حلقه بسته (یعنی A_1) است.

در این مطالعه موردی، ابتدا فرض می‌شود چنانچه شبکه ارتباطی بین سیستم موتور DC و واحد کنترل تحت حمله محرومیت سرویس قرار بگیرد و سیستم فیزیکی ورودی کنترلی را دریافت نکند، از مقدار پیش فرض به عنوان ورودی استفاده می‌کند. هدف کنترلی مورد نظر اینست که متغیرهای حالت سیستم فیزیکی بتوانند به بردار مرجع ثابت تعیین شده همگرا شوند. این بدان معنی است که در رابطه (۴)، مقدار متغیر کمکی $z(t)$ به بردار صفر همگرا شود (یا بطور معادل $x(t)$ به بردار مرجع $\begin{bmatrix} r_1 = 1 \\ r_2 = 1.0 \end{bmatrix}$ همگرا شود).

۵_۳_۱ حالت ورودی پیش فرض صفر

همانطور که در ابتدای این بخش (و مقاله) توضیح داده شد، سیستمهای کنترل شده تحت شبکه هنگام عدم دریافت ورودی از طریق کانال، اغلب از یک مقدار پیش فرض استفاده می‌کنند. در این مطالعه موردی فرض شده است که سیستم از مقدار پیش فرض صفر استفاده می‌کند. مطابق تعریف پایداری سیستمهای زمان-پیوسته که در رابطه (۱۱) ارایه گردید، انتگرال مقادیر $\|x(t)\|^2$ تا بینهایت باید محدود باشد. چون مقادیر انتگرال گیری شده همه مثبت هستند، این بطور ضمنی به معنی آنست که مقدار $\|x(t)\|^2$ از یک زمان به بعد عملاً به صفر باید برسد تا مقدار انتگرال را بیشتر افزایش نداده و نتیجه محدود بماند. برای حالتی که مقدار مرجع

۵_۳ مورد مطالعاتی سیستم موتور DC کنترل شده

تحت شبکه و پیشنهاد روش پایدار سازی

در این زیربخش، وضعیت پایداری یک سیستم موتور DC کنترل شده تحت شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضمناً از نتایج قضیه‌های عنوان شده، یک پیشنهاد برای پایدار سازی آن تحت حمله محرومیت سرویس (DoS) ارایه می‌شود.

موتور DC یکی از پر استفاده ترین و متداول ترین سیستمهای خطی در کنترل کلاسیک است. همانطور که پیشتر ذکر شد، فرض شده است که شبکه ارتباطی بین واحد کنترل کننده و سیستم تحت حمله محرومیت سرویس (DoS) است و احتمال از دست رفتن داده در مسیر پیشرو وجود دارد. فرض می‌شود که ماتریس گذار مدل مارکوف مشابه رابطه (۲۸) بوده و $d_1 = 0.1$ و $d_2 = 0.4$ باشد. این معادل یک اتلاف بیش از ۸۰٪ در مسیر پیشرو است.

معادلات فضای حالت موتور DC مورد مطالعه به صورت زیر است [۴۶]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{k_t}{J} \\ -\frac{k_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{B} \end{bmatrix}}_B u(t) \quad (38)$$

که متغیرهای حالت آن $x_1(t) = \omega(t)$ و $x_2(t) = i_a(t)$ بوده و $u(t)$ ولتاژ ورودی کنترلی می‌باشد. پارامترهای سیستم، $J = 0.01 \text{ kg.m}^2$ ، $B = 0.1 \text{ N.m.s/rad}$ ، $k_b = 0.01 \text{ v.s}$ ، $k_t = 0.01 \text{ N.m/rad}$ ، $R_a = 1 \Omega$ ، $L_a = 0.5 \text{ H}$ است.

در این مثال، هدف از کنترل سیستم موتور DC تحت شبکه این است که بردار متغیرهای حالت سیستم به بردار ورودی مرجع ثابت v همگرا شود. پس، خطای کنترلی مطابق با رابطه (۴) بصورت $z(t) = x(t) - v$ تعریف می‌شود. معادلات دینامیکی خطا با توجه به رابطه (۳۳) بدست می‌آید.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Av \quad (39)$$

