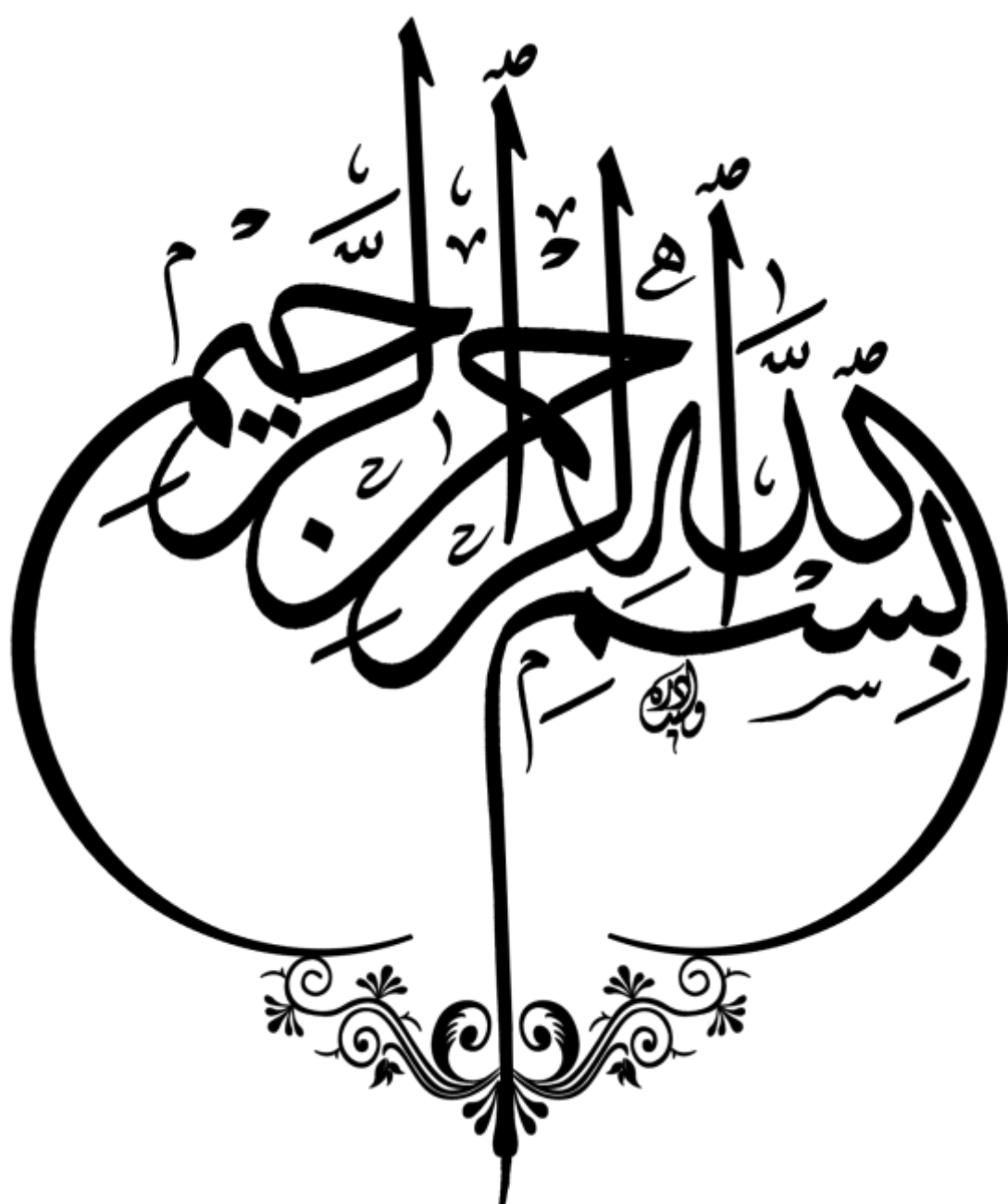






دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات سیستم

مدل سازی اثرات شبکه مخابراتی بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت

با استفاده از رویکرد زنجیره مارکوف به هم وابسته

نگارنده: رضا علی حسینی

استاد راهنما:

امید رضا معروضی

استاد مشاور:

محسن اصیلی

بهمن ۱۴۰۰

تقدیم بہ

تقدیم بہ پدرم کہ زندگی را از دستاش،
مادرم کہ محبت را از نگاہش آموختم
و خانوادہ ام بہ پاس ایثار و فداکاری ہایشان

سپاسگزاری

سپاس خداوندگار حکیم را که با لطف بی کران خود، آدم را زیور عقل آراست.
در آغاز وظیفه خود می‌دانم از زحمات بی دریغ استاد راهنمای خود، جناب آقای دکتر
امید رضا معروضی، صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که قطعاً بدون راهنمایی های ارزنده
ایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید.
در پایان، بوسه می‌زنم بر دستان خداوندگاران مهر و مهربان^۲ پدر و مادر عزیزم و بعد از
خدا، ستایش می‌کنم وجود مقدس‌شان را و تشکر می‌کنم از خانواده عزیزم به پاس عاطفه
سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان، که بهترین پشتیبان من بودند.

تعهدنامه

اینجانب **رضا علی حسینی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مخابرات سیستم دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **مدل سازی اثرات شبکه مخابراتی بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت با استفاده از رویکرد زنجیره مارکوف به هم وابسته تحت راهنمایی دکتر امید رضا معروضی متعهد می شوم:**

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

تاریخ:

امضا دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

شبکه‌های هوشمند از سیستم‌های به‌هم‌وابسته، یعنی، شبکه قدرت و سیستم مخابراتی تشکیل شده‌اند. درحالی‌که شبکه‌های برق امروزی بسیار قابل‌اعتماد هستند و سیستم‌های کنترل و ارتباطات مدرن برای افزایش قابلیت‌اطمینان آن‌ها به‌کار گرفته شده‌اند، داده‌های قدیمی نشان می‌دهد که آن‌ها هنوز در برابر خرابی‌های بزرگ آسیب‌پذیر هستند. مجموعه کوچکی از آشفتگی‌های اولیه در شبکه‌های قدرت در ارتباط با عدم وجود اقدامات اصلاحی مؤثر و به موقع می‌تواند منجر به ایجاد زنجیره‌ای از خرابی‌های اجزای وابسته به نام خرابی‌های آبشاری شود. هدف اصلی این پایان‌نامه، ایجاد چارچوب احتمالی برای مدل‌سازی خرابی‌های آبشاری در شبکه‌های قدرت و ثبت تعاملات آن‌ها با سیستم‌های مخابراتی تلفیقی می‌باشد، به طوری که خطر خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های پیچیده الکتریکی-سایبری می‌تواند مورد بررسی، تحلیل و پیش‌بینی قرار گیرد.

یک مدل زنجیره مارکوف زمان پیوسته مقیاس‌پذیر و تحلیلی برای پویایی تصادفی خرابی‌های آبشاری در شبکه‌های قدرت با حفظ ویژگی‌های فیزیکی و عملیاتی شبکه قدرت ساخته شده است. ایده کلیدی چارچوب پیشنهادی، ساده‌سازی فضای حالت سیستم قدرت پیچیده به هنگام ثبت اثرات متغیرهای حذف‌شده از طریق احتمالات گذار و وابستگی پارامتری آن‌ها به ویژگی‌های فیزیکی و عملیاتی سیستم است. خرابی‌های آبشاری با یک چارچوب شبیه‌سازی سیستم قدرت کوپل‌شده شبیه‌سازی شده‌اند. به طور خاص، مدل احتمالاتی، تحلیل تقریبی احتمال خاموشی، محاسبه تابع جرم احتمال اندازه خاموشی را امکان‌پذیر می‌کند، که دارای توزیع دم-سنگین می‌باشد. یک مزیت کلیدی این مدل این است که به توصیف شدت خرابی‌های آبشاری برحسب مجموعه‌ای از ویژگی‌های عملیاتی شبکه قدرت کمک می‌کند.

در این پایان‌نامه، همچنین یک مدل زنجیره مارکوف به‌هم‌وابسته جدید توسعه داده شده است، که یک چارچوب احتمالاتی کلی را برای ثبت اثرات تعامل بین زیرساخت‌های وابسته بر روی خرابی‌های آبشاری فراهم می‌کند. یک بینش به‌دست‌آمده از این مدل این است که وابستگی متقابل بین دو سیستم می‌تواند باعث شود که دو سیستم قابل‌اطمینان مستقل رفتار غیرقابل‌اطمینانی داشته باشند. ما نشان می‌دهیم که به دلیل وابستگی‌های متقابل دو زنجیره با توزیع خرابی تقریبی غیر دم-سنگین می‌توانند در هنگام تلفیق منجر به توزیع دم سنگین شوند.

کلمات کلیدی: سیستم‌های به‌هم‌وابسته، زیرساخت‌های حیاتی، خرابی‌های آبشاری، زنجیره

مارکوف، توزیع قانون-توانی

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- پیش زمینه	۲
۳-۱- انگیزه	۳
۴-۱- بیان مسئله	۷
۵-۱- چارچوب و اهداف	۸
۶-۱- رویکرد پژوهش	۱۰
۲- فصل دوم: پیشینه پژوهش	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۲
۲-۲- پژوهش‌های پیشین در خصوص تحلیل قابلیت اطمینان شبکه برق و تأثیر خرابی‌های آبخاری بر قابلیت اطمینان شبکه برق	۱۲
۱-۲-۲- پژوهش‌های پیشین در خصوص مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های قدرت	۱۵
۲-۲-۲- تحقیقات پیشین در خصوص مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری در زیرساخت‌های وابسته به هم	۱۷
۳- فصل سوم: اثرات شبکه مخابراتی بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت به کمک روش زنجیره‌های مارکوف وابسته	۲۱
۱-۳- مقدمه	۲۲
۲-۳- ساختار زیرساخت‌های الکتریکی- سایبری	۲۲
۳-۳- بررسی مدل MC برای خرابی‌های آبخاری	۲۷
۴-۳- بررسی زنجیره‌های مستقل مارکوف (IDMC)	۲۹
۱-۴-۳- احتمالات گذار و فضای حالت	۳۰
۲-۴-۳- کوانتیزاسیون حافظه	۳۱
۳-۴-۳- ثبت اثرات وابستگی‌های متقابل	۳۱
۴-۴-۳- قدرت وابستگی متقابل	۳۲
۵-۴-۳- روش درهم‌سازی	۳۳
۵-۳- بررسی مدل IDMC برای خرابی‌های آبخاری در زیرساخت‌های الکتریکی- سایبری	۳۴
۱-۵-۳- فضای حالت	۳۵
۲-۵-۳- احتمالات گذار	۳۷
۳-۵-۳- راه حل حالت پایدار	۴۱
۴- فصل چهارم: مدل‌سازی اثرات شبکه مخابراتی بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت	۴۵
۱-۴- مقدمه	۴۶

۴-۲- سیستم‌های قابل اطمینان و غیرقابل اطمینان	۴۶
۴-۳- تأثیر وابستگی متقابل بر توزیع احتمال اندازه خاموشی	۵۲
۴-۴- سیستم‌های قابل اطمینان مستقل می‌توانند هنگام تلفیق شدن، غیر قابل اطمینان رفتار کنند	۵۶
۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۵۹
۵-۱- جمع‌بندی	۶۰
۵-۲- پیشنهادها	۶۲
۶- منابع	۶۳

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ جدول زمانی شرایط اولیه شبکه برق، رویدادهای انسانی و رایانه‌ای در آغاز خاموشی سال ۲۰۰۳ در اوهایو. [۲].....	۵
شکل ۲-۱ سیر تکاملی زمانی خرابی‌ها در خاموشی سال ۲۰۰۳ در شمال شرقی شبکه قدرت ایالات متحده [۲].....	۶
شکل ۱-۳ طرحواره یک شبکه توزیع و انتقال [۸].....	۲۳
شکل ۲-۳ همبندی سیستم باس IEEE 118 [۱].....	۲۴
شکل ۳-۳ سه اتصال متقابل زیرساخت‌های الکتریکی ایالات متحده [۴۲].....	۲۶
شکل ۴-۳ دو MC نشان‌دهنده پویایی تصادفی خرابی‌های آبخاری در هر دو سیستم وابسته به یکدیگر [۴۴].....	۲۸
شکل ۵-۳ نمونه‌ای از دنباله گذار در یک مدل IDMC با حافظه دو مرحله‌ای، در این مثال فقط حالات غیر جذب در نظر گرفته شده است [45].....	۳۳
شکل ۶-۳ مفهوم روش درهمسازی برای تلفیق MCهای شبکه قدرت و سیستم ارتباطی [۴۶].....	۳۵
شکل ۷-۳ بخشی از مدل IDMC برای سیستم قدرت و سیستم ارتباطی با احتمال‌های گذار در میان حالت‌ها [۴۶].....	۴۱
شکل ۱-۴ یک مدل زنجیره مارکوف ساده شده با متغیرهای حالت F و I [۴۵].....	۴۷
شکل ۲-۴ PMF اندازه خاموشی در مقیاس لگاریتمی.....	۴۹
شکل ۳-۴ تابع $Pstop(Fi)$ با فرض PMF قانون Zipf.....	۵۰
شکل ۴-۴ تابع توزیع تجمعی مربوط به تابع جرم احتمال.....	۵۰
شکل ۵-۴ انتهای توزیع (شکل ۴-۳) را نشان می‌دهد، که منجر به یک برآمدگی در انتهای توزیع دم-سنگین شده و یک تابع کاسه‌ای شکل را ایجاد کرده است.....	۵۲
شکل ۶-۴ PMF اندازه خرابی در شبکه برق در مقیاس لگاریتمی برای یک سیستم قدرت قابل اطمینان با توزیع خاموشی نمایی (نقطه چین)، یک شبکه برق غیر قابل اطمینان نوع (۱) با توزیع قانون-توانی (خط آبی) و یک زنجیره مارکوف وابسته با ثابت‌های p ، q و d (خط قرمز).....	۵۳
شکل ۷-۴ تابع جرم احتمال اندازه خرابی برای شبکه قدرت در مقیاس لگاریتمی برای سناریوهای مختلف $p(x)$ ، $q(y)$ و $d(y)$ سیستم‌های غیر قابل اطمینان از نوع (۱).....	۵۴
شکل ۸-۴ تابع جرم احتمال اندازه خرابی برای سیستم مخابراتی در مقیاس لگاریتمی برای سناریوهای مختلف $p(x)$ ، $q(y)$ و $d(y)$ سیستم‌های غیر قابل اطمینان از نوع (۱).....	۵۶
شکل ۹-۴ تابع جرم احتمال اندازه خرابی در شبکه برق در یک مدل زنجیره مارکوف به هم وابسته را نشان می‌دهد. زمانی که دو سیستم قابل اطمینان با هم تلفیق می‌شوند، با وابستگی متقابل همراه هستند که منجر به رفتار غیر قابل اطمینان در سیستم می‌شوند.....	۵۷

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

زیرساخت‌های حیاتی مانند شبکه‌های برق، ارتباطات، حمل و نقل، گاز و آب از خدمات یک‌دیگر استفاده می‌کنند و به دلیل وابستگی متقابل آن‌ها بر یک‌دیگر تأثیر می‌گذارند. اگرچه بسیاری از وابستگی‌های متقابل برای بهره‌برداری از زیرساخت‌ها ضروری هستند، اما وابستگی‌های متقابل بر قابلیت‌اطمینان شبکه‌های به‌هم‌وابسته تأثیر منفی می‌گذارند و می‌توانند زنجیره‌ای از خرابی‌های آبشاری را در داخل و سراسر شبکه ایجاد کنند. با توجه به تأثیر متقابل گسترده زیرساخت‌های حیاتی و خاموشی‌های برنامه‌ریزی نشده برق که در سال‌های اخیر در مناطق مختلف دنیا اتفاق افتاده است، ضروری است که زیرساخت‌های حیاتی مانند شبکه قدرت و شبکه مخابراتی را زمانی که قابلیت‌اطمینان مورد توجه است، به عنوان یک سیستم واحد کوپل شده مورد مطالعه قرار داد.

۱-۲- پیش‌زمینه

زمانی مجموعه‌ای از سیستم‌ها به عنوان سیستم‌های وابسته به یک‌دیگر در نظر گرفته می‌شوند که رفتار یک سیستم بر رفتار سیستم‌های دیگر تأثیر بگذارد. بسیاری از زیرساخت‌های اصلی، سیستم‌های وابسته به هم هستند که در آن قابلیت‌اطمینان هر سیستم بر قابلیت‌اطمینان سیستم‌های دیگر تأثیر می‌گذارد. نمونه‌هایی از زیرساخت‌هایی که وابسته به یک‌دیگر هستند، عبارتند از: شبکه قدرت، ارتباطات، حمل و نقل و زیرساخت‌های بازار مالی. عملکرد قابل‌اطمینان زیرساخت‌های حیاتی ضروری است، زیرا بر امنیت ملی و اقتصاد جامعه تأثیر می‌گذارد. به دلیل اهمیت زیرساخت‌های حیاتی، مهم است که چارچوب‌هایی برای پیش‌بینی دقیق قابلیت‌اطمینان و همچنین رفتار پیچیده آنها ایجاد شود. با این حال، پیچیدگی و مقیاس‌بندی زیرساخت‌های حیاتی و همچنین وابستگی متقابل آن‌ها باعث می‌شود که مدل‌سازی و تحلیل چنین سیستم‌هایی چالش برانگیز باشد. بسیاری از چارچوب‌های پیشنهادی برای تحلیل قابلیت‌اطمینان زیرساخت‌های حیاتی وابسته به یک‌دیگر، هر کدام از این زیرساخت‌ها را جداگانه در نظر می‌گیرند، در حالی که در موارد دیگر زیرساخت‌هایی که دارای وابستگی متقابل هستند به طور مشترک به عنوان یک سیستم واحد در نظر گرفته می‌شوند.

۱-۳- انگیزه

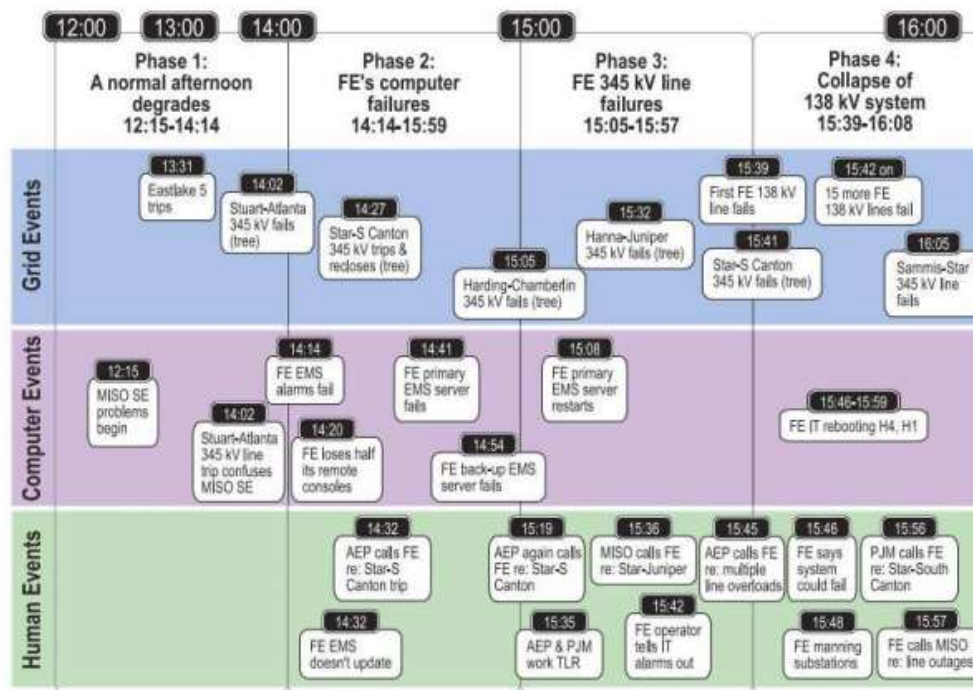
در این پایان نامه، زیرساخت‌های حیاتی بررسی شده، زیرساخت‌های شبکه قدرت و شبکه مخابراتی هستند. در عین حال که شبکه‌های قدرت در حال حاضر بسیار قابل اطمینان هستند، اما داده‌های قدیمی نشان می‌دهند که ماهیت پیچیده آنها، فرسودگی، تقاضای رو به رشد، عملکرد نزدیک به محدودیت‌های کرانه‌ای خود و همچنین عدم سرمایه‌گذاری روی این زیرساخت‌ها باعث شده که آن‌ها نسبت به خرابی‌های متناوب آسیب‌پذیر باشند. وقتی چنین سیستم‌هایی به خاطر مجموعه کوچکی از اختلالات اولیه تحت فشار قرار می‌گیرند، ممکن است دنباله‌ای از خرابی قطعات وابسته در سیستم رخ دهند. چنین توالی از خرابی‌های وابسته، خرابی‌های آبشاری نامیده می‌شود. بررسی داده‌های قدیمی نشان می‌دهند که بسیاری از خاموشی‌ها در شبکه‌های قدرت از خرابی‌های آبشاری حاصل می‌شوند [۱]. به طور دقیق، خرابی‌های آبشاری در شبکه‌های قدرت توجه زیادی را به خود جلب کرده است، زیرا هزینه‌بر هستند و بر جامعه تاثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، خاموشی سال ۲۰۰۳ در شبکه شمال شرقی ایالات متحده منجر به اختلال در خدمات برقی برای تقریباً ۵۰ میلیون نفر در ۸ ایالت آمریکا و یک ایالت کانادایی شد [۲]. همچنین خاموشی سال ۲۰۰۳ در ایتالیا تقریباً بر ۵۷ میلیون نفر در ایتالیا و سوئیس تأثیر گذاشت [۳].

اگرچه اختلالات شدید زیرساختی مانند خاموشی‌های بزرگ نادر هستند، اما یافته‌های جدید نشان می‌دهد که احتمال رخداد آن‌ها بیشتر از آن چیزی است که تحلیل ریسک سنتی پیش‌بینی شده است [۴]. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که خرابی‌های آبشاری با اندازه متوسط (قطع خدمات ۵۰,۰۰۰ مصرف‌کننده یا کمتر) به شکل تعجب‌آوری رایج هستند [۱]. به‌طور کلی، رفتار قانون توانی در توزیع اندازه خاموشی در شبکه‌های قدرت نشان می‌دهد که احتمال خاموشی‌های بزرگ بسیار بیشتر از مقداری است که بتوان آن را نادیده گرفت. بنابراین، بسیار مهم است که احتمال خاموشی‌های بزرگ در شبکه‌های قدرت تجزیه و تحلیل شوند.

خرابی‌های آبشاری بزرگ در شبکه انتقال برق می‌توانند در اثر ترکیبی از مجموعه کوچکی از خرابی‌های اولیه و عدم انجام اقدامات اصلاحی مناسب و به موقع ایجاد شوند. شبکه‌های قدرت معمولاً به گونه‌ای کار می‌کنند که خرابی‌های تکی در اجزاء حیاتی بتواند بدون ایجاد خرابی‌های آبشاری جذب شوند (شرط $N-1$). توانایی شبکه برای فعالیت به این روش به یکپارچگی سیستم‌های ارتباطی و حسگرها و همچنین به توانایی ابزارهای نظارتی برای انتقال اطلاعات دقیق به اپراتورهای انسانی و سیستم‌های کنترل خودکار مرتبط است، که در نهایت مسئول اقدامات اصلاحی مانند کاهش بار هستند. همان‌طور که به سمت شبکه‌های برق هوشمندتر پیش می‌رویم، شبکه‌های قدرت برای بهبود قابلیت اطمینان و کارایی خود بیشتر و بیشتر بر فناوری‌های ارتباطی و کنترل مدرن تکیه می‌کنند. با این حال، این دستاوردها نیز با آسیب‌پذیرهای خاص خود همراه است، زیرا عملکرد صحیح شبکه برق نه تنها به یکپارچگی زیرساخت سیستم قدرت، بلکه به مؤثر بودن سیستم مخابراتی نیز بستگی دارد. آسیب‌پذیری‌های مرتبط با سیستم مخابراتی، مانند، خرابی‌های اجزاء فیزیکی، حملات سایبری و ناکارآمدی پروتکل ارتباطی، می‌توانند قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت را به ویژه زمانی که تحت فشار هستند، تهدید کنند. داده‌های قبلی همچنین نشان می‌دهد که زیرساخت‌های قدرت و مخابرات به یکدیگر وابسته هستند و قابلیت اطمینان یکی بر قابلیت اطمینان دیگری تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، در خاموشی سال ۲۰۰۳ در ایتالیا در ۲۸ سپتامبر، خاموشی برنامه‌ریزی نشده پست برق منجر به خرابی در گره‌های شبکه مخابراتی و کنترل نظارتی و سیستم جمع‌آوری داده‌ها (SCADA)^۱ شد که وظیفه کنترل شبکه قدرت را بر عهده داشتند. این رویداد به نوبه خود، منجر به خرابی‌های بیشتر در شبکه قدرت شد که این امر نیز منجر به یک رویداد بزرگ خرابی آبشاری در سیستم شد [۵]. نمونه دیگری از چنین وابستگی متقابل در خاموشی سال ۲۰۰۳ در شمال شرقی ایالات متحده قابل مشاهده است، که در آن نه تنها خرابی‌های اجزاء قدرت در خرابی‌های آبشاری نقش داشته، بلکه رویدادهای

¹ Supervisory Control and Data Acquisition

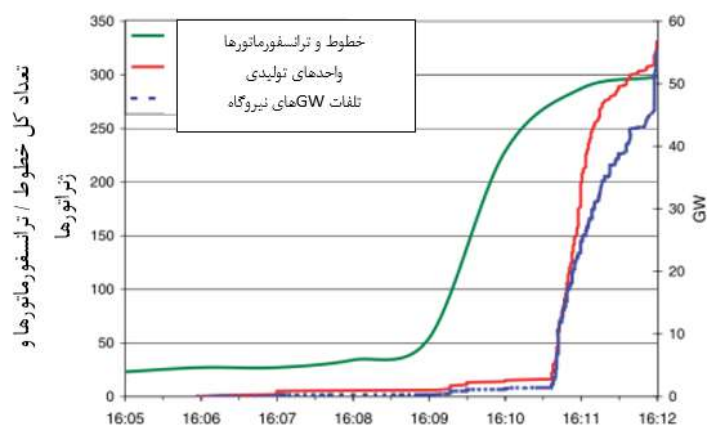
انسانی و رایانه‌ای نیز نقش داشته‌اند. (شکل ۱-۱) نشان‌دهنده جدول زمانی شرایط اولیه شبکه برق، رویدادهای انسانی و رایانه‌ای در آغاز خاموشی سال ۲۰۰۳ در اوهایو است [۲]. در این بخش، راه اندازی نادرست یک سیستم نظارتی منجر به یک دنباله از خرابی‌های ناشناخته شد. اقدامات اصلاحی بعدی، مانند؛ کاهش بار، نیز دارای تأخیر بودند، زیرا اپراتور هرگز چنین درخواست‌هایی آن هم به این بزرگی را ندیده بود و از بحران به سرعت در حال توسعه بی‌اطلاع بود. به این ترتیب، اشکال در ارتباطات و خرابی در سیستم‌های کنترل و نظارت باعث ایجاد خرابی‌های آشفته و در نهایت منجر به خاموشی بزرگی شد. به طور خلاصه، وابستگی‌های متقابل و یکپارچگی گسترده شبکه‌های برق و



شکل ۱-۱ جدول زمانی شرایط اولیه شبکه برق، رویدادهای انسانی و رایانه‌ای در آغاز خاموشی سال ۲۰۰۳ در اوهایو. [۲]

سیستم‌های مخابراتی الزام می‌کند که آن‌ها باید به عنوان یک سیستم سایبری-الکتریکی واحد مورد مطالعه قرار گیرند، به ویژه زمانی که قابلیت اطمینان سیستم مورد توجه است. نکته مهم دیگر در مورد خرابی‌های آشفته این است که تکامل زمانی خرابی‌ها را می‌توان در سه مرحله نشان داد. اولین مرحله از خرابی‌های آشفته، مرحله پیشگیری است، که در آن پیشرفت

خرابی‌ها به صورت آهسته انجام می‌گیرد و اقدامات کنترلی برای کاهش اثرات اختلالات موثر هستند. دومین مرحله از خرابی‌های آبشاری، مرحله تشدید است که در آن خرابی‌ها بسیار سریع رخ می‌دهند و پیشگیری از خاموشی در این مرحله بسیار دشوار است. سومین مرحله از خرابی‌های آبشاری، مرحله خروج از حالت آبشاری است که در آن پیشرفت خرابی‌ها مجدداً آهسته می‌شود. این رفتار را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که تعداد زیادی از اجزاء از قبل دچار خرابی بوده‌اند و جزایر کاربردی در سیستم ایجاد شدند که این امر منجر به خاتمه خرابی‌های آبشاری می‌شود. این سه مرحله به سادگی در سیر تکاملی زمانی خرابی‌ها در خاموشی سال ۲۰۰۳ قابل مشاهده است، که در (شکل ۱-۲) نشان داده شده است. واضح است که توانایی شناسایی دقیق و سریع پیش‌سازها برای خرابی‌های آبشاری قبل از آنکه سیستم وارد مرحله تشدید شود، به همراه پاسخ‌های سریع و صحیح برای کاهش خاموشی‌های بزرگ مهم است. بنابراین، ساخت ابزارهای پیش‌بینی که می‌توانند خطر خرابی‌های آبشاری بزرگ را در زیرساخت‌های قدرت و مخابراتی یکپارچه شناسایی کنند، مهم است.



شکل ۱-۲ سیر تکاملی زمانی خرابی‌ها در خاموشی سال ۲۰۰۳ در شمال شرقی شبکه قدرت ایالات متحده [۲].

امروزه اپرتورها با بهره‌گیری از پیشرفت در زمینه ارتباطات و پردازش داده‌ها، در راه‌اندازی شبکه در نزدیکی محدودیت‌های کرانه‌ای آن ماهرتر شده‌اند. به طور خاص، با پیشرفت در زمینه فناوری حسگرها، استفاده از حسگرها را برای نظارت مستمر بر اجزاء زیرساخت‌های حیاتی تسریع کرده است. حسگرهای مورد استفاده از وضعیت قطعات با فرکانس بالا نمونه‌برداری می‌کنند و با به روز رسانی

وضعیت‌ها، آن‌ها را برای مراکز کنترل ارسال می‌کنند و آن‌ها را قادر می‌سازند تا وضعیت سیستم را به طور دقیق تخمین بزنند [۲]. به همین ترتیب، شبکه‌های هوشمند آینده با حجم زیادی از داده‌ها مواجه خواهند شد که باید با تأمین منابع محاسباتی و ارتباطی ضروری، به طور کارآمد کنترل شوند. میزان تقاضای مصرف‌کننده، منابع تولید در دسترس، وضعیت سیستم کنترل و ارتباط، چارچوب عملکرد شبکه قدرت را تعیین می‌کنند. چارچوب عملکرد شبکه قدرت می‌تواند به میزان زیادی بر انعطاف‌پذیری سیستم در موارد احتمالی تأثیر بگذارد. به طور کلی، خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های قدرت به طور خاص پدیده‌های پیچیده‌ای هستند، زیرا می‌توان آن‌ها را به تعداد زیادی از عوامل متقابل و رویدادهای تصادفی نسبت داد. توسعه چارچوب‌های نظری با نیاز به انتزاع و درک بهتر چنین پدیده‌های پیچیده‌ای در چنین سیستم‌های پیچیده ضروری است. درک اساسی رفتارهای آبخاری، هدایت طراحی سیاست‌های کنترلی را برای شبکه‌های قدرت و همچنین شبکه‌های ارتباطی قابل‌اطمینان را برای تقویت شبکه قدرت در بر خواهد داشت. همچنین تعیین شدت خرابی‌های آبخاری از نظر ویژگی‌های عملیاتی شبکه قدرت برای جلوگیری از حالت‌های عملیاتی که احتمال خاموشی‌های بزرگ را افزایش می‌دهند، بسیار مهم است. به طور خاص، درک خرابی‌های آبخاری در زیرساخت‌هایی که دارای وابستگی متقابل هستند، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، زیرا وابستگی متقابل بین زیرساخت‌ها می‌تواند منجر به ایجاد رفتارهای جدید در کل سیستم به عنوان یک سیستم واحد شود که در سیستم‌های منفرد قابل مشاهده نیست.

۴-۱- بیان مسئله

این پایان نامه بر مدل‌سازی اثرات سیستم مخابراتی بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت با استفاده از روش زنجیره‌های مارکوف وابسته تمرکز دارد.

توزیع اندازه خرابی در سیستم‌های قدرت و مخابراتی به هم وابسته را براساس راه‌حل‌های عددی سیستم معادلات تفاضلی به دست می‌آوریم. با استفاده از این نتایج، نشان می‌دهیم که وابستگی متقابل بین دو سیستم می‌تواند آسیب‌پذیری‌هایی را در کل سیستم ایجاد کند و احتمال خاموشی‌های بزرگ

را افزایش دهد. به طور خاص، نشان می‌دهیم که وابستگی‌های متقابل بین دو سیستم قابل اطمینان مستقل ممکن است منجر به یک سیستم کوپل شده غیر قابل اطمینان شود.

۱-۵- چارچوب و اهداف

هدف اصلی این پایان‌نامه، ایجاد قابلیت پیش‌بینی درباره قابلیت اطمینان شبکه قدرت با در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل آن با شبکه مخابراتی است. در حالی که عمده کار در این پایان‌نامه در زمینه شبکه‌های قدرت و سیستم‌های مخابراتی است، ایده‌های کلی اصلی آن را می‌توان به زیرساخت‌های مختلف با وابستگی متقابل اعمال کرد. اهداف این پایان‌نامه را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

اولین هدف این پایان‌نامه، ایجاد یک چارچوب احتمالی مقیاس‌پذیر برای مدل‌سازی خرابی‌های آبشاری در شبکه‌های قدرت است. ایده اصلی چارچوب پیشنهادی، ساده‌سازی فضای حالت پیچیده سیستم قدرت است تا بتوانیم روند پویایی خرابی‌های آبشاری را با استفاده از زنجیره مارکوف زمان پیوسته ردیابی کنیم و در عین حال اثرات متغیرهای حذف شده را از طریق احتمالات گذار و وابستگی پارامترهای آن‌ها به ویژگی‌های فیزیکی و مشخصه‌های عملیاتی سیستم ثبت کنیم. علاوه بر توانایی این چارچوب برای پیش‌بینی سیر تکاملی احتمال خاموشی در زمان، تجزیه و تحلیل تقریبی احتمال خاموشی با استفاده از این مدل، محاسبه تابع جرم احتمال اندازه خاموشی را امکان‌پذیر می‌سازد و منجر به تعیین میزان شدت خرابی‌های آبشاری تحت مشخصه‌های عملیاتی مختلف سیستم می‌شود. یک دیدگاه اصلی ارائه شده توسط این چارچوب این است که توزیع احتمال اندازه خرابی‌ها در شبکه قدرت یک توزیع دم سنگین^۱ است [6]، که احتمال خاموشی‌های بزرگ تا حد زیادی به ویژگی‌های عملیاتی شبکه قدرت بستگی دارد. توانایی تعیین مشخصه توزیع اندازه خاموشی از نظر ویژگی‌های

¹ Heavy tail distribution

فیزیکی و مشخصه‌های عملیاتی سیستم در حالی که پیچیدگی را به حداقل می‌رساند، از مزایای حیاتی این روش است.

هدف دوم این پایان نامه، بسط مدل زنجیره مارکوف به یک چارچوب جدید زنجیره مارکوف با وابستگی متقابل برای مدل‌سازی خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های وابسته به هم است. روش زنجیره مارکوف با وابستگی متقابل، یک چارچوب احتمالی برای تعیین چگونگی تأثیر پویایی تصادفی یک سیستم بر پویایی سیستم دیگر را ارائه می‌دهد. ایده این روش کلی، ایجاد یک چارچوب یکپارچه متشکل از سیستمی از زنجیره‌های مارکوف ناهمگن با وابستگی متقابل، برای هر سیستم فیزیکی است. روش معمول برای تلفیق زنجیره‌های مارکوف به ایجاد ضرب دکارتی از فضاهای حالت واحد تکیه دارد. با این وجود، این روش دارای این نقص است که احتمال‌گذار جدید در میان حالت‌های زنجیره مارکوف تلفیق‌شده را نمی‌توان به راحتی از احتمال‌گذار زنجیره‌های مارکوف واحد بدست آورد. نقص جدی‌تر این روش این است که این روش بر مبنای فرض نادرست و ساختگی است که ترکیب دو زنجیره مارکوف منجر به زنجیره مارکوف جدیدی می‌شود که فضای حالت آن از ضرب دکارتی زنجیره‌های مستقل بدست می‌آید. برای رفع این مشکل، چارچوب زنجیره مارکوف با وابستگی متقابل را به همراه روش درهم‌سازی¹ برای تلفیق زنجیره‌های مارکوف پیشنهاد می‌کنیم. مدل زنجیره مارکوف به هم وابسته ارائه شده در این پایان‌نامه، ما را قادر می‌سازد تا تأثیر رفتار تصادفی یک سیستم بر سیستم‌های وابسته به یکدیگر را در یک چارچوب احتمالی بررسی کنیم. یک بینش اصلی به دست آمده از چارچوب زنجیره مارکوف با وابستگی متقابل این است که وابستگی متقابل بین این دو سیستم می‌تواند باعث شود که دو سیستم قابل اطمینان هنگامی که در کنار هم قرار می‌گیرند، غیرقابل اطمینان رفتار کنند و در نتیجه احتمال خرابی‌های بزرگ را افزایش دهند و در نهایت، مسئله مدل‌سازی خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های به هم وابسته با بسط چارچوب زنجیره مارکوف به

¹ Interleaving

چارچوب زنجیره مارکوف به هم وابسته فرمولبندی می‌شود. روش کلی زنجیره مارکوف با وابستگی متقابل برای مدل‌سازی هر تعداد سیستم به هم وابسته ارائه می‌شود. به عنوان یک مثال خاص، مدل زنجیره‌ای مارکوف با وابستگی متقابل برای زیرساخت‌های قدرت و مخابرات توسعه داده می‌شود.

۱-۶- رویکرد پژوهش

در این پایان نامه، یک مدل زنجیره مارکوف وابسته (IDMC)^۱ را ارائه می‌کنیم که یک چارچوب احتمالی را برای نمایش تاثیرات وابستگی‌های متقابل بین شبکه‌های فیزیکی بر روی پویایی تصادفی خرابی‌های آبخاری در یک محیط انتزاعی ارائه می‌کند. ایده این رویکرد، ایجاد یک چارچوب احتمالی یکپارچه متشکل از زنجیره‌های مارکوف ناهمگن (MC)^۲ می‌باشد. وابستگی‌های متقابل به این صورت می‌باشد که گذار در یک MC بر احتمالات گذار سایر MCها تأثیر می‌گذارد. ما MCهای زمان گسسته را در نظر می‌گیریم و تعامل بین سیستم‌های به هم وابسته را با تعیین احتمالات گذار IDMC براساس زنجیره‌های مستقل و وابستگی‌های متقابل بین آن‌ها مدل‌سازی می‌کنیم. در این پایان نامه، ابتدا چارچوب کلی IDMC را ارائه می‌کنیم و سپس یک مدل IDMC را برای خرابی‌های آبخاری در زیرساخت‌های سایبری-الکتریکی به دست می‌آوریم. در مرحله بعد، براساس چارچوب ارائه شده برای IDMC، معیارهایی را برای تعیین کمیت قدرت وابستگی متقابل بین سیستم‌ها معرفی می‌کنیم.

¹ Inter-Dependent Markov Chain

² Markov Chain

فصل دوم

پیشینه پژوهش

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا سه دسته از پژوهش‌های مرتبط در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان شبکه برق و تأثیر خرابی‌های آبخاری بر قابلیت اطمینان شبکه برق را مرور می‌کنیم. دسته اول، تحقیق بر روی تحلیل قابلیت اطمینان و عملکرد انسانی است. دسته دوم، پژوهش‌های مرتبط در مورد مدل‌سازی تأثیر عوامل انسانی بر زیرساخت‌های حیاتی است. دسته سوم، در خصوص مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های برق می‌باشد. عمده پژوهش ما هم‌راستا با دسته سوم می‌باشد که پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری را ابتدا در شبکه قدرت و در نهایت در زیرساخت‌های وابسته به هم مرور می‌کنیم.

۲-۲- پژوهش‌های پیشین در خصوص تحلیل قابلیت اطمینان شبکه برق و تأثیر خرابی‌های آبخاری بر قابلیت اطمینان شبکه برق

در ابتدا پژوهش‌های مرتبط در زمینه تحلیل قابلیت اطمینان شبکه برق و تأثیر خرابی‌های آبخاری بر قابلیت اطمینان شبکه برق را دسته بندی کرده و سپس به بررسی و مرور پژوهش‌های مرتبط در قالب سه دسته می‌پردازیم.