واحد کنترل کننده، ورودی کنترلی $u(t)$ را به نحوی طراحی می‌کند که معادلات دینامیکی خطا پس از اعمال ورودی بصورت $\dot{z}(t) = \tilde{A}z(t)$ شود (مطابق رابطه (۴)) و مقادیر ویژه ماتریس \tilde{A} قسمت حقیقی منفی داشته باشد. چنانچه داشته باشیم:

$$\begin{aligned} Bu(t) &= -B \underbrace{[k_1 \quad k_2]}_K z(t) - Av \\ &= -BKz(t) - (A - BK)v \end{aligned} \quad (40)$$

$$Bu_p(t) = -Ax(t) \quad (39)$$

این عملاً به معنی صفر شدن A_2 موثر در این وضعیت خواهد بود. با ضرب B^T در سمت چپ تساوی فوق و پس از ساده سازی می توان نوشت:

$$u_p(t) = -(B^T B)^{-1} B^T A x(t) \quad (40)$$

این مقدار پیش فرض u_p در صورت عدم دریافت ورودی کنترلی به سیستم اعمال می‌شود که برای سیستم موتور DC مورد مطالعه، بصورت زیر محاسبه شده است:

$$u_p(t) = [0.01 \quad 1] x(t) \quad (41)$$

لازم به ذکر است که سیستم (فیزیکی) از طریق سنسورها از آخرین مقادیر $x(t)$ مطلع می‌باشد. برای اعمال چنین ورودی پیش فرضی در ورودی هنگام نرسیدن سیگنال کنترلی، کافی است یک واحد هوشمند روی سیستم فیزیکی نصب شود تا کار تولید ورودی لازم برای حفظ وضعیت سیستم را در موقع لزوم انجام دهد. خروجی های موتور DC هنگامی که از روش حالت ورودی پیشنهادی پیش فرض تطبیقی استفاده می‌کند در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقدار محدود انتگرال $\|z\|^2$ به وضوح نشان می‌دهد که سیستم تحت حمله پایدار مانده است. دو شکل اول این آزمایش حالات سیستم را نشان می‌دهند و همانطور که دیده می‌شود، به مقادیر مرجع همگرا شده اند.

چنانچه نامعادلات ماتریسی (۱۵) را در چنین حالتی (با $A_2 = 0$ و A_1 پایدار) در نرم‌افزار MATLAB با استفاده از CVX Toolbox حل کنیم، برای تمامی نقاط فضای d_1, d_2 مقادیر $P_1 > 0$ و $P_2 > 0$ یافت خواهد شد و سیستم پایدار خواهد بود. این موضوع را می‌توان بصورت تئوریک از روی (۱۵) نیز اثبات نمود. اما راه ساده تری برای درک این امر وجود دارد. با در نظر گرفتن اینکه در هنگام از بین رفتن بسته‌ها، وضعیت سیستم ثابت نگاه داشته شده تا پس از رسیدن بسته کنترلی بعدی، ادامه فرآیند کنترل دنبال شود، موضوع فوق بدیهی بنظر می‌رسد. باید توجه داشت که تابع لیاپانوف تابعی از وضعیت سیستم است و چون وضعیت سیستم در هنگام از دست رفتن داده با روش پیشنهادی ثابت باقی می‌ماند، مقدار تابع لیاپانوف افزایش نخواهد یافت. در حالتی که داده کنترلی به سیستم می‌رسد نیز چون طراحی کنترل کننده به گونه ای بوده است که A_1 مقادیر ویژه منفی داشته و پایدار باشد، سیستم به کاهش مقدار تابع لیاپانوف ادامه می‌دهد. روش پیشنهادی بکارگرفته شده در این مطالعه موردی جهت مقابله با حمله محرومیت سرویس برای سایر سیستم‌های خطی کنترل شونده تحت شبکه نیز بطور مشابه قابل اعمال است.

کنترلی غیر صفر باشد، همین مفهوم را میتوان مطابق رابطه (۴) برای $z(t)$ نوشت.

شکل ۹ متغیرهای حالت سیستم موتور DC به همراه $\|z(t)\|^2$ و انتگرال آن را نشان می‌دهد. مطابق تعریف رابطه (۱۱) از پایداری، این سیستم ناپایدار است زیرا مقدار انتگرال $\|z(t)\|^2$ اکیدا افزایشی و در بینهایت نامحدود است. در ادامه این بخش، یک روش پیشنهادی که از قضایای مطروحه اقتباس شده است جهت پایداری سازی این سیستم تحت حمله، ارائه می‌شود.