در دسته اول از پژوهش‌های مرتبط، به بررسی تحلیل قابلیت اطمینان و عملکرد انسانی می‌پردازیم. خطای انسانی می‌تواند عملکرد سیستم را درست مانند هر نقص فنی دیگری تحت تأثیر قرار دهد [۶]. تحلیل قابلیت اطمینان انسانی (HRA)^۱ تکنیکی است که برای تعیین جنبه‌های حیاتی و خطاهایی طراحی شده است که می‌تواند بر تصمیم‌گیری انسان تأثیر بگذارد [۷]. SPAR-H^۲ یک رویکرد ساده شده برای تعیین مقدار خطای انسانی است که به پردازش ادراک فردی و پاسخ به رویدادها در محیط‌های پیچیده می‌پردازد [۸]. نتیجه رویکرد SPAR-H، محاسبه احتمال خطای

^۱ Human reliability analysis

^۲ Standardized Plant Analysis Risk-Human

انسانی کل (HEP)^۱ برای هر تشخیص یا اقدام در درخت رویداد است [۹]. Abreu و همکارانش HEP را در سناریوهای خرابی مختلف با مصاحبه با اپراتورهای سیستم قدرت در سطوح مختلف تخصص مدل سازی کرده اند [۱۰]. در تحقیقی دیگر، Panteli و Kirschen بررسی کردند که چگونه آگاهی ناکافی از وضعیت اپراتورها بر خرابی های آبشاری در سیستم های قدرت تأثیر می گذارد [۱۱]، که در نهایت یک روش عمومی برای دستیابی به آگاهی کافی از وضعیت اپراتورها ارائه کردند.

در دسته دوم از پژوهش های مرتبط، مدل هایی را بررسی می کنیم که تأثیر عوامل انسانی در زیرساخت های حیاتی را بررسی می کنند. Anghel و همکارانش یک مدل تصادفی برای ارائه یک نمایش جامع از رفتار پیچیده دینامیک شبکه تحت آشفتگی های تصادفی و همچنین پاسخ اپراتور به رویدادهای احتمالی را ارائه دادند [۱۲]. این مدل می تواند پاسخ مطلوب به آشفتگی های متعددی را که در تلاش برای گنجاندن توصیف واکنش انسان به رویدادهای احتمالی هستند، را توصیف کند. همچنین نتایج عددی برای بهینه سازی پاسخ اپراتورها در انتخاب استراتژی بهینه برای کاهش تأثیر رویدادهای خرابی اجزای تصادفی و برای کنترل خاموشی در این مقاله ارائه شده است. Lawton و Gauthier روشی را برای ادغام مدل سازی عملکرد انسانی در مجموعه ابزارهای شبیه سازی SoS^۲ در مقیاس بزرگ ایجاد کردند [۱۳]. در این مقاله تحلیل مقیاس SoS بر عملکرد انسانی ارائه شده و کاربرد مجموعه ابزار با یک نمونه مسئله نشان داده شده است. در تحقیقی دیگر، Bessani و همکارانش یک مدل تصادفی را برای ادغام عملکرد اپراتورهای انسانی در یک شبیه سازی متوالی مونت کارلو معرفی کردند، که زمان پاسخ را در قابلیت اطمینان سیستم های قدرت یکپارچه می کند [۱۴]. نتایج آن ها نشان داد که زمان پاسخ اپراتورها بر قابلیت اطمینان مرتبط با مدت زمان خرابی تأثیر می گذارد، که نشان می دهد یک تصمیم سریع به طور مستقیم به کارایی سیستم کمک می کند.

¹ Human Error Probability

² System-of-System

در دسته سوم پژوهش‌های مرتبط، مدل‌های احتمالی و تحلیل آماری خرابی‌های آبشاری در شبکه‌های قدرت را مورد بحث قرار می‌دهیم. Carreras و همکارانش ادعا کردند که توزیع فرکانس اندازه‌های خاموشی به صورت نمایی بر حسب اندازه خاموشی کاهش نمی‌یابد، بلکه دارای توزیع قانون-توانی است [۱۵]. چنین مشاهدات مهمی از تحلیل یک سری زمانی ۱۵ ساله خاموشی‌ها در سیستم انتقال قدرت آمریکای شمالی به دست آمده است. سپس یک مدل سیستم انتقال قدرت ساده شده برای بررسی بحرانی بودن خرابی‌های آبشاری در سیستم انتقال ارائه شده است. آن‌ها یک مدل تقریبی جریان توان DC و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی استاندارد توزیع تولید را در نظر گرفتند. Kirschen و همکارانش روشی را برای محاسبه یک شاخص احتمالی شرایط بحرانی در یک سیستم قدرت پیشنهاد دادند [۱۶]. این روش بر پایه ایجاد یک مقیاس کالیبره شده از موارد مرجع و استفاده از نمونه‌گیری همبسته در شبیه‌سازی مونت کارلو بود. Neddic و همکارانش بحرانی بودن را در یک شبکه ۱۰۰۰ شینه با یک مدل جریان برق AC که نشان‌دهنده بسیاری از فعل و انفعالاتی است که در خرابی‌های آبشاری رخ می‌دهد، تأیید و بررسی کردند [۱۷]. مشخص شد که در بارگذاری بحرانی افزایش شدیدی در اندازه متوسط خاموشی وجود دارد. همچنین یک توزیع احتمال قانون-توانی اندازه خاموشی مشاهده شد که نشان‌دهنده خطر قابل توجه‌ای از خاموشی‌های بزرگ است. Rahnamay و Hayat تحلیل حساسیت شبکه‌های قدرت را نسبت به خرابی‌های آبشاری انجام دادند و وابستگی بحرانی خرابی‌های آبشاری (یعنی، توزیع‌های اندازه خاموشی با دنباله‌های از قانون-توانی) را به ویژگی‌های اجرایی از جمله سطح بارگذاری، محدودیت‌های کاهش بار و آستانه قطع خط نشان دادند [۱۸].

در ادامه پژوهش‌های هم‌راستا با دسته سوم از پژوهش‌های مرتبط را بررسی و مرور می‌کنیم که شامل پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی خرابی‌های آبشاری می‌باشد. این مدل‌سازی را ابتدا در شبکه قدرت و در نهایت در زیرساخت‌های وابسته به هم بررسی می‌کنیم.

۲-۱- پژوهش‌های پیشین در خصوص مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های

قدرت

در دو دهه گذشته، تحقیقات بسیاری به درک و تحلیل خرابی‌های آبخاری اختصاص داده شده است. اکثر تحقیقات در مورد خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های قدرت بر سیستم‌های قدرت واحد و غیرمتقابل متمرکز بوده‌اند. مروری بر روش‌های مختلف موجود برای تحلیل خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های قدرت توسط Baldick و همکاران ارائه شده است [۱۹]. این تحقیقات را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: تحلیل خرابی‌های آبخاری با استفاده از شبیه‌سازی‌های شبکه قدرت [۲۰]، مدل‌های تحلیلی قطعی [۲۱]، و مدل‌های تحلیل احتمالی [۲۲]. هر سه روش بر جنبه‌های معینی از خرابی‌های آبخاری با درجه‌های مختلفی از جزئیات و پیچیدگی تمرکز می‌کنند.

بسیاری از روش‌هایی که براساس شبیه‌سازی‌های شبکه قدرت هستند، از اضافه بارهای خط استاتیک با مدل جریان برق DC استفاده می‌کنند [۲۰]. در روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، از یک سو، تعاملی بین پیچیدگی و زمان شبیه‌سازی و از سوی دیگر، تعاملی بین جزئیات و سناریوهای مختلفی که شبیه‌ساز می‌تواند شبیه‌سازی کند، وجود دارد.

در دسته روش‌های قطعی، در تحقیق انجام گرفته توسط Crucitti و همکاران مدلی برای خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های پیچیده ارائه شده است [۲۳]. انگیزه این کار تا حدی با الهام از انتشار خرابی‌ها و ازدحام در شبکه‌های کامپیوتری انجام شده است. مدل ارائه‌شده برای شبکه‌های ارتباطی با مدل‌های شبکه قدرت از این نظر متفاوت است که جریان بسته‌های گسسته کاملاً کنترل‌شده به جای آنکه جریان برق در شبکه قدرت را مد نظر قرار دهد، اطلاعات را در نظر می‌گیرد. مثال دیگری از مدل قطعی، یک مدل سیستم غیرخطی ترکیبی است که از روش‌های لیاپانوف استفاده می‌کند که توسط DeMarco برای تعیین خرابی‌های آبخاری ناشی از حالت‌های گذرای دینامیکی در سیستم پیشنهاد شده است [۲۴]. در این تحقیق یک مدل مدار دقیق RLC به عنوان یک مثال برای نشان دادن مفهوم خرابی‌های آبخاری در حوزه مدارهای RLC (مدارهای الکتریکی

متشکل از مقاومت‌ها، سلف‌ها و خازن‌ها هستند) استفاده می‌شود. برخی از محدودیت‌های روش‌های قطعی، عدم توانایی آن‌ها برای نشان دادن تاثیرات رویدادهای تصادفی است که ممکن است بر خرابی‌های آبخاری و محدودیت‌های پیچیدگی و مقیاس‌پذیری در سیستم‌های بزرگ تاثیر بگذارد. مدل‌های احتمالی برای خرابی‌های آبخاری می‌توانند به خوبی پویایی تصادفی خرابی‌های آبخاری و همچنین ویژگی‌های کیفی کلی خرابی‌های آبخاری مانند خطر خاموشی، توزیع احتمال اندازه خاموشی و رفتار مجانبی خرابی‌های آبخاری را در موارد خاص نشان دهند. در این پایان‌نامه، ما بر روش‌های احتمالی برای خرابی‌های آبخاری در شبکه‌های قدرت تمرکز می‌کنیم. مدل CASCADE از Dobson و همکارانش، خرابی‌های آبخاری ناشی از افزایش بار اولیه در اجزای اصلی سیستم را مدل‌سازی می‌کند [۲۲]. در این مدل، خرابی‌ها به دلیل بارگذاری بیش از حد بر روی قطعات رخ می‌دهند و خرابی‌های آبخاری در نتیجه توزیع مجدد بارها میان اجزای باقی‌مانده ایجاد می‌شوند. با این حال، توزیع مجدد بارها براساس فرضیات ساده هستند؛ به عنوان مثال، در نتیجه خرابی‌ها، بارها به طور برابر به اجزای سیستم اضافه می‌شوند. مدل CASCADE یک مدل ساده و تحلیلی است. با این حال، ویژگی‌های توپولوژیکی و الکتریکی شبکه‌های قدرت و یکپارچگی ظرفیت اجزا را در نظر نمی‌گیرد. مدل‌های تحلیلی احتمالی براساس فرآیندهای شاخه‌ای [۲۵، ۲۶] نیز ایجاد شده‌اند که چارچوبی را برای بررسی ویژگی‌های آماری خرابی‌های آبخاری مانند توزیع احتمال اندازه خاموشی فراهم می‌کند. روش فرآیند شاخه‌ای با در نظر گرفتن تولید خرابی‌ها، مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری را ارائه می‌دهد که به موجب آن هر خرابی در هر نسل به صورت مستقل تعداد خرابی‌های تصادفی بعدی را در نسل بعدی ایجاد می‌کند. در این روش، محققان پارامتر تولید خرابی مدل فرآیند شاخه‌ای را برای خرابی‌های آبخاری با استفاده از مجموعه داده‌های خاموشی قدیمی برآورد کرده‌اند [۲۵، ۲۶]. قابل ذکر است که در مقاله Dobson [۲۶] پارامتر تولید خرابی به دلیل پیشرفت آبخاری به جای پارامتر ثابت مفروض در مقاله Ren [25] متغیر در نظر گرفته می‌شود. با این حال، Dobson فرض می‌کند که تمام قطعی‌های خط در نوع خود همگن هستند. مدل‌های ارائه‌شده براساس فرآیند شاخه‌ای دارای این

محدودیت هستند که از درجه آزادی کافی برای نشان دادن تاثیر عوامل فیزیکی مؤثر در خرابی‌های آبشاری برخوردار نیستند، زیرا پارامتر تولید خرابی تنها پارامتری است که در این مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آخر، تحقیق اخیر Wang و همکارانش، یک مدل گذار مارکوف را برای خرابی‌های آبشاری ارائه می‌دهند [۲۷]. احتمال گذار میان حالت‌ها از یک مدل تصادفی برای اضافه بار خط با استفاده از یک مدل توزیع مجدد جریان تصادفی براساس معادلات جریان-توان DC مشتق شده است. فضای حالت مدل [۲۷] بزرگ است، زیرا نیازمند ردیابی وضعیت عملکرد خطوط انتقال و اطلاعات جریان برق می‌باشد. این مدل امکان شبیه‌سازی پیشرفت خرابی‌های آبشاری و بازه زمانی آن را ممکن می‌سازد. با این حال، به دلیل پیچیدگی تحلیلی احتمالات گذار متغیر با زمان، تعیین مشخصه‌های تحلیلی و تقریبی معیارهای احتمالی مانند، احتمال خاموشی و توزیع اندازه خاموشی ممکن نیست.

۲-۲-۲- تحقیقات پیشین در خصوص مدل‌سازی خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های

وابسته به هم

جدا از تحقیقاتی که برای درک قابلیت اطمینان زیرساخت‌های مستقل انجام شده است، علاقه زیادی به درک خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های وابسته به یکدیگر وجود داشته است. مفاهیم کلی زیرساخت‌های وابسته به یکدیگر و چالش‌هایی که در طول مدل‌سازی چنین سیستم‌هایی به وجود می‌آید، در مقاله Min و همکاران مورد بحث قرار گرفته‌اند [۲۸]. ما این تلاش‌ها را برای مدل‌سازی خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های وابسته به یکدیگر به سه کلاس طبقه بندی می‌کنیم که در ادامه توضیح داده شده است.

مدل‌های مبتنی بر گراف - اخیراً مجموعه‌ای از تحقیقات در زمینه درک خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های وابسته به یکدیگر با استفاده از تئوری شبکه و مدل‌های مبتنی بر گراف فعالیت می‌کنند. این تحقیقات از ابزارهای تئوری شبکه برای تعیین خرابی‌های آبشاری براساس ویژگی‌های شبکه و همچنین شناسایی مناطق آسیب‌پذیر شبکه استفاده می‌کنند. در چنین تحقیقاتی، مشکلی

که وجود دارد این است که مشخص کردن حداقل تعداد گره‌ها و لینک‌هایی است که حذف کردن آن‌ها عملکرد کل سیستم را مختل می‌کند [۲۹]. به عنوان مثال، تحقیقات Buldyrev و همکارانش [۳۰] یک روش مبتنی بر گراف را در نظر می‌گیرند که از نظریه نفوذ استفاده می‌کند. محققین راه‌حل‌های تحلیلی را برای بخش بحرانی گره‌ها ارائه می‌کنند که حذف آن‌ها منجر به ایجاد خرابی‌های آبشاری و تفکیک کامل این دو شبکه وابسته را به همراه داشت. بعدها، Li و همکارانش [۳۱] تحقیقات Buldyrev و همکارانش [۳۰] را با اضافه کردن عوامل جغرافیایی در تلفیق میان شبکه‌هایی که وابسته به یک‌دیگر هستند، گسترش دادند؛ به عنوان مثال، محدوده تعامل بین گره‌ها از شبکه‌های مختلف را در نگرفتند. علاوه بر آن، Wang و همکارانش، تحقیقات Li و همکارانش [۳۱] را با در نظر گرفتن بار، توزیع مجدد بار و ظرفیت گره در بررسی پایداری دو شبکه وابسته به هم گسترش دادند [۳۲]. به طور کلی، مدل‌های مبتنی بر گراف، جنبه فیزیکی سیستم را در نظر نمی‌گیرند و آن‌ها در تجزیه و تحلیل خود تنها بر اتصال توپولوژیکی سیستم متکی هستند.

شبیه‌سازی‌های ترکیبی - هدف این روش‌ها ایجاد مکانیسم‌های هم‌زمانی دقیق بین شبیه‌سازی‌های دو سیستم است. همانطور که قبلاً گفته شد، در روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، از یک سو، یک تعامل بین پیچیدگی و زمان شبیه‌سازی و از سوی دیگر، یک تعامل بین جزئیات و سناریوهای مختلفی که شبیه‌ساز می‌تواند شبیه‌سازی کند، وجود دارد. چالش دیگری که برای شبیه‌سازی ترکیبی مخابرات و قدرت مطرح است، هم‌زمان‌سازی شبیه‌سازی‌های سیستم قدرت زمان پیوسته با شبیه‌سازی‌های سیستم مخابراتی رویداد گسسته است. [۳۳، ۳۴] تحقیق Zio و همکارانش نمونه دیگری است که هدف آن توسعه یک چارچوب شبیه‌سازی است که جزئیات فیزیکی خدمات ارائه شده توسط زیرساخت‌ها را بررسی می‌کند و در عین حال ویژگی‌های عملیاتی ضروری آن‌ها را هم نشان می‌دهد [۳۵]. گروهی از تحقیقات در این دسته، روش‌هایی هستند که بر تاثیر خاصی از سیستم کنترل و ارتباطات بر روی شبکه قدرت متمرکز شده و تاثیرات را به طور مستقیم در پویایی و معادلات شبکه قدرت مدل‌سازی می‌کنند. ما چنین روش‌هایی را مدل‌های اثر محور می‌نامیم. نمونه‌ای از چنین مدل‌هایی مقاله Wei و

همکارانش است که در آن نقش تبادل اطلاعات در پایداری گذرا ژنراتورها و از دست دادن همزمانی ژنراتور در شبکه‌های قدرت مورد بررسی قرار گرفته است [۳۶].

مدل‌های احتمالی - تحلیل احتمالی قابلیت اطمینان سیستم‌های دارای وابستگی متقابل، دسته دیگری از مدل‌سازی خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های دارای وابستگی متقابل است. هدف از این تحقیقات، بررسی ریسک خرابی‌های بزرگ در نتیجه وابستگی متقابل بین سیستم‌ها است. به عنوان مثال، محققان در مقالاتی مدل Damon را در ارتباط با یک نظریه میدان میانگین برای مدل‌سازی سیستم‌هایی با زیرساخت تلفیق‌شده معرفی کردند [۳۷، ۳۸]. این تحقیقات نشان می‌دهند که اثرات تلفیق بین سیستم‌ها می‌تواند کل سیستم را آسیب‌پذیر کند و احتمال خرابی‌های بزرگ را افزایش دهد. برخی از بخش‌های متداخل بین روش‌های این دسته با مدل‌های مبتنی بر گراف در استفاده از مدل‌های احتمالی است، به عنوان مثال، تحقیق Brummitt و همکارانش پیوستگی بهینه میان دو شبکه وابسته به هم را در حین استفاده از چارچوب فرآیند شاخه‌ای چندگانه مشخص می‌کند [۳۹].

اثرات شبکه محابراتی بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت

به کمک روش زنجیره‌های مارکوف وابسته

۳-۱- مقدمه

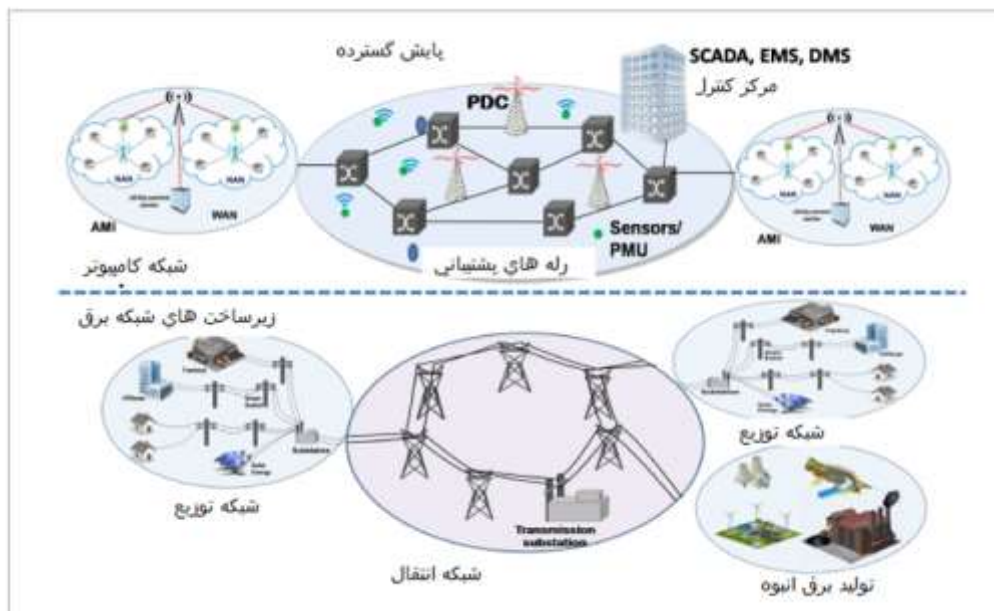
در این فصل، ابتدا به طور خلاصه مروری بر ساختار زیرساخت‌های سایبری-الکتریکی خواهیم داشت. سپس، مدل زنجیره مارکوف وابسته (IDMC) را معرفی می‌کنیم، که یک چارچوب احتمالی را برای به دست آوردن اثرات وابستگی‌های متقابل بین شبکه‌های فیزیکی بر روی پویایی تصادفی از خرابی‌های آبشاری را در یک محیط انتزاعی فراهم می‌کند. هدف این روش ایجاد یک چارچوب احتمالی یکپارچه متشکل از یک سیستم از زنجیره‌های مارکوف ناهمگن وابسته می‌باشد، MCها یک زنجیره برای سیستم فیزیکی می‌باشند. وابستگی‌های متقابل به گونه‌ای ثبت می‌شوند که یک گذار در یک MC، احتمال گذار سایر MCها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. ما MCهای زمان گسسته را در نظر می‌گیریم و با توصیف احتمال گذار IDMC بر اساس زنجیره‌های واحد و وابستگی‌های متقابل آنها اثر متقابل بین سیستم‌های وابسته را مدل‌سازی می‌کنیم.

در این فصل، بعد از مرور پیش‌نیازهای اولیه، ابتدا چارچوب کلی از IDMC را ارائه می‌دهیم و سپس مدل IDMC را برای خرابی‌های آبشاری در زیرساخت‌های سایبری-الکتریکی معرفی می‌کنیم. علاوه بر این، براساس چارچوب IDMC معیارهایی را برای تعیین کمیت قدرت وابستگی متقابل بین سیستم‌ها پیشنهاد می‌کنیم.

۳-۲- ساختار زیرساخت‌های الکتریکی - سایبری

شبکه قدرت یک شبکه به هم پیوسته است که جریان الکتریسیته را از منابع تولید به مصرف‌کننده منتقل می‌کند. به طور کلی، شبکه‌های قدرت از شبکه‌های توزیع و انتقال تشکیل شده‌اند. شبکه انتقال می‌تواند جریان الکتریسیته را تا فواصل دور منتقل کند. شبکه انتقال را به عنوان مجموعه‌ای از گره‌ها توصیف می‌کنیم که توسط خطوط انتقال ولتاژ قوی به هم متصل شده‌اند. در شبکه انتقال، گره‌های شبکه نشان دهنده باس‌های بار (پست‌های فرعی که به شبکه توزیع متصل می‌شوند)، ایستگاه‌های تولید □، ترکیبی از باس‌های بار و مولد، و باس‌های انتقال که هیچ بار یا منبع تولیدی نداشته و فقط به انتقال جریان برق در شبکه انتقال کمک می‌کند، هستند. در یک پست برق، جریان

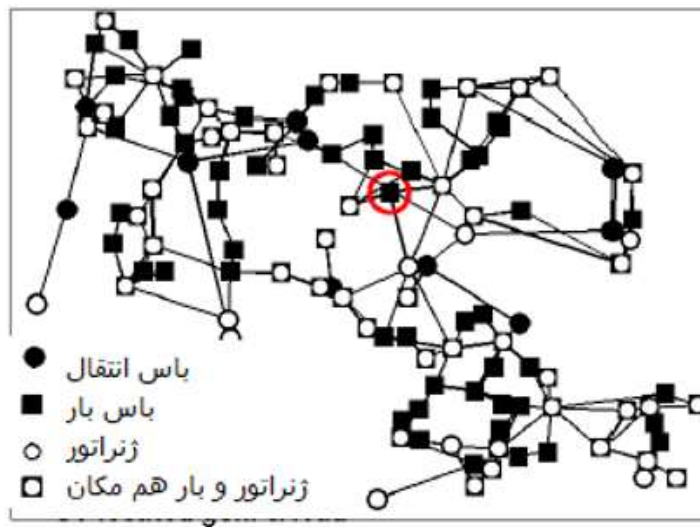
برق از سطح ولتاژ انتقال به سطح ولتاژ توزیع کاهش می‌یابد و توسط خطوط توزیع به مصرف‌کنندگان واحد تحویل داده می‌شود. شکل (۱-۳) طرحواره شبکه‌های توزیع و انتقال را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ طرحواره یک شبکه توزیع و انتقال [۸]

شکل ۱-۳ یک مرجع متعادل ساز (BA)^۱ متشکل از یک شبکه انتقال و دو شبکه توزیع به همراه سیستم‌های کنترلی و ارتباطی آن‌ها است. زیرساخت‌های الکتریکی-سایبری دارای ساختارهای سلسه مراتبی هستند [۸]. از آنجایی که خاموشی‌های بزرگ و خرابی‌های آبشاری از ویژگی‌های شبکه انتقال هستند، ما در این پایان نامه بر روی شبکه انتقال از شبکه‌های قدرت تمرکز می‌کنیم. ما از سیستم باس IEEE118 (شکل ۲-۳) به عنوان نمونه‌ای از شبکه‌های انتقال برای اهداف شبیه‌سازی و آنالیز استفاده می‌کنیم.

¹ Balancing Authority



شکل ۲-۳ همبندی سیستم باس IEEE 118 [۱]

شکل ۲-۳ همبندی سیستم باس IEEE 118 را نشان می‌دهد. فرض بر این است که مرکز کنترل برای این شبکه انتقال با گره‌ای که توسط دایره مشخص شده است، باهم در یک مکان قرار دارند [۱]. شبکه‌های قدرت به منظور عملکرد روزانه قابل اطمینان و کارآمد به سیستم‌های کنترلی و ارتباطی خود متکی هستند. سیستم‌های کنترلی و ارتباطی شبکه‌های قدرت، سیستم‌های سلسله مراتبی هستند (شکل ۱-۳ را مشاهده کنید). به عنوان مثال، در سطح شبکه توزیع، شبکه‌های مجاور محلی (NAN)^۱ اتصال شبکه به نقاط پایانی مانند کنتورهای هوشمند مستقر در خانه و مشاغل مصرف‌کنندگان را فراهم می‌کند. در سطح بعدی سلسله مراتب، شبکه‌های گسترده (WAN)^۲ چندین NAN متعدد را به مراکز کنترل در سطح شبکه توزیع برای اهداف نظارت و کنترل متصل می‌کنند. سطح دیگری از سلسله مراتب در سطح شبکه انتقال است که در آن حسگرها، واحد اندازه‌گیری فازور (PMU)^۳، مرکز جمع‌آوری داده‌های فازور (PDC)^۴، و رله‌های حفاظتی از طریق یک شبکه پایش منطقه‌ای گسترده متصل می‌شوند که این شبکه اطلاعات وضعیت اجزای شبکه انتقال را به مرکز

¹ Neighbor Area Networks

² Wide Area Networks

³ Phasor Measurement Unit

⁴ Phasor Data Concentrators

کنترل در سطح شبکه انتقال مخابره می‌کند. مراکز کنترل به عنوان مثال SCADA، سیستم مدیریت انرژی (EMS)^۱ یا سیستم مدیریت توزیع شده (DMS)^۲ را به منظور کنترل و نظارت بر سیستم با استفاده از اطلاعات ارائه شده توسط سیستم مخابراتی اعمال می‌کنند.

تلاش‌های قابل توجهی در مطالعه ارتباطات شبکه هوشمند پدیدار شده است. بخش بزرگی از این تلاش‌ها تنها بر شبکه ارتباطی برای سطح توزیع شبکه‌های قدرت تاکید دارند [۴۰]. شبکه‌های ارتباطی برای شبکه انتقال شبکه‌های قدرت در مقاله Li و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۱]. این تحقیق ویژگی‌های حیاتی و راه‌حل‌های فناوری را معرفی می‌کند که می‌توانند در سطح شبکه انتقال به کار گرفته شوند. بسته به راه‌حل‌های فناوری و نحوه به کارگیری آن‌ها، شبکه ارتباطی ممکن است همبندی‌های متفاوتی داشته باشد. یکی از همبندی‌های ممکن شبکه برای سیستم ارتباطی شبکه انتقال همان همبندی خود شبکه انتقال است که ما آن را همبندی پایه می‌نامیم. همبندی پایه یک همبندی ارتباطی با یک گره در هر باس و پیوندهای ارتباطی در امتداد خطوط انتقال است. این همبندی برای مثال ممکن است با استفاده از کابل نوری زمینی (OPGW)^۳ در طول خطوط انتقال شبکه قدرت تشکیل شوند.

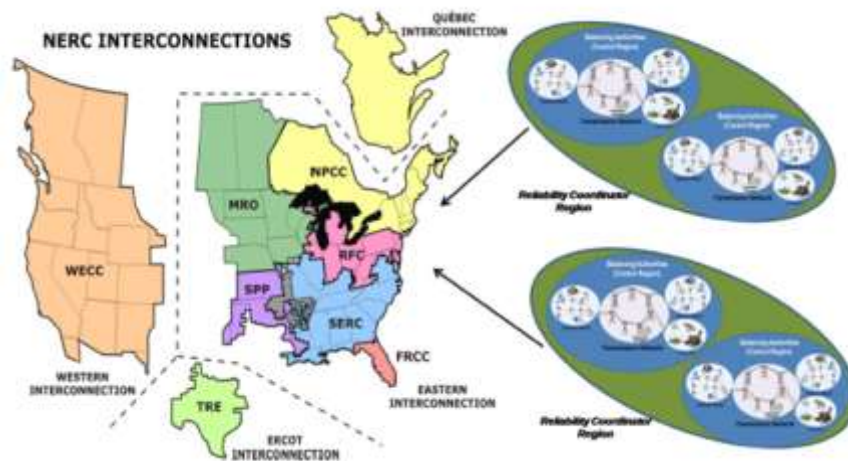
به طور کلی، زیرسیستم‌های انتقال منطقه‌ای در شبکه‌های قدرت که توسط یک نهاد کنترل می‌شوند، مرجع متعادل کننده (BA) نامیده می‌شود. برای مثال، (شکل ۳-۱) یک BA را نشان می‌دهد. هر BA دارای یک مرکز کنترل اولیه و مجموعه‌ای از مراکز کنترل حفاظتی و پشتیبانی است که مسئول حفظ پایداری منطقه است. به عنوان مثال، مرکز کنترل، سیستم را با استفاده از سیستم‌های SCADA نظارت می‌کند و تصمیم‌گیری‌های کنترلی را برای BA اتخاذ می‌کند. چنین تصمیماتی به عنوان مثال در مورد یکپارچه سازی و طراحی منابع تولید و یافتن راه‌حلی برای

¹ Energy Management System

² Distributed Management System

³ Optical Ground Wires

توزیع بهینه پخش بار برای شبکه انتقال است. چندین BA یک منطقه تعدیل کننده قابلیت اطمینان را تشکیل می دهند و در نهایت چندین منطقه تعدیل کننده قابلیت اطمینان، یک اتصال متقابل را شکل می دهند. به عنوان مثال، زیرساخت الکتریکی ایالات متحده از سه اتصال متقابل تشکیل شده است که در (شکل ۳-۳) نشان داده شده است [۴۲].



شکل ۳-۳ سه اتصال متقابل زیرساخت های الکتریکی ایالات متحده [۴۲].

فرض می کنیم که اجزای شبکه قدرت از دستگاه های الکترونیکی هوشمند (IED)^۱ استفاده می کنند که عوامل اندازه گیری و کنترل را میزبانی می کنند. عامل های کنترلی دارای محرک هایی هستند که امکان اجرای سیگنال های کنترل از راه دور مانند قطع مدارشکن و تنظیم شیر ترانسفورماتور را ممکن می سازد. در این پایان نامه به دو نوع عامل کنترلی و اندازه گیری می پردازیم. ابتدا، عوامل کنترلی را در پست های برق در نظر می گیریم که سیگنال های کنترل کاهش بار از راه دور را با ارسال سیگنال های مناسب به شبکه توزیع مرتبط با خود پیاده سازی می کنند. سپس، عوامل اندازه گیری را در نظر می گیریم که دمای خطوط انتقال فشار قوی را اندازه گیری می کنند و آن را به مرکز کنترل ارسال می کنند. از این عوامل که با استفاده از شبکه ارتباطی با مرکز کنترل ارتباط برقرار می کنند، برای معرفی وابستگی های متقابل خاصی بین شبکه قدرت و سیستم مخابراتی استفاده می کنیم.

¹ Intelligent Electronic Devices

زنجیره مارکوف (MC) مدل تصادفی برای توصیف یک توالی از رویدادهای احتمالی است که در آن احتمال هر رویداد فقط به حالت رویداد قبل بستگی دارد. زنجیره مارکوف یک فرآیند تصادفی بدن حافظه است، بدین معنی که توزیع احتمال شرطی حالت بعد تنها به حالت فعلی بستگی دارد و مستقل از گذشته آن است. این نوع بدون حافظه بودن خاصیت مارکوف نام دارد. زنجیره مارکوف در مدل سازی دنیای واقعی کاربردهای زیادی دارد. تغییرات حالات سیستم، گذار نامیده می شوند و احتمالاتی که به این تغییر حالت ها نسبت داده می شوند، احتمال گذار نام دارند.

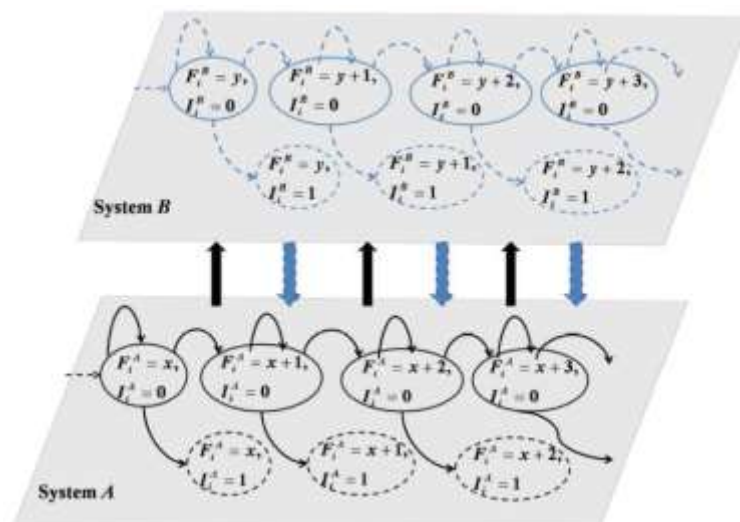
۳-۳- بررسی مدل MC برای خرابی های آبشاری

باتوجه به ارتباط آن با توسعه IDMC، با بررسی جنبه های مرتبط با یک مدل MC برای خرابی های آبشاری شروع می کنیم [۵]. این MC دارای احتمال گذار وابسته به حالت است که توسط ویژگی های فیزیکی خاص و عملیاتی سیستم مشخص می شود. اگرچه این مدل نخستین بار در مقاله Dobson و همکاران [۴۳] در زمینه شبکه های برق قدرت ارائه شده است، اما معتقدیم که این مدل برای گسترش اپیدمی و خرابی های آبشاری در یک مجموعه سطح بالا در سیستم های مختلف پیچیده، فراتر از سیستم های قدرت، به اندازه کافی کلی می باشد. فضای حالت MC به طور کلی نشان دهنده حالت یک سیستم فیزیکی (به عنوان مثال، یک شبکه قدرت) با استفاده از دو متغیر حالت است:

تعداد خرابی ها در سیستم را با نماد F و حساسیت سیستم در مقابل خرابی های بعدی را با یک متغیر حالت باینری نشان می دهیم که این متغیر باینری را متغیر پایداری آبشاری می نامیم، که در آن $I=1$ نشان دهنده یک حالت آبشاری پایدار و $I=0$ نشان دهنده یک حالت آبشاری ناپایدار خواهد بود. متغیر حالت I می تواند به طور کلی ویژگی های مختلف فیزیکی سیستم را تحت تاثیر خرابی های آبشاری فراتر از تعداد خرابی ها ثبت کند. به عنوان مثال، در یک شبکه قدرت، ویژگی های فیزیکی و کنترلی سیستم مشخص می کند که آیا حالت شبکه قدرت آبشاری پایدار است یا خیر. متغیر حالت I همچنین برای تعیین حالت های جذب ($I=1$) و حالت های غیرجذب (گذرا) ($I=0$) مورد استفاده قرار می گیرد. وجود چندین حالت جذب مختلف در MC، مدل سازی اندازه های مختلف خرابی ها را امکان پذیر

می‌کند. در اینجا، خرابی‌های آبخاری به عنوان دنباله‌هایی از گذار در حالت سیستم در نظر گرفته می‌شوند، که هریک ناشی از یک خرابی مجزا هستند. فرض خرابی واحد در هر انتقال زمانی قابل قبول است که وقتی زمان به فواصل زمانی کوچک تقسیم می‌شود، در هر گذار حداکثر یک رویداد خرابی واحد را مجاز بدانند.

از اهمیت ویژه این فرض این است که احتمال گذار MC وابسته به حالت است. این موضوع به مدل‌سازی سناریوهای عملیاتی مختلف برای سیستم را در هنگام انباشته شدن خرابی‌ها کمک می‌کند و همچنین ثبت فازهای مختلف خرابی‌های آبخاری مانند، فازهای تشدید و فازهای شروع با نرخ‌های مختلف خرابی‌ها را تسهیل می‌کند. به‌طور خاص، احتمال توقف آبخاری P_{stop} ، را به عنوان احتمال گذار از یک حالت با خرابی‌های F_i و $I=0$ به یک حالت دیگر با همان تعداد خرابی و $I=1$ تعریف می‌کنیم. احتمال توقف آبخاری تابعی از F_i است؛ یعنی، $P_{stop}(F_i)$ و آن به طور کامل MC و رفتار خرابی آبخاری سیستم را مشخص می‌کند. در مقاله Dobson و همکارانش [۴۳]، $P_{stop}(F_i)$ با استفاده از شبیه‌سازی‌های سیستم قدرت برآورد شده است. در شکل ۳-۵، ساختار MCها برای هر یک از دو سیستم وابسته نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ دو MC نشان‌دهنده پویایی تصادفی خرابی‌های آبخاری در هر دو سیستم وابسته به یکدیگر [۴۴]

۳-۴- بررسی زنجیره‌های مستقل مارکوف (IDMC)

برای سادگی ما با استفاده از دو سیستم وابسته A و B روش IDMC را توصیف می‌کنیم، با این درک که می‌توان برای هر تعداد متناهی از سیستم‌های وابسته رویکرد مشابه را اعمال کرد. فرض می‌کنیم که پویایی تصادفی خرابی‌های آبخاری در هر یک از سیستم‌ها توسط یک MC مشابه آنچه که در بخش قبل شرح داده شد و در شکل ۳-۵ نشان داده شده است، مدل‌سازی شده باشد. در این MCها، حالت هر سیستم در زمان گسسته $n \geq 0$ با تعداد خرابی‌ها و متغیر پایداری به عنوان مثال برای سیستم A به صورت $S_n^A = (F_n^A, I_n^A)$ نشان داده می‌شود، فضای حالت MC برای سیستم A با S_A نمایش داده می‌شود، که $\{ \text{غیرجذب}, \text{جذب} \} \times \{1, \dots, m_A\}$ و $S_A =$ تعداد اجزاء موجود در سیستم A می‌باشد. برای سادگی، فرض می‌شود که فضای حالت MC برای سیستم B دارای همان ساختاری است که برای سیستم A دارد؛ با این حال بطور کلی فضاهای حالت MCهای مختلف می‌تواند متفاوت باشد. فرآیندهای تصادفی X_n و Y_n به ترتیب در زمان گسسته $n \geq 0$ حالت سیستم‌های A و B را نشان می‌دهند. همانطور که در بخش‌های قبل اشاره شد، یک راه‌حل ساده و نادرست برای تلفیق دو MC این است که یک MC ترکیبی با یک فضای حالت S_C ایجاد شده توسط ضرب دکارتی فضاهای حالت MCهای مربوط به سیستم‌های مجزا از هم یعنی؛ $S_C = S_A \times S_B$ می‌باشد. همانطور که در مثال زیر مشاهده می‌شود، نقص این ساختار این است که احتمال گذار در میان حالت‌ها در S_C فقط با احتمال گذار MCهای جداگانه (تک تک MCها) تعیین نمی‌شود و فرآیند ترکیبی برای MC تضمین نشده است. فرض می‌کنیم که $X_1, X_2, \dots$ یک دنباله مستقل و دارای توزیع یکسان (iid) باشد و فرآیند Y_n به صورت $Y_n = X_{n-1} + X_{n-2}$ برای $n > 2$ و $Y_2 = Y_1 = X_1$ تعریف شده باشد، آنگاه فرآیند Y_n مارکوف خواهد بود. زیرا:

$$\begin{aligned} P\{Y_n \mid Y_{n-1}, \dots, Y_1\} &= P\{X_{n-1} + X_{n-2} \mid X_{n-2} + X_{n-3}, \dots, X_1\} \\ &= P\{X_{n-1} + X_{n-2} \mid X_{n-2} + X_{n-3}\} = P\{Y_n \mid Y_{n-1}\}. \end{aligned} \quad (1-3)$$

با این حال، فرآیند (X_n, Y_n) یک فرآیند مارکوفی نیست، زیرا:

$$P\{Y_n, X_n \mid Y_{n-1}, \dots, Y_1, X_{n-1}, \dots, X_1\} = P\{X_{n-1} + X_{n-2}, X_n \mid X_{n-2} + X_{n-3}, \dots, X_1, X_{n-1}, \dots, X_1\}$$

$$= P\{Y_n, X_n \mid Y_{n-1}, X_{n-1}, X_{n-2}\} \quad (2-3)$$

جمله اضافی X_{n-2} در خط آخر فرمول (۳-۲) قابل حذف نیست، زیرا Y_n به دلیل داشتن جملات مشترک از X_{n-1}, X_{n-2} و Y_{n-1} مستقل نیست. به طور خاص، فرآیند (X_n, Y_n) به دلیل وابستگی متقابل بین فرآیندهای مستقل، مارکوف نیست. این بدین معناست که حتی اگر ما بتوانیم سیستم‌های A و B را به صورت جداگانه توسط MCها مدل‌سازی کنیم، وابستگی‌های متقابل بین این دو سیستم می‌تواند باعث ایجاد حافظه در فرآیند ترکیبی شود، که از مارکوف بودن زنجیره ترکیبی جلوگیری می‌کند. با استفاده از این مشاهدات در زمینه سیستم‌های وابسته به هم، مشاهده می‌کنیم که پویایی تصادفی یک سیستم تحت تاثیر پویایی سیستم دیگر قرار دارد، و به همین ترتیب، گذار یک مرحله‌ای در کل سیستم می‌تواند به طور کلی به گذارهای متعدد قبلی (چندین گذار قبلی) از زیرسیستم‌های تشکیل‌دهنده آن وابسته باشد. در نتیجه، تعریف فضای حالت جدید به سادگی توسط ضرب دکارتی فضاهای حالت اطلاعات کافی را برای به دست آوردن کامل وابستگی متقابل بین سیستم‌ها و تعیین احتمالات گذار فرآیند ترکیبی فراهم نمی‌کند. هدف از ترکیب MCها برای نشان دادن سیستم‌های وابسته به منظور گنجاندن حافظه کافی در هر MC است، در حالی که پیچیدگی زنجیره ترکیبی را به حداقل می‌رساند.