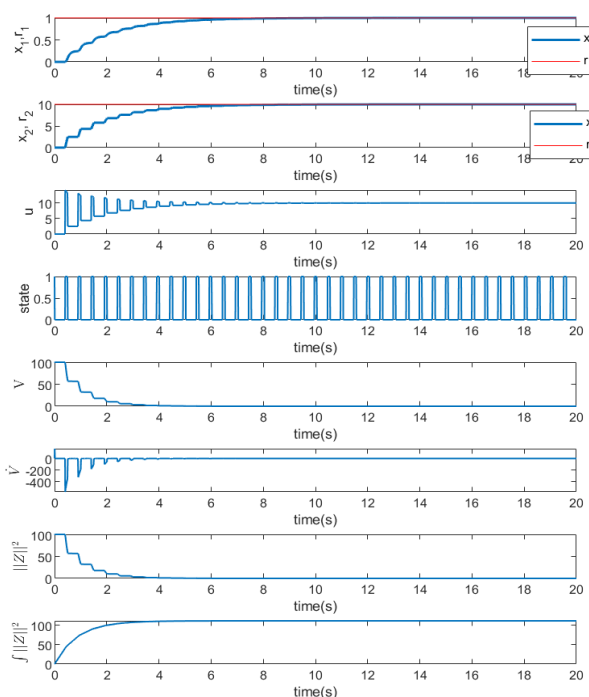
۵_۳_۲ حالت ورودی پیش فرض تطبیقی - روش پیشنهادی پایداری سازی

در این بخش نشان داده می‌شود که چگونه با استفاده از نتیجه قضیه ۱ می‌توان سیستم موتور DC معرفی شده را تحت حملات DoS سنگین، پایدار نگاه داشت. این روش بطور مشابه برای بسیاری از سیستم‌های خطی کنترل شده تحت شبکه نیز قابل اعمال است. ایده اصلی این روش پیشنهادی، ثابت نگاه داشتن وضعیت سیستم فیزیکی در بازه های نرسیدن بسته کنترلی برای جلوگیری از اعمال ورودی نامناسب و تغییر حالت سیستم و در نتیجه ناپایداری احتمالی است. چنانچه موفق شویم که در زمانهای نرسیدن بسته، حالت سیستم فیزیکی بدون تغییر نگه داشته شود، کنترل کننده در بازه هایی که می‌تواند بسته خود را به سیستم برساند، هدف کنترلی را برآورده خواهد کرد. این بطور شهودی به معنای توقف حالت سیستم در بازه‌های خاموشی و پیگیری مساله کنترل سیستم پس از دریافت سیگنال کنترلی است. با حذف زمانهای توقف، گویی کنترل سیستم بطور پیوسته (ولی عملاً در زمان طولانی تری) صورت پذیرفته است.

برای حفظ متغیرهای حالت سیستم سوئیچینگ که بصورت رابطه (۶) بیان شده است، کافی است در بازه‌های عدم دریافت سیگنال داده ورودی کنترلی از بستر شبکه ارتباطی، شرط $\dot{x}(t) = 0$ را برآورده کنیم. در این رابطه A_2 تابع ورودی پیش فرض اعمال شده در هنگام نرسیدن بسته از کانال اصلی است. بنابراین، در ادامه راهکاری معرفی می‌کنیم که به کمک اعمال ورودی های تطبیقی پیش فرض در هنگام از دست رفتن بسته، A_2 را صفر کرده و متغیرهای حالت سیستم را ثابت نگاه دارد. برای محاسبه مقدار ورودی پیش فرض u_p ، معادلات سیستم بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_p(t) \quad (38)$$

برای صفر کردن این مقدار باید رابطه زیر برقرار شود:

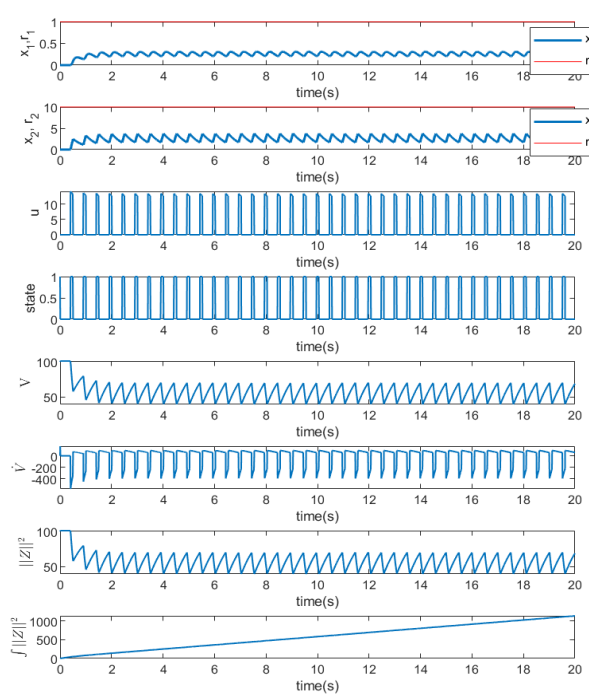


شکل ۱۰. شبیه‌سازی سیستم موتور DC (حوزه زمان پیوسته) در شرایطی که سوئیچینگ بدلیل از دست رفتن بسته‌ها رخ داده و هنگام عدم دریافت ورودی، سیستم از مقدار پیش فرض تطبیقی پیشنهادی برای حفظ وضعیت سیستم استفاده می‌کند. مقدار محدود انتگرال $\|z\|^2$ به وضوح نشان می‌دهد که سیستم پایدار شده است.

سازی سیستم‌های تحت حمله مطالعه و شبیه‌سازی گردید. به عنوان یک نمونه نشان داده شده که چگونه با استفاده از نتایج تحلیل و تطبیقی کردن ورودی پیش‌فرض می‌توان سیستم مورد اشاره را تحت حمله محرومیت از سرویس ۸۰ درصدی از ناپایداری به پایداری رساند. در مطالعات آتی، تاثیر از دست رفتن داده در اتصال شبکه مسیر فیدبک و همچنین توانان در اتصالات شبکه ای مسیر پیشرو و فیدبک بر پایداری سیستم بررسی خواهد شد.

مراجع

- [۱] H. R. Shaker and R. Wisniewski, "Model reduction of switched systems based on switching generalized gramians," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, ۲۰۱۲.
- [۲] G. Wang, Y. Liu, C. Wen, and W. Chen, "Delay-dependent stability criterion and H_∞ state-feedback control for uncertain discrete-time switched systems with time-varying delays," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, ۲۰۱۱.
- [۳] C. Jiang, K. L. Teo, R. Loxton, and G. R. Duan, "A neighboring extremal solution for optimal switched impulsive control problems with large perturbations," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, ۲۰۱۲.



شکل ۹. شبیه‌سازی سیستم موتور DC (حوزه زمان پیوسته) در شرایطی که سوئیچینگ بدلیل از دست رفتن بسته‌ها رخ داده و هنگام عدم دریافت ورودی، سیستم از مقدار پیش فرض صفر به عنوان ورودی استفاده کند. مقدار تجمعی $\|z\|^2$ به وضوح نشان می‌دهد که سیستم (با وجود محدود ماندن دامنه $x(t)$) ناپایدار است.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، پایداری سیستم خطی کنترل شده تحت شبکه در برابر از دست رفتن داده در مسیر پیشرو (برای مثال بدلیل حمله محرومیت یا انکار سرویس) تحلیل و بررسی گردید. سیستم کنترل شده تحت شبکه با یک سیستم سوئیچینگ تصادفی با مدل پرش مارکوف دو وضعیت مدل شد. مدل دو وضعیت به نحوی است که در وضعیت ۱ آن، شبکه داده ارسالی کنترل‌کننده را به سیستم انتقال می‌دهد و در وضعیت ۲، داده از دست می‌رود و سیستم فیزیکی از یک مقدار پیش فرض برای ورودی استفاده می‌کند. پایداری سیستم فیزیکی در دو حوزه زمان پیوسته و زمان گسسته مورد مطالعه قرار گرفت. سیستم سوئیچینگ تصادفی پیشنهادی به ترتیب بصورت زمان پیوسته و زمان گسسته مدل گردید و شرایط پایداری لیاپانوف سیستم با توجه به زمانهای توقف تصادفی سیستم در هر وضعیت استخراج شد. مطالعه انجام شده بر روی دو سیستم خطی نمونه که تحت حمله محرومیت سرویس بودند در حوزه زمان پیوسته و گسسته شبیه‌سازی و درستی پیش بینی‌ها بررسی شد. همچنین در حوزه زمان پیوسته، یک سیستم کنترل شده تحت شبکه مبتنی بر موتور DC برای ارابه‌روشی جدیدی جهت پایداری