۳-۴-۱- احتمالات گذار و فضای حالت

براساس بحث در زیر بخش قبلی که در آن ما اشاره کردیم که وابستگی متقابل بین دو سیستم به طور کلی به داده‌های قدیمی در ارتباط با پویایی آن‌ها بستگی دارد، پویایی تصادفی سیستم A ممکن است به طور کلی به حافظه گام M_1 سیستم B و به طور مشابه سیستم B ممکن است به طور کلی بستگی به حافظه‌ی گام M_2 سیستم A داشته باشد. برای سادگی نماد و بدون از دست دادن کلیات، فرض می‌کنیم که $M_1 = M_2 = M$. برای ثبت اثرات حافظه گام M در هریک از سیستم‌ها، تابع

احتمال گذار باید به فرم f باشد، یعنی؛ $[0,1] \rightarrow (S_C)^M \times S_C$. در این رابطه $(S_C)^M$ اطلاعات مربوط به حالت فعلی و همچنین حالت‌های قبلی $M-1$ را ثبت می‌کند. آخرین S_C در دامنه تابع احتمال f ، فضای مقصد گذارها را ثبت می‌کند. برای ساخت یک MC معادل برای دستگاه حالت محدود (متناهی) با فضای حالت S_C و احتمال گذار که توابع $M-1$ حالت قبلی سیستم هستند، باید فضای حالت S_C را گسترش دهیم تا این حافظه را در خود جای دهد، یعنی، $S_I = (S_A \times S_B)^M$. با توجه به حافظه تعبیه شده در تعریف حالت‌ها، اندازه فضای حالت S_I به طور کلی می‌تواند به طور محدود بزرگ باشد. در زیر عنوان بعدی، یک روش کوانتیزه کردن برای کاهش اندازه فضای حالت گام M در MC معرفی می‌کنیم، در حالی که فقط حافظه مورد نیاز را ثبت می‌کند.

۳-۴-۲- کوانتیزاسیون حافظه

در این بخش روش کمی‌سازی (کوانتیزاسیون) حافظه برای کاهش اندازه فضای حالت IDMC با تعریف کلاس‌های هم‌ارزی رفتار برای پویایی سیستم‌های نشان داده شده توسط $\mathcal{H}_I$ را ارائه می‌دهیم. به عنوان مثال، اگر ما بتوانیم براساس تاریخچه پویایی آن استنباط کنیم که یک سیستم پایدار است یا ناپایدار، در این صورت می‌توانیم تاریخچه پویایی سیستم را به دو دسته (گروه) از رفتارها طبقه بندی کنیم، یعنی، $\mathcal{H}_I = \{stable, unstable\}$. یک تابع کوانتیزاسیون را تعریف می‌کنیم: $\mathcal{H}_I \rightarrow (S_A \times S_B)^M, g$ ، که در این رابطه $\mathcal{H}_I$ یک مجموعه با تعداد اعضاء کوچک است که شامل کلاس‌های معادل هم ارز رفتار گذشته می‌باشد. از این رو، تابع g حافظه مربوط به گذشته را به تعداد کمی از کلاس‌های هم‌ارزی فشرده می‌کند. با چنین کوانتیزاسیون حافظه می‌توانیم فضای حالت IDMC را به صورت فشرده با $S_I = \mathcal{H}_I \times (S_A \times S_B)$ نشان دهیم.

۳-۴-۳- ثبت اثرات وابستگی های متقابل

تا این مرحله در مورد به دست آوردن دانش حالت و حافظه سیستم در یک حالت IDMC به روش فشرده‌گی بحث کردیم. گام بعدی پیشنهاد یک روش ساده برای توصیف چگونگی تاثیر رفتار خاص یک

سیستم بر رفتار سیستم دیگر است. در سطح بالاتر تاثیرات رفتار یک سیستم بر روی سیستم دیگر را می توان به سه دسته تقسیم کرد به: ۱. بهتر شدن، ۲. بدتر شدن و ۳. ثابت ماندن، که در آن معنای دقیق این اصطلاحات را در چارچوب MC می توان مشخص کرد با:

۱. کاهش احتمال خرابی اضافی، ۲. افزایش احتمال خرابی اضافی، ۳. عدم تغییر احتمال خرابی اضافی.

از این رو، تاثیر وابستگی های متقابل را می توان با اعمال اثرات بیان شده براساس حالت سیستم و تاریخچه فشرده سازی در احتمالات گذار به دست آورد.

۳-۴-۴- قدرت وابستگی متقابل

قدرت وابستگی متقابل بین دو سیستم را براساس دو عامل تعریف می کنیم:

۱- چه میزان رفتار یک سیستم بر پویایی سیستم دیگر تاثیر می گذارد (به عنوان مثال، تغییر نسبی در احتمال گذار).

۲- چه مقدار حافظه برای ثبت اثرات وابستگی متقابل مورد نیاز است.

یک روش برای تعیین کمیت اولین عامل در رابطه (۳-۳) ارائه شده است، که حداکثر تاثیر سیستم B با متغیر Y بر روی سیستم A با متغیر X و حافظه M را مشخص می کند.

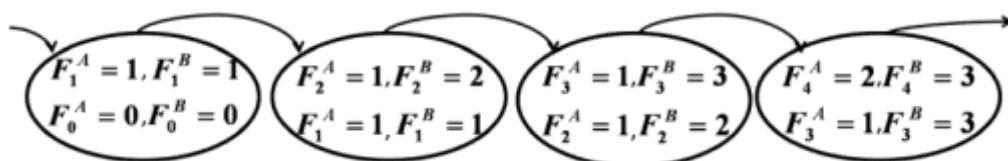
$$\delta_X^{(M)}(Y) = \sup_{x_i, x_{i+1} \in S_A, y_j \in S_B, i-M+1 \leq j \leq i} \{ |P\{X_{i+1} = x_{i+1} | X_i = x_i\} - P\{X_{i+1} = x_{i+1} | X_i = x_i, Y_i = y_i, \dots, Y_{i-M+1} = Y_{i-M+1}\}| \}. \quad (3-3)$$

باید توجه داشته باشیم که وقتی مقدار δ بزرگ است، وابستگی شدید خواهد بود و وقتی مقدار δ برابر صفر باشد، سیستم A مستقل از سیستم B خواهد بود. قدرت وابستگی متقابل را براساس اولین معیار رابطه $\max(\delta_X^{(M)}(Y), \delta_Y^{(M)}(X))$ تعریف می کنیم. جهت تعیین کمیت عامل دوم، مقدار $\kappa_X^\epsilon(Y)$ را کوچکترین عدد صحیح M معرفی می کنیم، به طوری که برای تمام $i, j > M$ ، $|\delta_X^{(i)}(Y) - \delta_X^{(j)}(Y)| < \epsilon$ ، که در آن ϵ یک عدد مثبت کوچک است

که نشان‌دهنده آستانه حساسیت برای وابستگی متقابل است. بنابراین، برای ثابت ϵ از پیش تعیین شده، $\kappa_X^\epsilon(Y)$ حداقل حافظه مورد نیازی است که برای سیستم A در نظر گرفته می‌شود تا وابستگی آن به سیستم B را ثبت کند. ما می‌توانیم به سادگی وابستگی متقابل بین دو سیستم را با کمیت $\kappa^\epsilon \triangleq \max(\kappa_X^\epsilon(Y), \kappa_Y^\epsilon(X))$ تعریف کنیم. باید توجه داشته باشیم که وقتی مقدار κ^ϵ بزرگ است، وابستگی متقابل قوی خواهد بود و $\kappa^\epsilon = 0$ به این معنی است که دانش درمورد حالت فعلی سیستم A و B برای مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل کافی خواهد بود.

۳-۴-۵- روش درهم‌سازی

در این زیر عنوان، اصلاحاتی را در چارچوب IDMC ارائه می‌دهیم، تحت عنوان چارچوب درهم‌سازی، که به ما این امکان را می‌دهد که به طور مستقیم ویژگی‌های "علت و معلولی" را در وابستگی متقابل بین دو سیستم ثبت کنیم. روش درهم‌سازی مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل بین سیستم‌ها را با ثبت اثرات فوری هر گذار بر روی سیستم دیگر ساده می‌کند. به طور خاص، در روش درهم‌سازی فرض می‌کنیم که این دو سیستم به نوبت در حال تغییر حالت‌های خود عمل می‌کنند. این روش را به دلیل اینکه گذارها را در سیستم A و B با این ترتیب خاص درهم می‌آمیزد، درهم‌سازی می‌نامیم. روش درهم‌سازی یک سطح اضافی از جزئیات را به مدل اصلی IDMC اضافه می‌کند. به عنوان مثال، یک حافظه اساسی دو مرحله‌ای IDMC را در نظر می‌گیریم، که تا حدودی در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، در این مثال مشاهده می‌کنیم که در دنباله گذار، یک خرابی در سیستم A و B با دو خرابی در سیستم B و سپس یک خرابی در سیستم A را به دنبال دارد.



شکل ۳-۵ نمونه‌ای از دنباله گذار در یک مدل IDMC با حافظه دو مرحله‌ای، در این مثال فقط حالات غیر جذب در نظر گرفته شده است [45].

در اینجا اثرات خرابی‌های مستقل در سیستم B بر روی سیستم A مشخص نیست. به عنوان مثال، ممکن است که اولین خرابی باعث آسیب‌پذیری سیستم A شود، درحالی که خرابی دوم و سوم در سیستم B به این آسیب‌پذیری بیافزاید و بنابراین، منجر به خرابی در سیستم A دو گام پایین‌تر از خط می‌شود. همچنین می‌توان حدس زد که خرابی‌های اول و دوم هیچ تاثیری بر روی سیستم A نداشته است، اما در عوض این خرابی سوم در سیستم B بود که باعث خرابی در سیستم A شد.

باید توجه داشته باشیم که مدل اصلی IDMC نمی‌تواند چنین جزئیاتی را حل کند؛ با این حال، روش درهمسازی به ما این امکان را می‌دهد تا با تجزیه اثرات ترکیبی به سناریوهای علت و معلولی دسترسی پیدا کنیم. همچنین باید توجه داشته باشیم که هر مدل درهمسازی را می‌توان به یک مدل اساسی IDMC کاهش داد. تمام تعاریف مربوط به مدل IDMC ارائه‌شده در بخش‌های قبل برای چارچوب درهمسازی‌شده نیز معتبر خواهد بود. با این حال، برای پیگیری گذارها، از یک متغیر کمکی برای توصیف اینکه کدام سیستم تحت یک انتقال در هر زمان مشخص داده شده، تحت تاثیر یک گذار قرار دارد، استفاده می‌کنیم (به عنوان مثال، از یک متغیر باینری برای دو سیستم وابسته به هم استفاده می‌کنیم).

۳-۵- بررسی مدل IDMC برای خرابی‌های آبخاری در زیرساخت‌های الکتریکی - سایبری

در این بخش، یک مدل IDMC را با استفاده از روش درهمسازی برای زیرساخت‌های سایبری - الکتریکی با تمرکز بر وابستگی‌های متقابل که باعث گسترش خرابی‌ها می‌شوند، را توسعه می‌دهیم. سیستم قدرت را با سیستم A و سیستم ارتباطی را با سیستم B نشان می‌دهیم. برای ساده سازی نماد، تعداد خرابی‌ها در شبکه قدرت و تعداد خرابی‌ها در سیستم ارتباطی را به ترتیب با متغیرهای x و y نشان می‌دهیم. علاوه بر این، احتمال گذار به حالت پایدار شبکه قدرت در MC را با $p(x)$ نشان می‌دهیم (یعنی، $p(x) = P_{stop}(x)$). همچنین در یک MC که نمایانگر سیستم ارتباطی است، احتمال گذار به یک حالت با خرابی اضافی را با $q(y)$ نشان می‌دهیم. با در نظر گرفتن خرابی‌های احتمالی در

نیستند؛ بنابراین، در واقع یک زیرمجموعه کوچکی از S_I مورد نیاز است. به عنوان مثال، برای هر تعداد خرابی در زمان n ، فقط دو احتمال برای تعداد خرابی‌ها در زمان $n-1$ وجود دارد.

بدین ترتیب، اندازه فضای حالت بدون حالت‌هایی که مجاز نیستند برابر $4(\mathcal{N}_A \mathcal{N}_B)$ خواهد بود، که در آن $\mathcal{N}_A$ و $\mathcal{N}_B$ به ترتیب، تعداد حالات فضای حالت سیستم A و B را نشان می‌دهند. در نهایت، همچنین به یک متغیر کمکی نیاز داریم تا گذارها را در سیستم‌های A و B به نوبت پیگیری کنیم. این باعث خواهد شد که اندازه فضای حالت برابر $S_I = 8(\mathcal{N}_A \mathcal{N}_B)$ شود. مفهوم MC در همسازی شده برای این سیستم براساس فرضیات فوق در شکل ۳-۷-نشان داده شده است.

در مرحله بعد، حالت IDMC را در زمان گسسته n با $S_n = (X_n, I_n, Y_n, L_n, K_n)$ تعریف می‌کنیم، که در آن X_n و I_n متغیرهای حالت شبکه قدرت هستند که به ترتیب نشان‌دهنده تعداد خرابی‌ها و شاخص پایداری آبشاری هستند و Y_n متغیر حالت سیستم ارتباطی می‌باشد که نشان‌دهنده تعداد خرابی‌ها است. L_n ، یک متغیر کمکی می‌باشد که نوبت گذار را در چارچوب در همسازی نشان می‌دهد؛ به طور خاص، $L_n = 0$ نشان می‌دهد که آخرین گذار در شبکه قدرت و $L_n = 1$ نشان می‌دهد که آخرین گذار در سیستم ارتباطی رخ داده است. در نهایت، متغیر باینری K_n حافظه پویایی را با نشان‌دادن اینکه آیا مولفه دیگری در آخرین گذار از کار افتاده است یا خیر، ثبت می‌کند ($K_n = 1$ بدین معنی است که یک خرابی در زمان $n-1$ رخ داده است). در اینجا تابع کوانتیزاسیون، حافظه g را به $\mathcal{H} = \{\text{بدون خرابی جدید}, \text{خرابی جدید}\}$ نگاشت می‌کند. اگرچه اندازه S_I در این مثال به ترتیب اندازه ضرب دکارتی فضاهای حالت می‌باشد، اما می‌توانیم رفتار حالت پایدار این IDMC را به طور مؤثر با استفاده از معادلات اختلاف که در فصل ۴ ارائه شده است، تجزیه و تحلیل کنیم.

۳-۵-۲- احتمالات گذار

در این بخش، احتمال گذار IDMC را برای زیرساخت‌های سایبری-الکتریکی براساس احتمال گذار تک تک MCها و وابستگی‌های متقابل بین دو سیستم مشخص می‌کنیم، که در ادامه توضیح داده شده است. به طور کلی، توابع مختلف وابستگی شبکه قدرت به شبکه ارتباطی و توابع مختلف وابستگی شبکه ارتباطی به شبکه قدرت را می‌توان در نظر گرفت. در این پایان‌نامه، توابع وابستگی زیر را برای مدل‌سازی تعاملات بین دو سیستم در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است تمامی روابط ذیل باتوجه به روابط آورده شده در مراجع [۴۳-۴۶] تعریف شده‌اند

ابتدا یک تابع وابستگی شبکه قدرت به شبکه ارتباطی را با: $d: \{0,1,2, \dots, m_B\} \rightarrow [0,1]$ تعریف می‌کنیم، که در آن m_B تعداد اجزای موجود در سیستم ارتباطی را نشان می‌دهد. تابع d وابستگی قابلیت اطمینان سیستم قدرت را به حالت سیستم ارتباطی توصیف می‌کند. به طور خاص، بسته به تعداد اجزای خراب شده در سیستم ارتباطی (که در آن اجزای موجود در سیستم ارتباطی شامل: روترها، سوئیچ‌ها، لینک‌های ارتباطی هستند)، قابلیت اطمینان سیستم قدرت کاهش خواهد یافت. به عنوان مثال، اگر $d(y_n) = 0.5$ باشد، احتمال این‌که خرابی‌های آبخاری در شبکه قدرت در گذار بعدی متوقف شود، به نصف کاهش خواهد یافت. تابع d احتمال گذار را برای شبکه قدرت براساس پویایی MC شبکه ارتباطی همان‌طور که در شکل ۳-۸ نشان داده شده است، اصلاح می‌کند.

دو مقدار کرانه‌ای برای d وجود دارد. اگر خرابی در سیستم ارتباطی بر شبکه قدرت تاثیر نگذارد، $d=1$ خواهد بود؛ از طرف دیگر، وقتی که خرابی یک مولفه سیستم ارتباطی منجر به یک خرابی در شبکه قدرت می‌شود، به طور قطعی $d=0$ خواهد بود. به طور کلی، هرچه مقدار d به صفر نزدیک‌تر باشد، قابلیت اطمینان شبکه قدرت کاهش می‌یابد. باید توجه داشته باشیم که تابع d نیز می‌تواند به حالت شبکه قدرت بستگی داشته باشد. به همین ترتیب، برای دستیابی به وابستگی شبکه ارتباطی به شبکه قدرت، تابعی را براساس فرض ذکر شده در بخش ۳-۳-۱ در نظر می‌گیریم، که مشخص می‌کند که گذار در سیستم ارتباطی به طور احتمالی به این مسئله بستگی دارد که آیا در آخرین گذار در

شبکه قدرت خرابی وجود داشته است یا خیر. این فرض منجر به تابع وابستگی باینری می‌شود، $\mathfrak{X}: \{0,1\} \rightarrow \{0,1\}$ که بدین معنی است که احتمال گذار در شبکه ارتباطی به $\mathfrak{X}(K_n)q(Y_n)$ و $\mathfrak{X}(K_n)(1 - q(Y_n)) + (1 - \mathfrak{X}(K_n))$ اصلاح خواهد شد، که به ترتیب مربوط به داشتن خرابی اضافی و نداشتن خرابی اضافی هستند. به عنوان مثال، اگر $\mathfrak{X}(K_n) = 1$ باشد، احتمال داشتن خرابی اضافی در سیستم ارتباطی برابر $q(Y_n)$ می‌باشد و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود. به همین ترتیب، احتمالات گذار IDMC برای زیرساخت‌های سایبری-الکتریکی از حالت $S_n = (x_n, i_n, y_n, \ell_n, k_n)$ به حالت $S_{n+1} = (x_{n+1}, i_{n+1}, y_{n+1}, \ell_{n+1}, k_{n+1})$ در رابطه (۳-۴) ارائه شده است.

$$f(S_{n+1} | S_n) = \begin{cases} 1 & \begin{aligned} &\ell_{n+1} \neq \ell_n, y_{n+1} \neq y_n \\ &(I): i_n = 1, x_{n+1} = x_n, \\ &\ell_{n+1} = \ell_n, y_{n+1} = y_n \end{aligned} \\ q(y_n) & \begin{aligned} &(II.a): i_n = i_{n+1} = 0, \\ &\ell_n = 0, x_{n+1} = x_n \\ &y_{n+1} = y_n + 1, \end{aligned} \\ 1 - q(y_n) & \begin{aligned} &(II.b): i_n = i_{n+1} = 0, \\ &\ell_n = 0, x_{n+1} = x_n \\ &y_{n+1} = y_n, \end{aligned} \\ 1 - \frac{p(x_n)d(y_n)}{k_n + d(y_n)(1 - k_n)} & \begin{aligned} &(III.a): i_n = i_{n+1} = 0 \\ &\ell_n = 1, y_{n+1} = y_n, \\ &x_{n+1} = x_n + 1 \end{aligned} \\ \frac{p(x_n)d(y_n)}{k_n + d(y_n)(1 - k_n)} & \begin{aligned} &(III.b): i_n = 0, i_{n+1} = 1 \\ &\ell_n = 1, y_{n+1} = y_n, \\ &x_{n+1} = x_n \end{aligned} \\ 0 & (IV): \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4-3)$$

عناصر رابطه (4-3) را به صورت جداگانه توضیح می‌دهیم:

- شرایط گروه I دلالت بر این دارد که IDMC در حالت جذب است، زیرا $i_n = 1$ می‌باشد. هنگامی که یک سیستم وارد حالت جذب می‌شود، هرگز آن را با احتمال ۱ ترک نمی‌کند.