- with time delay,” *Nonlinear Anal. Hybrid Syst.*, ۲۰۱۴.
- [۱۹] J. Xiong, J. Lam, Z. Shu, and X. Mao, “Stability analysis of continuous-time switched systems with a random switching signal,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, ۲۰۱۴.
- [۲۰] H. Liu, Y. Shen, and X. Zhao, “Finite-time stabilization and boundedness of switched linear system under state-dependent switching,” *J. Franklin Inst.*, ۲۰۱۳.
- [۲۱] M. Prandini, J. P. Hespanha, and M. C. Campi, “Hysteresis-based switching control of stochastic linear systems,” in *European Control Conference, ECC ۲۰۰۳*, ۲۰۰۳.
- [۲۲] S. Miani and A. C. Morassutti, “Switching controllers for networked control systems with packet dropouts and delays in the sensor channel,” *IFAC Proc. Vol.*, ۲۰۰۹.
- [۲۳] J. Nygren and K. Pelckmans, “A closed loop stability condition of switched systems applied to NCSs with packet loss,” *IFAC-PapersOnLine*, ۲۰۱۵.
- [۲۴] N. A. Baleghi and M. H. Shafiei, “Stability analysis for discrete-time switched systems with uncertain time delay and affine parametric uncertainties,” *Trans. Inst. Meas. Control*, ۲۰۱۸.
- [۲۵] A. R. Teel, A. Subbaraman, and A. Sferlazza, “Stability analysis for stochastic hybrid systems: A survey,” *Automatica*, ۲۰۱۴.
- [۲۶] P. Shi and F. Li, “A survey on Markovian jump systems: Modeling and design,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, ۲۰۱۵.
- [۲۷] Y. Fang and K. A. Loparo, “Stochastic stability of jump linear systems,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, ۲۰۰۲.
- [۲۸] O. L. V. Costa, M. D. Fragoso, and R. P. Marques, *Discrete-time Markov jump linear systems*. Springer Science & Business Media, ۲۰۰۶.
- [۲۹] W. Zhou, Q. Zhu, P. Shi, H. Su, J. Fang, and L. Zhou, “Adaptive synchronization for neutral-type neural networks with stochastic perturbation and Markovian switching parameters,” *IEEE Trans. Cybern.*, ۲۰۱۴.
- [۳۰] A. S. Morse, “Supervisory control of families of linear set-point controllers - Part ۱: Exact matching,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, ۱۹۹۶.
- [۳۱] Y. Ji and H. J. Chizeck, “Controllability, Stabilizability, and Continuous-Time Markovian Jump Linear Quadratic Control,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, ۱۹۹۰.
- [۳۲] Z. Ning, L. Zhang, and J. Lam, “Stability and stabilization of a class of stochastic switching systems with lower bound of sojourn time,” *Automatica*, ۲۰۱۸.
- [۳۳] H. Yang, H. Xu, Y. Xia, and J. Zhang, “Stability analysis on networked control systems under double attacks with predictive control,” *Int. J. Robust Nonlinear Control*, ۲۰۲۰.
- [۴] J. P. Hespanha, “A model for stochastic hybrid systems with application to communication networks,” *Nonlinear Anal. Theory, Methods Appl.*, ۲۰۰۵.
- [۵] Q. Zhang, “Stochastic Switching Systems: Analysis and Design-[Book review; E. K. Boukas],” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, ۲۰۰۷.
- [۶] R. Yang, P. Shi, G. P. Liu, and H. Gao, “Network-based feedback control for systems with mixed delays based on quantization and dropout compensation,” *Automatica*, ۲۰۱۱.
- [۷] Q. Lu, L. Zhang, M. Basin, and H. Tian, “Analysis and synthesis for networked control systems with uncertain rate of packet losses,” *J. Franklin Inst.*, ۲۰۱۲.
- [۸] L. Zhang, H. Gao, and O. Kaynak, “Network-induced constraints in networked control systems-A survey,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, ۲۰۱۳.
- [۹] H. S. Forough and S. Martínez, “On single-input controllable linear systems under periodic DoS jamming attacks,” *arXiv Prepr. arXiv 1۲۰۹.۴۱۰۱*, ۲۰۱۲.
- [۱۰] A. A. Ahmadi and R. M. Jungers, “On complexity of Lyapunov functions for switched linear systems,” in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, ۲۰۱۴.
- [۱۱] A. Bacciotti, “Stability of switched systems: An introduction,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, ۲۰۱۴.
- [۱۲] D. Liberzon, J. P. Hespanha, and A. S. Morse, “Stability of switched systems: A Lie-algebraic condition,” *Syst. Control Lett.*, ۱۹۹۹.
- [۱۳] J. Daafouz, P. Riedinger, and C. Iung, “Stability analysis and control synthesis for switched systems: A switched Lyapunov function approach,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, ۲۰۰۲.
- [۱۴] J. P. Hespanha and A. S. Morse, “Stability of switched systems with average dwell-time,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, ۱۹۹۹.
- [۱۵] G. Zhai, B. Hu, K. Yasuda, and A. N. Michel, “Stability analysis of switched systems with stable and unstable subsystems: An average dwell time approach,” *Int. J. Syst. Sci.*, ۲۰۰۱.
- [۱۶] H. Zhang, D. Xie, H. Zhang, and G. Wang, “Stability analysis for discrete-time switched systems with unstable subsystems by a mode-dependent average dwell time approach,” *ISA Trans.*, ۲۰۱۴.
- [۱۷] H. Ishii, T. Başar, and R. Tempo, “Randomized algorithms for synthesis of switching rules for multimodal systems,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, ۲۰۰۵.
- [۱۸] Y. Zhang, M. Wang, H. Xu, and K. L. Teo, “Global stabilization of switched control systems