- شرایط گروه II مواردی را نشان می‌دهد که گذار بعدی در شبکه ارتباطی انجام می‌گیرد (یعنی؛). $\ell_n = 0$.

(a) شرایط II.a بیانگر این موضوع است که در گذار قبلی یک خرابی در سیستم

قدرت وجود داشته است (یعنی؛ $k_n=0$). از این رو احتمال یک خرابی ارتباطی

جدید (یعنی؛ $\mathcal{I}(k_n)q(y_n)$ به $q(Y_n)$ ساده می شود.

(b) شرایط II.b مکمل شرط II.a می باشد (در گذار بعدی هیچ خرابی ارتباطی رخ

نمی دهد).

• شرایط گروه III مواردی را نشان می دهد که گذار بعدی در شبکه قدرت خواهد

بود (یعنی؛ $\ell_n = 1$).

(a) شرایط III.a احتمال داشتن یک خرابی در شبکه برق قدرت را بسته به مقدار

k_n مشخص می کند (اگر مؤلفه خرابی در شبکه ارتباطی وجود داشته باشد یا

خیر). در این صورت اگر $k_n = 1$ باشد، احتمال گذار برابر $1 - p(x_n)d(y_n)$ و

اگر $k_n = 0$ باشد، احتمال گذار برابر $1 - p(x_n)$ خواهد بود.

(b) شرایط III.b موردی را نشان می دهد که در آن گذار بعدی باعث می شود که

سیستم وارد حالت جذب شود. به طور مشابه شرایط III.a، احتمال گذار به

حالت پایدار بستگی به مقدار k_n دارد.

• شرایط گروه IV گذارهایی که مجاز نیستند را ثبت می کند. به عنوان مثال، داشتن

بیش از یک خرابی در یک گذار یا گذارها بین حالت ها با $\ell_{n+1} = \ell_n$ و $i_n \neq 1$ (براساس

فرض درهم سازی) نمایش داده می شود.

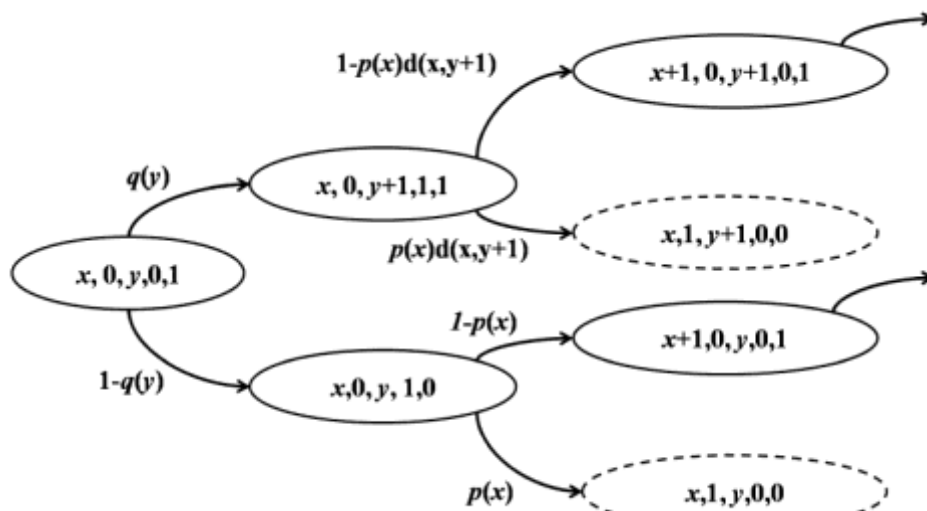
در این ساختار، قدرت وابستگی سیستم قدرت به سیستم ارتباطی برابر است با:

$$\delta_x^{(2)}(Y) = \max_{x_n \in S_A, y_n \in S_B} p(x_n)(1 - d(y_n)) \quad (5-3)$$

به طور مشابه، قدرت وابستگی سیستم ارتباطی به سیستم قدرت برابر است با:

$$\delta_Y^{(2)}(X) = \max_{y_n} q(y_n) \quad (6-3)$$

برای نشان دادن مدل IDMC برای زیرساخت‌های سایبری-الکتریکی، بخشی از MC با احتمال گذار آن میان حالت‌ها در (شکل ۳-۸) نشان داده شده است.



شکل ۳-۷ بخشی از مدل IDMC برای سیستم قدرت و سیستم ارتباطی با احتمال‌های گذار در میان حالت‌ها [۴۶].

۳-۵-۳- راه حل حالت پایدار

در این بخش، یک سیستم از معادلات اختلاف را استخراج می‌کنیم که راه حل حالت پایدار IDMC را برای زیرساخت‌های سایبری-الکتریکی توصیف می‌کند. با معرفی کردن $\mathcal{P}_{s_i}(s)$ به عنوان احتمال مجانبی برای رسیدن به حالت $s \in S_I$ از حالت اولیه $s_i = (x_0, 0, y_0, 0, 1)$ شروع می‌کنیم؛ به این معنا که حالت اولیه دارای x_0 خرابی در شبکه قدرت و y_0 خرابی در شبکه ارتباطی است و فرض می‌کنیم که آخرین خرابی در شبکه قدرت اتفاق بیافتد. بیشتر فرض می‌کنیم که $y_0 \leq x_0$ است. به طور خاص، به احتمال رسیدن به حالت‌های پایدار در شبکه قدرت که در آن خرابی‌های آبشاری خاتمه می‌یابد، علاقه مند هستیم؛ این حالت‌ها دارای فرم $\tilde{s} = (x, 1, y, 0, 0)$ هستند و نشان دادن $\mathcal{P}_{s_i}(\tilde{s})$ با $\mathcal{F}(x, y)$ راحت خواهد بود.

به طور مشابه، برای حالت‌های گذرا شبکه قدرت یعنی $\hat{s} = (x, 0, y, 0, 1)$ احتمال رسیدن به حالت $\mathcal{P}_{s_i}(\hat{s})$ شبکه قدرت گذرا را با $\zeta(x, y)$ نشان می‌دهیم. درنهایت، توصیفی از $\mathcal{F}(x, y)$ و $\zeta(x, y)$ ارائه می‌دهیم.

قضیه ۳-۱. فرض می‌کنیم که حالت اولیه سیستم تلفیقی $s_i = (x_0, 0, y_0, 0, 1)$ باشد. برای

$x_0 \leq x \leq m_A$ و $y_0 \leq y \leq m_B$ و $y_0 \leq x_0$ و توابع غیر صفر p, q, d ، روابط بازگشتی زیر برقرار

هستند:

$$\mathcal{F}(x, y) = \alpha_1(x, y)\mathcal{F}(x-1, y) + \alpha_2(x, y)\mathcal{F}(x-1, y-1) + \alpha_3(x, y)\zeta(x-1, y-1),$$

و

$$\zeta(x, y) = \alpha_4(x, y)\mathcal{F}(x-1, y) + \alpha_5(x, y)\zeta(x-1, y-1) \quad (۷-۳)$$

ضرایب $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ و α_4 از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \alpha_1(x, y) &= \frac{p(x)(1-q(y))(1-p(x-1))}{p(x-1)}, \\ \alpha_2(x, y) &= \frac{p(x)d(y)q(y-1)(1-p(x-1)d(y-1))}{p(x-1)d(y-1)}, \\ \alpha_3(x, y) &= (1-q(y-1))p(x)d(y)q(y-1) \left((1-p(x-1)) - \frac{(1-p(x-1)d(y-1))}{d(y-1)} \right) \\ &\quad + q(y-1)p(x)(1-q(y))(1-d(y)), \\ \alpha_4(x, y) &= \frac{(1-p(x-1))}{p(x-1)}, \\ \alpha_5(x, y) &= q(y-1) \left((1-p(x-1)d(y)) - \frac{d(y)p(x-1)(1-p(x-1))}{p(x-1)} \right) \end{aligned} \quad (۸-۳)$$

و شرایط مرزی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(x_0, y_0) &= (1-q(y_0))p(x_0), \\ \mathcal{F}(x_0, y_0+1) &= q(y_0)p(x_0)d(y_0+1), \\ G(x_0, y_0) &= 1. \end{aligned} \quad (۹-۳)$$

ضرایب موجود در رابطه ۸-۳ را می‌توان در سه مورد خاص به شرح زیر ساده کرد:

وقتی که $y=1$ است، ضرایب α_1 و α_4 مشابه رابطه ۸-۳ خواهند بود، اما ضرایب α_2, α_3 و α_5 از

روابط ۱۰-۳ حاصل می‌شوند:

$$\alpha_2(x, y) = \frac{p(x)d(y)q(y-1)(1-p(x-1))}{p(x-1)},$$

$$\alpha_3(x, y) = q(y-1)p(x)(1-q(y))(1-d(y)),$$

$$\alpha_5(x, y) = 0. \quad (10-3)$$

۱. وقتی که $y=x$ است، تمام مقادیر α برابر صفر خواهد بود، به جز α_2 که توسط رابطه ۱۱-۳

حاصل می شود:

$$\alpha_2(x, y) = \frac{d(y)p(x)q(y-1)(1-p(x-1)d(y-1))}{p(x-1)d(y-1)}. \quad (11-3)$$

وقتی که $y=x-1$ است، ضرایب α از روابط ۱۲-۳ به دست می آیند:

$$\alpha_1(x, y) = \frac{p(x)(1-q(y))(1-p(x-1)d(y))}{p(x-1)d(y)},$$

$$\alpha_2(x, y) = \frac{p(x)d(y)q(y-1)}{p(x-1)d(y-1)},$$

$$\alpha_3(x, y) = (1-q(y-1))d(y)p(x)q(y-1) \times \left((1-p(x-1)) - \frac{1}{d(y-1)} \right),$$

$$\alpha_4(x, y) = \frac{(1-p(x-1))}{p(x-1)},$$

$$\alpha_5(x, y) = (1-d(y))q(y-1). \quad (12-3)$$

قضیه ۱-۳، محاسبه مستقیم احتمال اندازه آبخاری را در هر سیستم میسر می کند. احتمال

خاموشی همراه با x خرابی در شبکه قدرت با $\mathcal{R}_p(x)$ نشان می دهیم، که می توان آن را به صورت زیر

نوشت:

$$\mathcal{R}_p(x) = \sum_{y: 0 \leq y \leq x} \mathcal{F}(x, y) \quad (13-3)$$

علاوه بر این، احتمال y خرابی در سیستم ارتباطی را با $\mathcal{R}_c(y)$ نشان می دهیم، که می توان آن را

به صورت زیر نوشت:

$$\mathcal{R}_c(y) = \sum_{x: y \leq x \leq N_1} \mathcal{F}(x, y) \quad (14-3)$$

پیچیدگی زمانی محاسبات عددی رابطه ۳-۷ به ترتیب، تعداد اجزای موجود در سیستم می‌باشد که این امر را برای سیستم‌های بزرگ مقیاس‌پذیر می‌کند. حتی اگر فضای حالت تحلیلی مسئله بزرگ باشد، می‌خواهیم بر این موضوع تاکید کنیم که برای اعمال این چارچوب در سیستم‌های دنیای واقعی مانند شبکه‌های قدرت، می‌توان داده‌ها و شبیه‌سازی‌های قدیمی را برای استخراج و برآورد پارامترهای مدل به خصوص، احتمال گذار تک تک MCها و وابستگی‌های بین سیستم‌ها را مورد مطالعه قرار داد. با برآورد چنین پارامترهایی، چارچوب ارائه شده ارزیابی قابلیت اطمینان را براساس ویژگی‌های سیستم‌های تحت مطالعه ارائه خواهد داد.

مدل سازی اثرات شبکه مجابراتی بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت

۴-۱- مقدمه

در این فصل، نتایج مربوط به توزیع اندازه خرابی در سیستم‌های قدرت و مخابراتی وابسته به هم براساس راه‌حل‌های عددی سیستم معادلات تفاضلی در رابطه (۳-۷) ارائه می‌شود. با استفاده از این نتایج، نشان می‌دهیم که وابستگی متقابل بین دو سیستم می‌تواند آسیب‌پذیری‌هایی را در کل سیستم ایجاد کند و احتمال خاموشی‌های بزرگ را افزایش دهد. به طور خاص، نشان می‌دهیم که وابستگی‌های متقابل بین دو سیستم قابل اطمینان مستقل ممکن است منجر به یک سیستم تلفیقی غیر قابل اطمینان شود.

در نظریه احتمالات توزیع‌های دم-سنگین به توزیع‌های گفته می‌شود که دم توزیع آن‌ها سنگین‌تر از از دم توزیع نمایی است. در بسیاری از کاربردها توزیع دم راست مورد استفاده قرار می‌گیرد، با این حال ممکن است که توزیع چپ یا هر دو طرف دم توزیع سنگین باشد. سه زیرکلاس مهم از توزیع‌های دم سنگین عبارتند از: توزیع دم کلفت، توزیع دم دراز و توزیع‌های زیرنمایی. در این پایان‌نامه توزیع دم-سنگین مورد استفاده ما متعلق به کلاس زیرنمایی می‌باشد. قبل از ارائه نتایج ابتدا به معرفی سیستم‌های قابل اطمینان و غیر قابل اطمینان می‌پردازیم.

۴-۲- سیستم‌های قابل اطمینان و غیر قابل اطمینان

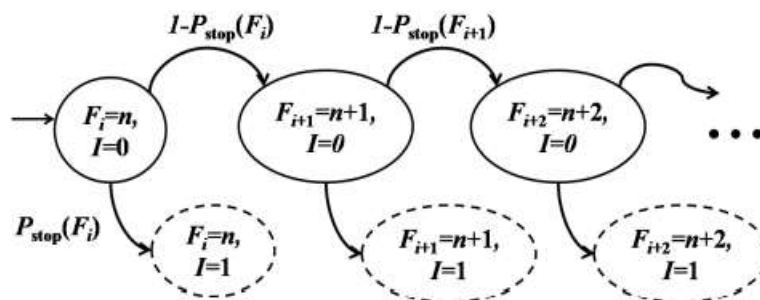
ما اغلب سیستمی را در نظر می‌گیریم که در آن توزیع احتمال اندازه آبخاری از توزیع نمایی یک سیستم قابل اطمینان پیروی می‌کند، زیرا احتمال آبخاری‌های بزرگ در مقایسه با توزیع‌های دم-سنگین کوچک‌تر است. ما همچنین سیستمی با یک توزیع دم-سنگین از اندازه آبخاری را یک سیستم غیر قابل اطمینان می‌نامیم. به طور خاص، ما دو نوع سیستم غیر قابل اطمینان را در نظر می‌گیریم:

۱) سیستمی که در آن تابع جرم احتمال (PMF)^۱ اندازه آبخاری از توزیع قانون-توانی پیروی می‌کند.

۲) سیستمی که در آن تابع جرم احتمال (PMF) اندازه آبخاری یک برآمدگی در انتهای توزیع دارد.

شبکه‌های قدرت برخی از ویژگی‌های مرتبط با سیستم‌های پیچیده را نشان می‌دهند [1]. تابع جرم احتمال (PMF) اندازه خاموشی برای این سیستم‌ها دارای دنباله دم-سنگین می‌باشد، به ویژه زمانی که آن‌ها در نزدیکی محدوده بحرانی خود عمل می‌کنند.

نمونه‌ای از توزیع‌های دم-سنگین، توزیع قانون-توانی می‌باشد، که به دلیل نسبت دادن به پویایی سیستم پیچیده، مورد توجه قرار گرفته است. در این بخش، ما ویژگی‌های احتمالات گذار را برای خرابی‌های آبخاری در مدل‌سازی زنجیره مارکوف که منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خاموشی می‌شود، را مشخص می‌کنیم. در (شکل ۴-۱)، یک مدل زنجیره مارکوف ساده شده را مشاهده می‌کنیم. همانطور که در فصل سوم اشاره شد، تعداد خرابی‌ها F و متغیر پایداری I را به عنوان متغیرهای حالت در نظر می‌گیریم.



شکل ۴-۱ یک مدل زنجیره مارکوف ساده شده با متغیرهای حالت F و I [۴۵]

¹ Probability mass function

در این بخش، با استفاده از مدل زنجیره مارکوف ساده ارائه شده در (شکل ۱-۴)، احتمال توقف آبخاری $P_{stop}(F_i)$ را برای مدلی که دقیقاً منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خاموشی می‌شود، را محاسبه می‌کنیم. احتمال خاموشی با n خرابی را با $D(n|S_i)$ نشان می‌دهیم، که می‌توان آن را به راحتی در معادله تفاضلی زیر با استفاده از مدل ارائه شده در (شکل ۱-۴) به دست آورد.

$$D(n+1|S_i) = \frac{P_{stop}(n+1)(1-P_{stop}(n))}{P_{stop}(n)} D(n|S_i). \quad (۱-۴)$$

اگر فرض کنیم که حالت اولیه شبکه قدرت یک خرابی با $I=0$ دارد، یعنی، $S_i = (1,0)$ ، آن‌گاه شرایط مرزی برای رابطه (۱-۴) برابر $D(1|S_i) = P_{stop}(1)$ خواهد بود. براساس رابطه (۱-۴)، اگر احتمالات گذار زنجیره مارکوف ثابت باشد، یعنی؛ $P_{stop}(F_i)$ ثابت باشد، آن‌گاه زنجیره می‌تواند خرابی‌های آبخاری را در یک سیستم مدل‌سازی کند، که PMF اندازه خاموشی برای آن از توزیع نمایی پیروی می‌کند. یعنی:

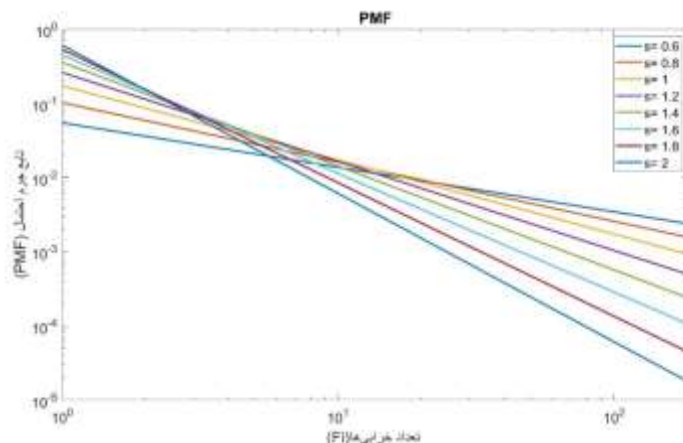
$$P(x, s) = se^{(-s)x}. \quad (۲-۴)$$

بنابراین، تعریف ما از سیستم‌های قابل اطمینان به این معناست که آن‌ها دارای احتمالات گذار ثابت هستند. در مرحله بعد، برای تشخیص تابع $P_{stop}(F_i)$ که منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خاموشی می‌شود، مقادیر $D(n|S_i)$ را با استفاده از مقادیر متناظر PMF یک توزیع قانون-توانی گسسته، یعنی، قانون Zipf به دست می‌آوریم. PMF این توزیع به شرح زیر است:

$$P(x, s, k) = \frac{1/x^s}{1/\sum_{i=1}^k i^s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k i^{-s}} x^{-s}. \quad (۳-۴)$$

در این رابطه، s پارامتر توزیع و k تعداد خطوط موجود در شبکه قدرت می‌باشد. به عبارت دیگر، $D(n|S_i) = P(x, s, k)$ را در نظر می‌گیریم، که در آن s پارامتر آزاد مدل است. داده‌های قدیمی

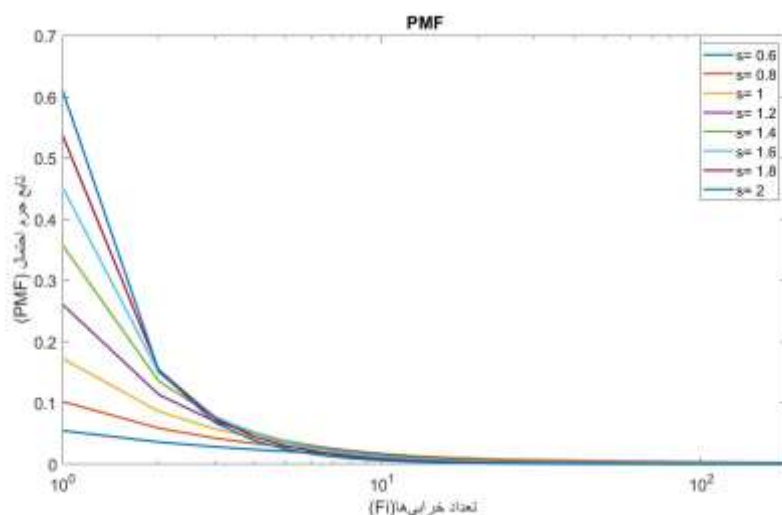
NERC¹ یک مقیاس‌بندی قانون-توانی از فرکانس خاموشی را نشان می‌دهد که خاموشی با انرژی مصرف‌نشده اندازه‌گیری می‌شود و توان s در این مقیاس‌بندی قانون-توانی تقریباً بین ۰/۶ تا ۱/۹ با گام ۰/۲ می‌باشد [1]. در این بخش، ما سیستم ۱۱۸ شینه IEEE را برای شبکه قدرت در نظر می‌گیریم که این سیستم دارای ۱۸۶ خط انتقال می‌باشد.