of a DC Motor based on State Space Approach,”
Int. J. Eng. Res., ۲۰۱۶.

- [۳۴] C. Peng and H. Sun, “Switching-Like Event-Triggered Control for Networked Control Systems under Malicious Denial of Service Attacks,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, ۲۰۲۰.
- [۳۵] F. Farivar, M. S. Haghghi, A. Jolfaei, and S. Wen, “On the Security of Networked Control Systems in Smart Vehicle and Its Adaptive Cruise Control,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, ۲۰۲۱.
- [۳۶] F. Farivar, M. S. Haghghi, S. Barchinezhad, and A. Jolfaei, “Detection and compensation of covert service-degrading intrusions in cyber physical systems through intelligent adaptive control,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, ۲۰۱۹, vol. ۲۰۱۹-Febru.
- [۳۷] Y. Deng, X. Yin, and S. Hu, “Event-triggered predictive control for networked control systems with DoS attacks,” *Inf. Sci. (Ny)*, ۲۰۲۱.
- [۳۸] J. Liu, Z. G. Wu, D. Yue, and J. H. Park, “Stabilization of Networked Control Systems with Hybrid-Driven Mechanism and Probabilistic Cyber Attacks,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, ۲۰۲۱.
- [۳۹] S. Y. Lü, X. Z. Jin, H. Wang, and C. Deng, “Robust adaptive estimation and tracking control for perturbed cyber-physical systems against denial of service,” *Appl. Math. Comput.*, ۲۰۲۱.
- [۴۰] N. Toorchi, M. A. Attari, M. S. Haghghi, and Y. Xiang, “A Markov model of safety message broadcasting for vehicular networks,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, ۲۰۱۳.
- [۴۱] M. S. Haghghi and Z. Aziminejad, “Highly Anonymous Mobility-Tolerant Location-based Onion Routing for VANETs,” *IEEE Internet Things J.*, ۲۰۱۹.
- [۴۲] A. R. Javed, M. Usman, S. U. Rehman, M. U. Khan, and M. S. Haghghi, “Anomaly Detection in Automated Vehicles Using Multistage Attention-Based Convolutional Neural Network,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, ۲۰۲۱.
- [۴۳] F. Farivar, M. S. Haghghi, A. Jolfaei, and M. Alazab, “Artificial Intelligence for Detection, Estimation, and Compensation of Malicious Attacks in Nonlinear Cyber-Physical Systems and Industrial IoT,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, ۲۰۲۰.
- [۴۴] F. Farivar, M. S. Haghghi, A. Jolfaei, and S. Wen, “Covert Attacks through Adversarial Learning: Study of Lane Keeping Attacks on the Safety of Autonomous Vehicles,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, ۲۰۲۱.
- [۴۵] G. Wang and Z. Li, “Stability analysis of discrete-time randomly switched systems via an LMI approach,” in *Chinese Control Conference, CCC*, ۲۰۱۷.
- [۴۶] Debabrata Pal, “Modeling, Analysis and Design

تحلیل پایداری سیستم‌های کنترل شده تحت شبکه حین حملات محرومیت سرویس با تئوری سیستم‌های سوئیچینگ