شکل ۲-۴ PMF اندازه خاموشی در مقیاس لگاریتمی

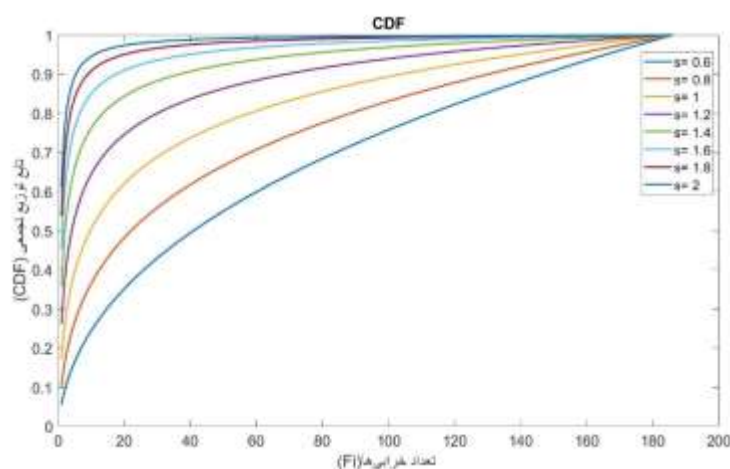
ما توزیع اندازه خاموشی (یعنی، $D(n | S_i) = P(x, s, k)$) را برای مقادیر مختلف x و s در مقیاس لگاریتمی در (شکل ۲-۴) نشان داده‌ایم. با توجه به (شکل ۲-۴) با در نظر گرفتن به عنوان مثال $s=2$ (خط آبی رنگ) به ازای اولین خرابی، تابع جرم احتمال اندازه آبشاری تقریباً مقداری برابر یک دارد که با افزایش تعداد خرابی‌ها خط آبی رنگ مربوط به $s=2$ سیر نزولی را در پیش گرفته و در نتیجه با افزایش تعداد خرابی‌ها مقدار تابع جرم احتمال اندازه خاموشی کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ۳-۴، این امر بدیهی است که با افزایش s مقدار تابع جرم احتمال کاهش یابد.

¹ North American Electrical Reliability Council



شکل ۳-۴ تابع $P_{stop}(F_i)$ با فرض PMF قانون Zipf

تابع $P_{stop}(F_i)$ دارای توزیع دم-سنگین می‌باشد، که منجر به PMF قانون Zipf در اندازه آبخاری برای انواع مختلف s می‌شود، که یک سیستم غیر قابل اطمینان از نوع (۱) می‌باشد.



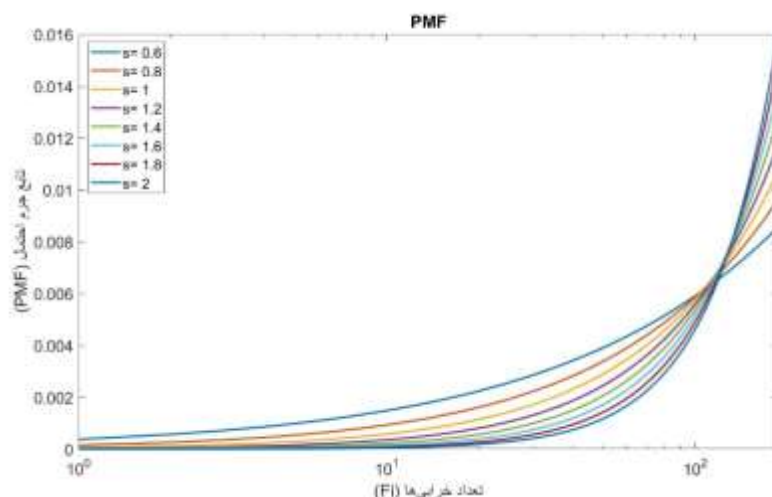
شکل ۴-۴ تابع توزیع تجمعی مربوط به تابع جرم احتمال

یکی از راه‌های توصیف توزیع متغیرهای گسسته، استفاده از تابع جرم احتمال (PMF) است. به طور دقیق‌تر می‌توان گفت که تابع جرم احتمال را نمی‌توان برای متغیرهای تصادفی پیوسته تعریف کرد. تابع توزیع تجمعی (CDF)^۱ مربوط به یک متغیر تصادفی، راه جایگزینی به منظور توصیف متغیرهای

^۱ Cumulative distribution function

تصادفی است. مزیت تابع توزیع تجمعی این است که می‌توان آن را برای هر نوع متغیر تصادفی تعریف کرد. (شکل ۴-۴) توزیع تجمعی تابع جرم احتمال مربوط (شکل ۳-۴) را به ازای مقادیر مختلف متغیر s نشان می‌دهد که تابعی غیر صفر بوده و نوای صعودی دارد که برد آن در بازه $[0, 1]$ می‌باشد. با توجه به (شکل ۴-۴) با افزایش تعداد خرابی‌ها احتمال توزیع تجمعی به ازای مقادیر مختلف متغیر s سیر صعودی در پیش گرفته و از آنجایی که توزیع تجمعی از جنس احتمال می‌باشد، حداکثر مقدار احتمال توزیع تجمعی برابر یک می‌باشد.

تابع $P_{stop}(F_i)$ را با استفاده معادله تفاضلی ۴-۱ برای توزیع‌های نشان داده شده در (شکل ۳-۴) محاسبه کرده‌ایم. نتایج به دست آمده برای تابع $P_{stop}(F_i)$ در (شکل ۳-۴) نشان داده شده است. (شکل ۳-۴) یک توزیع دم-سنگین را نشان می‌دهد، که منجر به PMF قانون Zipf در اندازه آبخاری برای انواع مختلف s می‌شود، که یک سیستم غیر قابل اطمینان از نوع (۱) می‌باشد. با توجه به (شکل ۳-۴) از خرابی تقریباً ۲۰ به بعد به ازای تمام مقادیر s ، PMF اندازه آبخاری تقریباً برابر صفر می‌باشد. (شکل ۴-۵) انتهای توزیع دم-سنگین (شکل ۳-۴) را نشان می‌دهد، که یک برآمدگی در انتهای توزیع دم-سنگین ایجاد شده و توزیع دم-سنگین را به فرم کاسه‌ای شکل تبدیل کرده است. برآمدگی ایجاد شده در انتهای توزیع PMF نشان‌دهنده تنش بر روی سیستم می‌باشد، که منجر به تغییر جرم احتمال در انتهای توزیع شده است و از آنجایی که تابع $P_{stop}(F_i)$ از جنس احتمال می‌باشد، دامنه تغییرات تابع جرم احتمال بدیهی است که بین صفر تا یک باشد. به خصوص، اندازه برآمدگی و رفتار تابع کاسه‌ای شکل به ویژگی‌های اجرایی شبکه بستگی دارد و بنابراین مشخصه اجرایی خاصی از سیستم ممکن است منجر به عملکردهای کاسه‌ای شکل شود. در مقاله veremyev و همکارانش، سطح بارگذاری در سیستم قدرت، محدودیت‌های افت بار و آستانه قطع خط انتقال به عنوان نمونه‌هایی از ویژگی‌های اجرایی شبکه معرفی شده‌اند [۵]. به عنوان مثال، محدودیت‌های افت بار که به عنوان نسبت بارهای غیر قابل کنترل (بارهایی که در افت بار مشارکت نمی‌کنند) به کل بار در شبکه قدرت تعریف شده، بر $P_{stop}(F_i)$ تأثیر می‌گذارد.



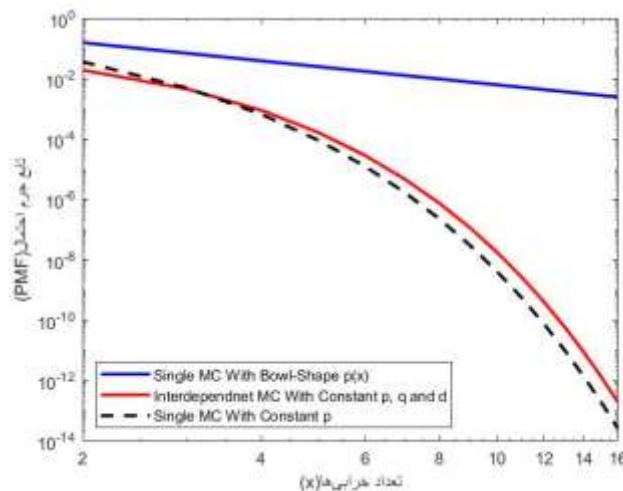
شکل ۴-۵ انتهای توزیع (شکل ۳-۴) را نشان می‌دهد، که منجر به یک برآمدگی در انتهای توزیع دم-سنگین شده و یک تابع کاسه‌ای شکل را ایجاد کرده است.

علاوه بر این، نتیجه می‌گیریم که رفتار کاسه‌ای شکل برای احتمالات گذار وابسته به حالت $P_{stop}(F_i)$ احتمال خاموشی‌های بزرگتر را افزایش می‌دهد. به طور خاص، توابع کاسه‌ای شکل خاص منجر به توزیع قانون-توانی برای PMF اندازه خاموشی می‌شود. علاوه بر این، ویژگی‌های اجرایی خاصی از سیستم، سیستم را در شرایط بحرانی تنظیم می‌کند که منجر به یک توزیع دم-سنگین می‌شود. ما می‌خواهیم در این بخش تأکید کنیم که احتمالات گذار وابسته به حالت، عناصر کلیدی چارچوب زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری جهت ثبت طیف گسترده‌ای از رفتارهای تصادفی برای سیستم‌های پیچیده مانند شبکه‌های قدرت هستند.

۴-۳- تأثیر وابستگی متقابل بر توزیع احتمال اندازه خاموشی

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، ما سیستم ۱۱۸ شینه IEEE را برای شبکه قدرت در نظر می‌گیریم که این سیستم دارای ۱۸۶ خط انتقال می‌باشد. فرض می‌کنیم که تعداد اجزای موجود در سیستم مخابراتی نیز برابر ۱۸۶ مؤلفه ارتباطی باشد. زمانی که یک مدل زنجیره مارکوف که توزیع این مدل از زنجیره مارکوف با استفاده از معادله تفاضلی رابطه (۴-۱) شرح داده شده است، دارای احتمالات گذار ثابت (مستقل از حالت) باشد، توزیع اندازه خاموشی آن به صورت نمایی خواهد بود.

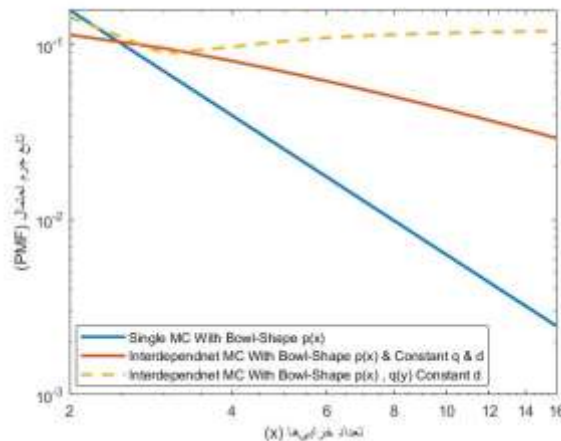
ما همچنین بیان کردیم که تابع کاسه‌ای شکل برای احتمال توقف آبخاری در زنجیره مارکوف منجر به توزیع دم سنگین برای اندازه خاموشی می‌شود. به طور خاص، اشکال خاصی از تابع کاسه‌ای شکل برای P_{stop} منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خاموشی می‌شود. نتایج ارائه شده در (شکل ۴-۶) سناریوهای مورد بحث در بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۶ PMF اندازه خرابی در شبکه برق در مقیاس لگاریتمی برای یک سیستم قدرت قابل اطمینان با توزیع خاموشی نمایی (نقطه چین)، یک شبکه برق غیر قابل اطمینان نوع (۱) با توزیع قانون-توانی (خط آبی) و یک زنجیره مارکوف وابسته با ثابت‌های p ، q و d (خط قرمز)

در (شکل ۴-۶) PMF اندازه خرابی برای یک سیستم قدرت قابل اطمینان با P_{stop} ثابت و با توزیع خاموشی به صورت نمایی (خط نقطه چین)، یک شبکه قدرت غیر قابل اطمینان با فرم کاسه‌ای شکل برای P_{stop} با توزیع قانون-توانی برای اندازه خرابی (خط آبی) و یک زنجیره مارکوف وابسته با ثابت‌های p ، q و d با توزیع خاموشی به صورت نمایی برای اندازه خرابی (خط قرمز) را ارائه کردیم. به منظور نشان دادن این موضوع که وابستگی متقابل بین دو سیستم بر PMF اندازه آبخاری تأثیر می‌گذارد، از مدل IDMC با ثابت‌های p ، q و d استفاده کردیم، که بیانگر این است که سیستم مخابراتی و شبکه قدرت به طور جداگانه سیستم‌های قابل اطمینان فرض می‌شوند. PMF اندازه آبخاری در شبکه قدرت (یعنی، $\mathcal{R}_p$) برای چنین سیستم وابسته‌ای در (شکل ۴-۶) با خط قرمز نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، مشاهده کردیم که اگر چه هر دو MC مستقل از هم برای شبکه

قدرت و مدل IDMC منجر به یک رفتار آبخاری نمایی در شبکه قدرت می‌شوند، احتمال آبخاری‌های بزرگ در شبکه قدرت در مدل IDMC به دلیل وابستگی متقابل بین دو سیستم تشدید می‌شود.

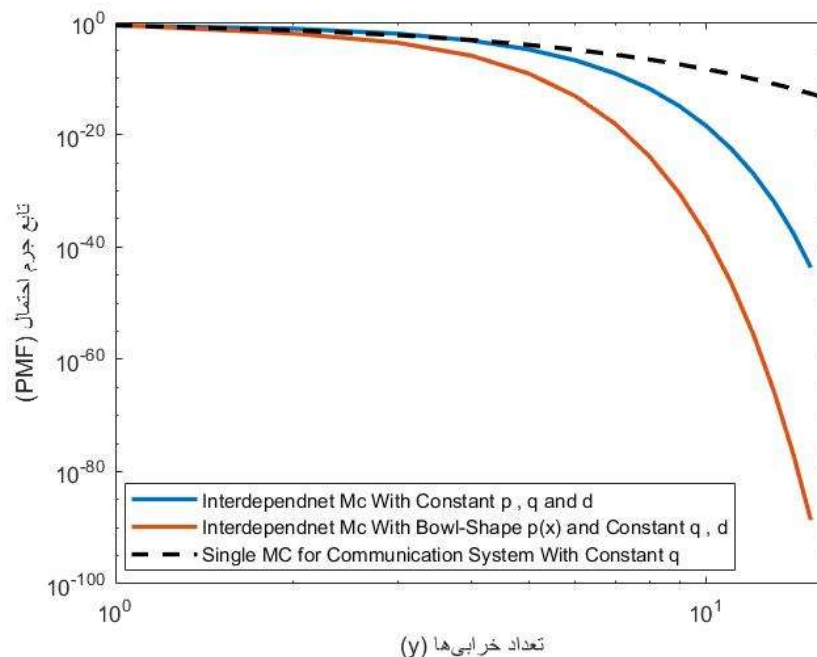


شکل ۷-۴ تابع جرم احتمال اندازه خرابی برای شبکه قدرت در مقیاس لگاریتمی برای سناریوهای مختلف $p(x)$ ، $q(y)$ و $d(y)$ سیستم‌های غیر قابل اطمینان از نوع (۱)

در مرحله بعد، فرض می‌کنیم که زنجیره مارکوف برای شبکه قدرت دارای فرم کاسه‌ای شکل خاص برای P_{stop} است، که منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خاموشی می‌شود. این توزیع با خط آبی رنگ در مقیاس لگاریتمی در (شکل ۷-۴) نشان داده شده است. ما از مدل زنجیره مارکوف به هم وابسته ارائه شده در بخش (۳-۳) برای سیستم‌های قدرت و مخابراتی استفاده می‌کنیم، تا بررسی کنیم که چگونه وابستگی متقابل بین دو سیستم بر توزیع اندازه خاموشی در شبکه قدرت تأثیر می‌گذارد. توزیع اندازه خرابی در شبکه قدرت ($\mathcal{R}_p$) با استفاده از روابط (۳-۱۳) و (۳-۷) محاسبه می‌شود. به عنوان مثال، ما زنجیره مارکوف شبکه قدرت را با یک زنجیره مارکوف برای سیستم مخابراتی تلفیق می‌کنیم، که احتمالات گذار ثابتی دارند. این بدین معناست که ما یک سیستم مخابراتی قابل اطمینان داریم. نتایج نشان داده شده با خط نقطه چین در (شکل ۷-۴) نشان می‌دهد که وابستگی متقابل بین دو سیستم، احتمال خاموشی‌های بزرگ را افزایش می‌دهد و همچنین ویژگی‌های توزیع دم-سنگین را به جز در انتهای آن توزیع حفظ می‌کند. به عبارت دیگر، توزیع خاموشی برای $\mathcal{R}_p$ شبکه قدرت در این مورد نیز از توزیع قانون-توانی پیروی می‌کند، با این تفاوت که

با یک پارامتر کوچکتر s از توزیع قانون-توانی پیروی می‌کند. این بدین معناست که احتمال خاموشی‌های بزرگ در نتیجه وابستگی‌های متقابل بین دو سیستم افزایش می‌یابد. افزایش شدید در انتهای توزیع نشان‌دهنده رفتار بحرانی سیستم است، که احتمال خاموشی‌های بزرگتر را حتی بیشتر از مقادیر دیگر افزایش می‌دهد.

به عنوان مثال دیگر از تأثیر وابستگی متقابل بین دو سیستم، زنجیره مارکوف شبکه قدرت را با یک زنجیره مارکوف برای شبکه مخابراتی تلفیق می‌کنیم، که تابع کاسه‌ای شکل را برای احتمال بدون خرابی ارتباطی اضافی ناشی از خرابی شبکه قدرت دارد (یعنی، $1-q(y)$). همان‌طور که در (شکل ۴-۷) به صورت خط نقطه چین نشان داده شده است، تأثیر یک سیستم مخابراتی غیرقابل اطمینان بر قابلیت اطمینان کل سیستم نسبت به حالتی که سیستم مخابراتی قابل اطمینان است، بسیار زیاد است. در هر دو مثال به هم وابسته که در این بخش ارائه شد، تابع d ثابت و برابر 0.9 فرض شده است. در حالت کلی، با توجه به (شکل ۴-۷)، به دلیل وابستگی‌های متقابل احتمال آبشارهای بزرگ در مورد IDMC در مقایسه با MC مستقل افزایش می‌یابد، در حالی که ویژگی‌های PMF توزیع دم-سنگین به جز در انتهای توزیع حفظ می‌شوند.



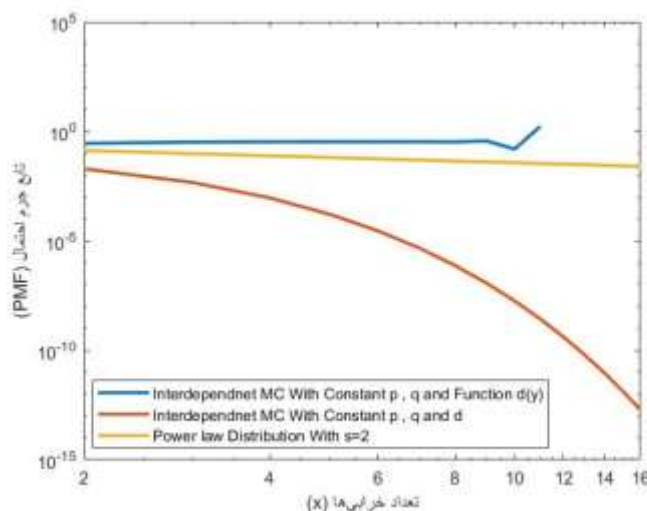
شکل ۸-۴ تابع جرم احتمال اندازه خرابی برای سیستم مخابراتی در مقیاس لگاریتمی برای سناریوهای مختلف $p(x)$ ، $q(y)$ و $d(y)$ سیستم‌های غیرقابل اطمینان از نوع (۱)

توزیع اندازه خرابی برای $\mathcal{R}_c$ شبکه مخابراتی با استفاده از روابط (۷-۳) و (۱۴-۳) محاسبه شده است و در (شکل ۸-۴) ارائه شده است. در (شکل ۸-۴)، توزیع خرابی‌ها را در سیستم مخابراتی برای سناریوهای مختلف وابستگی متقابل با $p(x)$ و $q(y)$ مختلف ارائه کرده‌ایم. در این سناریوها، تابع d ثابت و برابر ۰٫۹۷ فرض شده است. مشابه نتایج (شکل ۷-۴)، نتایج (شکل ۸-۴) نیز نشان می‌دهد که رفتار غیرقابل اطمینان یک یا هر دو سیستم، احتمال خرابی‌های بزرگ را در کل سیستم افزایش می‌دهد.

۴-۴- سیستم‌های قابل اطمینان مستقل می‌توانند هنگام تلفیق شدن، غیر قابل اطمینان رفتار کنند

فرض می‌کنیم که دو سیستم قابل اطمینان با ثابت $p(x)$ و $q(y)$ داریم. این دو سیستم قابل اطمینان را با استفاده از چارچوب زنجیره مارکوف به هم وابسته تلفیق می‌کنیم. سپس، از سیستم معادله تفاضلی رابطه (۷-۳) استفاده می‌کنیم و فرض می‌کنیم که p و q مقادیر ثابتی هستند. در بخش (۲-۴)، مقدار d را برای احتمال اندازه خاموشی در شبکه قدرت ($\mathcal{R}_p$) ثابت و برابر ۰٫۹ فرض

کردیم، حال در این بخش می‌خواهیم تابع $d(y)$ را به گونه‌ای بیابیم که دو سیستم مخابراتی و قدرت قابل اطمینان منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خاموشی شوند. برای به دست آوردن تابع $d(y)$ ، احتمال اندازه خاموشی در شبکه قدرت را در رابطه (۳-۱۳) براساس توزیع قانون-توانی معرفی شده در رابطه (۴-۲) وارد می‌کنیم، یعنی، $\mathcal{R}_p(x) = P(x, 2, m_1)$ که در آن تعداد کل خرابی‌های موجود در سیستم می‌باشد. در (شکل ۴-۹) نتیجه توزیع اندازه خاموشی را در یک سیستم با ۱۶ مؤلفه نشان داده‌ایم، زمانی که سیستم‌ها به طور جداگانه قابل اطمینان هستند، اما توزیع اندازه خرابی در شبکه قدرت تلفیقی (خط آبی) توزیع قانون-توانی را نشان می‌دهد. ما در این بخش به دلخواه $d(y) = 0.7y^2 + y - 1$ به دلیل نزدیک بودن به توزیع قانون-توانی جهت انجام شبیه سازی در نظر گرفتیم.



شکل ۴-۹ تابع جرم احتمال اندازه خرابی در شبکه برق در یک مدل زنجیره مارکوف به هم وابسته را نشان می‌دهد. زمانی که دو سیستم قابل اطمینان با هم تلفیق می‌شوند، با وابستگی متقابل همراه هستند که منجر به رفتار غیر قابل اطمینان در سیستم می‌شوند.

ما همچنین توزیع اندازه خرابی را زمانی که تابع d ثابت است (مستقل از حالت) با خط قرمز نشان داده‌ایم که منجر به توزیع نمایی می‌شود. با استفاده از نتایج در (شکل ۴-۹)، نشان دادیم که دو سیستم قابل اطمینان مستقل ممکن است در نتیجه وابستگی متقابل بین سیستم‌های مستقل، غیرقابل

اطمینان رفتار کنند. این نتیجه مهم، اهمیت در نظر گرفتن سیستم‌های به هم وابسته را به عنوان یک سیستم واحد برای تحلیل قابلیت اطمینان تایید می‌کند.

نتیجہ گیری و پیشہ سادہ

۵-۱- جمع بندی

زیرساخت‌های حیاتی شبکه قدرت و شبکه مخابراتی را معرفی و بررسی کردیم و بیان کردیم که به دلیل وابستگی متقابل دو شبکه قدرت و مخابراتی، بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذراند. وابستگی‌های متقابل و یکپارچگی گسترده شبکه‌های قدرت و سیستم‌های مخابراتی الزام می‌کند که آن‌ها باید به عنوان یک سیستم سایبری-الکتریکی واحد مورد مطالعه قرار گیرند، به ویژه زمانی که قابلیت اطمینان سیستم مورد توجه است. از خرابی‌های آبخاری که در نهایت منجر به خاموشی‌های بزرگ در شبکه برق می‌شوند، صحبت کردیم. به طور خاص، درک خرابی‌های آبخاری در زیرساخت‌هایی که دارای وابستگی متقابل هستند، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، زیرا وابستگی متقابل بین زیرساخت‌ها می‌تواند منجر به ایجاد رفتارهای جدید در کل سیستم به عنوان یک سیستم واحد شود که در سیستم‌های منفرد قابل مشاهده نیست.

یک چارچوب زنجیره مارکوف به هم وابسته (IDMC) جدید را برای مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری در زیرساخت‌های به هم وابسته ارائه کردیم. در این چارچوب، از زنجیره‌های مارکوف مستقل (MC) شروع کردیم، که پویایی تصادفی هر یک از سیستم‌های فیزیکی را تقریب می‌زنند و یک زنجیره مارکوف حداقلی را گسترش دادیم که شامل زنجیره‌های مجزا برای هر سیستم فیزیکی است و پویایی تصادفی کل مجموعه سیستم‌ها را به عنوان یک سیستم واحد تقریب می‌زند. چارچوب زنجیره مارکوف به هم وابسته را در یک محیط کلی ارائه کردیم و سپس یک مدل زنجیره مارکوف به هم وابسته را برای خرابی‌های آبخاری در زیرساخت‌های سایبری-الکتریکی ایجاد کردیم. سپس، براساس چارچوب ارائه شده برای IDMC، معیارهایی را برای تعیین کمیت قدرت وابستگی متقابل بین سیستم‌ها معرفی کردیم.

انواع سیستم‌های قابل اطمینان و غیر قابل اطمینان را معرفی کردیم، که توزیع اندازه خاموشی سیستم‌های قابل اطمینان به صورت نمایی و توزیع اندازه خاموشی سیستم‌های غیر قابل اطمینان دارای توزیع قانون-توانی می‌باشد و نشان دادیم که وابستگی متقابل بین دو سیستم می‌تواند

آسیب‌پذیری‌هایی را در کل سیستم ایجاد کند و احتمال خاموشی‌های بزرگ را افزایش دهد. مشاهده کردیم که تابع جرم احتمال (PMF) اندازه خرابی، زمانی که شبکه قدرت یا سیستم مخابراتی تحت سناریوهای بحرانی کار می‌کند، دارای توزیع دم-سنگین خواهد بود. ما همچنین احتمالات گذار را برای مدل زنجیره مارکوف شناسایی کردیم، که منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خاموشی می‌شود.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های سیستم قدرت نشان دادیم که احتمال توقف آبشاری یک فرم کاسه‌ای شکل به عنوان تابعی از تعداد خرابی‌ها دارد. اهمیت تابع کاسه‌ای شکل این است که برای احتمال توقف آبشاری در زنجیره مارکوف منجر به توزیع دم-سنگین برای اندازه خاموشی می‌شود. به طور خاص، آشکال خاصی از تابع کاسه‌ای شکل برای احتمال توقف آبشاری منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خاموشی می‌شود، بنابراین شرایطی را برای رفتار بحرانی در سیستم نشان می‌دهد.

سناریوهای مختلفی از سیستم‌های قابل اطمینان و غیر قابل اطمینان را برای تعیین توزیع اندازه خرابی در سیستم‌های تلفیق مورد مطالعه قرار دادیم. بینش مهمی که از مدل زنجیره مارکوف به هم وابسته به دست می‌آید، این است که وابستگی‌های متقابل بین دو سیستم می‌تواند باعث شود که هنگام کنار هم قرار گرفتن دو سیستم قابل اطمینان، رفتار غیر قابل اطمینانی داشته باشند. به عنوان مثال، ما نشان دادیم که زمانی که دو سیستم مستقل دارای توزیع نمایی برای اندازه خرابی هستند، تعامل بین سیستم‌ها می‌تواند منجر به توزیع قانون-توانی برای اندازه خرابی‌ها در سیستم‌های کوپل شده شود.

طیف گسترده‌ای از مسائل جذاب و جالب وجود دارد که می‌توان آن‌ها را براساس چارچوب زنجیره مارکوف به هم وابسته بررسی کرد. نمونه‌هایی از چنین مسائلی عبارتند از تعیین تحلیلی مجانبی زنجیره مارکوف به هم وابسته براساس زنجیره‌های مستقل و تعیین تحلیلی وابستگی‌های متقابل که منجر به رفتارهای بحرانی می‌شود. مسائلی که در این پایان نامه به آن‌ها پرداخته شد، مسائل مربوط به

سیستم‌های قدرت و مخابراتی به هم وابسته می‌باشد. تحلیل بیشتر زنجیره‌های مارکوف به هم وابسته و نمونه‌های دیگر از گسترش این اثر از موضوع پایان‌نامه خارج هستند.

۵-۲- پیشنهادها

در این پایان‌نامه با چندین مشکل چالش برانگیز در ارتباط با مدل‌سازی و تحلیل خطر خرابی‌های آبخاری برخورد کردیم که می‌توان در تحقیقات بعدی به آن‌ها پرداخت. یکی از این مشکلات خطای انسانی است که نقش کلیدی در رفتار آبخاری سیستم دارد. ثبت اثرات خطای انسانی در توصیف خطر خاموشی‌های بزرگ را می‌توان به عنوان یکی از تحقیقات آینده در نظر گرفت. به طور کلی، تعداد زیادی از عوامل کلیدی که در عملکرد زیرساخت‌های حیاتی نقش دارند، بر خرابی‌های آبخاری تأثیر می‌گذارند. به عنوان مثال، استفاده از ریزشکده‌ها در بخش توزیع شبکه‌های برق می‌تواند تا حد زیادی بر رفتار آبخاری در شبکه‌های هوشمند آینده با کمک به سیستم در جهت کاهش اثرات احتمالی تأثیر بگذارد. اگرچه ماهیت تصادفی مدل معرفی شده در این پایان‌نامه، امکان ثبت اثرات عوامل مؤثر بر خرابی‌های آبخاری را به طور غیرمستقیم در پیش‌بینی خطر خرابی‌های بزرگ فراهم می‌کند، اما تعبیه چنین اطلاعاتی به طور مستقیم در مدل‌های معرفی شده می‌تواند قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها را بهبود بخشد. همچنین می‌توان مدل زنجیره مارکوف به هم وابسته را برای مدل‌سازی خرابی‌های آبخاری در سایر سیستم‌های به هم وابسته پیچیده گسترش داد.

-
-
- [1] P. Hines, "A decentralized approach to reducing the social costs of cascading failures," Ph.D. dissertation, School of Carnegie Mellon University, 2007.
- [2] U.-C. P. S. O. T. Force, "Final report on the august 14th blackout in the united states and canada," *Department of Energy and National Resources Canada*, 2004.
- [3] C. W. Johnson, "Analysing the causes of the italian and swiss blackout, 28th september 2003," in *Proceedings of the 12th Australian Workshop on Safety Critical Systems and Software-Related Programmable Systems*, Adelaide, Australia, 2007.
- [4] S. Robinson, "The power grid as complex system," *SIAM: Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 12, 2002.
- [5] A. Veremyev, A. Sorokin, V. Boginski and E. L. Pasiliao, "Minimum vertex cover problem for coupled interdependent networks with cascading failures," *European Journal of Operational Research*, vol. 232, p. 499–511, 2014.
- [6] M. Azadeh, A. Keramati, I. Mohammadfam and B. Jamshidnejad, "Enhancing the availability and reliability of power plants through macroergonomics approach," *Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR)*, vol. 65, pp. 873–878, 2006.
- [7] J. Park, W. Jung, J. Ha and Y. Shin, "Analysis of operators' performance under emergencies using a training simulator of the nuclear power plant," *Reliability engineering & system safety*, vol. 83, p. 179–186, 2004.
- [8] H. S. Blackman, D. I. Gertman and R. L. Boring, "Human error quantification using performance shaping factors in the SPAR-H method," in *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, 2008.
- [9] R. L. Boring and H. S. Blackman, "The origins of the SPAR-H method's performance shaping factor multipliers," in *2007 IEEE 8th human factors and power plants and HPRCT 13th annual meeting*, 2007.
- [10] J. M. Abreu, N. Hardy, F. C. Pereira and M. Zeifman, "Modeling human reliability in the power grid environment: An application of the spar-h methodology," in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2015.
- [11] M. Panteli and D. S. Kirschen, "Situation awareness in power systems: Theory, challenges and applications," *Electric Power Systems Research*, vol. 122, p. 140–151, 2015.
- [12] M. Anghel, K. A. Werley and A. E. Motter, "Stochastic model for power grid dynamics," in *2007 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07)*, 2007.
- [13] C. R. Lawton and J. H. Gauthier, "Human performance modeling in system of systems analytics," in *2012 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, 2012.
- [14] M. Rahnamay-Naeini, Z. Wang, A. Mammoli and M. M. Hayat, "A probabilistic model for the dynamics of cascading failures and blackouts in power grids," in

2012 IEEE power and energy society general meeting, 2012.

- [15] B. A. Carreras, V. E. Lynch, I. Dobson and D. E. Newman, "Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts," *Chaos: An interdisciplinary journal of nonlinear science*, vol. 12, p. 985–994, 2002.
- [16] D. S. Kirschen, D. Jayaweera, D. P. Nedic and R. N. Allan, "A probabilistic indicator of system stress," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, p. 1650–1657, 2004.
- [17] D. P. Nedic, I. Dobson, D. S. Kirschen, B. A. Carreras and V. E. Lynch, "Criticality in a cascading failure blackout model," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, p. 627–633, 2006.
- [18] M. Rahnamay-Naeini and M. M. Hayat, "Impacts of operating characteristics on sensitivity of power grids to cascading failures," in *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016.
- [19] R. Baldick, B. Chowdhury, I. Dobson, Z. Dong, B. Gou, D. Hawkins, H. Huang, M. Joung, D. Kirschen, F. Li and others, "Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems IEEE PES CAMS task force on understanding, prediction, mitigation and restoration of cascading failures," in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008.
- [20] P. Hines, E. Cotilla-Sanchez and S. Blumsack, "Topological models and critical slowing down: Two approaches to power system blackout risk analysis," in *2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2011.
- [21] H. Xiao and E. M. Yeh, "Cascading link failure in the power grid: A percolation-based analysis," in *2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2011.
- [22] I. Dobson, B. A. Carreras and D. E. Newman, "A loading-dependent model of probabilistic cascading failure," *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, vol. 19, p. 15–32, 2005.
- [23] P. Crucitti, V. Latora and M. Marchiori, "Model for cascading failures in complex networks," *Physical Review E*, vol. 69, p. 045104, 2004.
- [24] C. L. DeMarco, "A phase transition model for cascading network failure," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, p. 40–51, 2001.
- [25] H. Ren and I. Dobson, "Using transmission line outage data to estimate cascading failure propagation in an electric power system," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 55, p. 927–931, 2008.
- [26] I. Dobson, "Estimating the propagation and extent of cascading line outages from utility data with a branching process," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, p. 2146–2155, 2012.
- [27] Z. Wang, A. Scaglione and R. J. Thomas, "A Markov-transition model for cascading failures in power grids," in *2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2012.
- [28] H.-S. J. Min, W. Beyeler, T. Brown, Y. J. Son and A. T. Jones, "Toward modeling and simulation of critical national infrastructure interdependencies," *Iie Transactions*, vol. 39, p. 57–71, 2007.
- [29] D. A. Reed, K. C. Kapur and R. D. Christie, "Methodology for assessing the

- resilience of networked infrastructure," *IEEE Systems Journal*, vol. 3, p. 174–180, 2009.
- [30] S. V. Buldyrev, R. Parshani, G. Paul, H. E. Stanley and S. Havlin, "Catastrophic cascade of failures in interdependent networks," *Nature*, vol. 464, p. 1025–1028, 2010.
 - [31] W. Li, A. Bashan, S. V. Buldyrev, H. E. Stanley and S. Havlin, "Cascading failures in interdependent lattice networks: The critical role of the length of dependency links," *Physical review letters*, vol. 108, p. 228702, 2012.
 - [32] J. Wang, C. Jiang and J. Qian, "Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 393, p. 535–541, 2014.
 - [33] K. Hopkinson, X. Wang, R. Giovanini, J. Thorp, K. Birman and D. Coury, "EPOCHS: a platform for agent-based electric power and communication simulation built from commercial off-the-shelf components," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, p. 548–558, 2006.
 - [34] H. Lin, S. Sambamoorthy, S. Shukla, J. Thorp and L. Mili, "Power system and communication network co-simulation for smart grid applications," in *ISGT 2011*, 2011.
 - [35] E. Zio and G. Sansavini, "Modeling interdependent network systems for identifying cascade-safe operating margins," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 60, p. 94–101, 2011.
 - [36] J. Wei, D. Kundur, T. Zourntos and K. Butler-Purpy, "A flocking-based dynamical systems paradigm for smart power system analysis," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012.
 - [37] D. E. Newman, B. Nkei, B. A. Carreras, I. Dobson, V. E. Lynch and P. Gradney, "Risk assessment in complex interacting infrastructure systems," in *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2005.
 - [38] B. A. Carreras, D. E. Newman, P. Gradney, V. E. Lynch and I. Dobson, "Interdependent risk in interacting infrastructure systems," in *2007 40th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07)*, 2007.
 - [39] C. D. Brummitt, R. M. D'Souza and E. A. Leicht, "Suppressing cascades of load in interdependent networks," *Proceedings of the national academy of sciences*, vol. 109, p. E680–E689, 2012.
 - [40] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif and D. Tipper, "A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 15, p. 5–20, 2012.
 - [41] F. Li, W. Qiao, H. Sun, H. Wan, J. Wang, Y. Xia, Z. Xu and P. Zhang, "Smart transmission grid: Vision and framework," *IEEE transactions on Smart Grid*, vol. 1, p. 168–177, 2010.
 - [42] "1992-2009 system disturbances reports," 2009. North American Electric Reliability Council, 2009.
 - [43] I. Dobson, B. A. Carreras and D. E. Newman, "Branching process models for the exponentially increasing portions of cascading failure blackouts," in *Proceedings of the 38th annual Hawaii international conference on system sciences*, 2005.
 - [44] M. Rahnamay-Naeini and M. M. Hayat, "Cascading failures in interdependent infrastructures: An interdependent Markov-chain approach," *IEEE Transactions*

- on Smart Grid*, vol. 7, p. 1997–2006, 2016.
- [45] M. Rahnamay-Naeini, Z. Wang, N. Ghani, A. Mammoli and M. M. Hayat, "Stochastic analysis of cascading-failure dynamics in power grids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, p. 1767–1779, 2014.
 - [46] M. Rahnamay Naeini, "Stochastic dynamics of cascading failures in electric-cyber infrastructures," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Univ. New Mexico, Albuquerque, NM, USA, 2014.

Abstract

smart grids consist of tightly-coupled systems, namely a power grid and a communication system. While today's power grids are highly reliable and modern control and communication systems have been deployed to further enhance their reliability, historical data suggest that they are yet vulnerable to large failures. A small set of initial disturbances in power grids in conjunction with lack of effective, corrective actions in a timely manner can trigger a sequence of dependent component failures, called cascading failures. The main thrust of this dissertation is to build a probabilistic framework for modeling cascading failures in power grids while capturing their interactions with the coupled communication systems so that the risk of cascading failures in the composite complex electric-cyber infrastructures can be examined, analyzed and predicted.

A scalable and analytically tractable continuous-time Markov chain model for stochastic dynamics of cascading failures in power grids is constructed while retaining key physical attributes and operating characteristics of the power grid. The key idea of the proposed framework is to simplify the state space of the complex power system while capturing the effects of the omitted variables through the transition probabilities and their parametric dependence on physical attributes and operating characteristics of the system. The cascading failures are simulated with a coupled power-system simulation framework. Specifically, the probabilistic model enables the prediction of the evolution of the blackout probability in time. Furthermore, the asymptotic analysis of the blackout probability enables the calculation of the probability mass function of the blackout size, which has been shown to have a heavy tail. A key benefit of the model is that it enables the characterization of the severity of cascading failures in terms of a set of operating characteristics of the power grid .

In this dissertation Further, a novel interdependent Markov chain model is developed, which provides a general probabilistic framework for capturing the effects of interactions among interdependent infrastructures on cascading failures. A key insight obtained from this model is that interdependencies between two systems can make two individually reliable systems behave unreliably. we show that due to the interdependencies two chains with non-heavy tail asymptotic failure distribution can result in a heavy tail distribution when coupled.

Keywords: Interdependent Systems, Critical Infrastructures, Cascading Failures, Markov Chain, Power-law distribution



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Communication Systems Engineering

**Modeling The Effects of Communication Network on Power
Grid Reliability Using The Interdependent Markov Chain
Approach**

By: Reza Ali Hosseini

Supervisor:

Omid Reza Maroozi

Advisor:

Mohsen Assili

February 2021