

افزایش ظرفیت انتقال جهت به حداقل رساندن احتمال خاموشی

مجتبی سرلک^۱، محسن کیهان ثانی^۲، وحید صالحی ثانی^۳

۱- آموزشکده فنی و حرفه ای سما واحد تهران (اندیشه)، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، moojtabasarlack@yahoo.com

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رشت، گروه برق، رشت، ایران، mohsen.keyhansani@gmail.com

۳- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رشت، گروه برق، رشت، ایران، V.salehi1511@gmail.com

چکیده - موضوع این مقاله یافتن نقشه‌ای بهینه جهت به حداقل رساندن احتمال خاموشی مقیاس بزرگ بوسیله افزایش ظرفیت شبکه می‌باشد. منظور از افزایش ظرفیت شبکه، افزودن تعدادی خط انتقال و افزودن ظرفیت خطوط موجود می‌باشد. ما این فرضیات را در یک مدل بهینه در نظر میگیریم که هدف آن به حداقل رساندن خاموشی با در نظر گرفتن محدودیت هزینه می‌باشد. احتمال خاموشی در مقیاس بزرگ را از طریق شبیهسازی مونت کارلو که یک مدل احتمالاتی خاموشی در مقیاس بزرگ می‌باشد، انجام میدهیم. چون وقایع موجود در این زمینه نادر هستند، پس شبیهسازی ما استاندارد و بر پایه محاسبات استوار نخواهد بود. ما تکنیک کاهش اختلاف را به کار میبریم تا نتایج بدست آمده در یک بازه زمانی مقبول قرار گیرد. نتایج عددی برای برخی شبکه‌های تست کوچک ۱۴ شینه IEEE داده میشود. نتیجه اصلی این است که گسترش شبکه به روشهای متفاوت منجر به شکلهای مختلف شبکه توزیع می‌گردد. به عبارت دیگر، یک کشمکش بین کم کردن خاموشی‌های در مقیاس کوچک و خاموشی‌های در مقیاس بزرگ وجود دارد. کلید واژه - ظرفیت شبکه، مدل بهینه، شبیه سازی مونت کارلو

۱- مقدمه

تقاضا حداقل می‌کند. متغیرهای تصمیم‌گیری، ظرفیت‌های افزوده شده به خطوط انتقال هستند. قابلیت اطمینان ۱۰۰٪ سیستم معمولاً از طریق محدودیت تقاضا تامین می‌گردد. یعنی محدودیت‌های تقاضا باعث می‌شود که ظرفیت خط همواره بیشتر از پروفیل بارهای مورد نیاز شود و این باعث می‌شود که خط‌های خط و خاموشی‌های آبخشاری احتمالی بوجود نیاید. متناوباً بعضی فرمولاسیون‌ها به تقاضا اجازه بیشتر شدن از ظرفیت خط را می‌دهد اما تقاضای بار نامناسب محدود است (خطای خط اتفاق نمی‌افتد) و برخلاف تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌هایی از این مدل‌ها در مراجع [۴] تا [۹] وجود دارد. فرمولاسیون‌های دیگر محدودیت‌های تقاضا را به یک سیاست $1N$ شرطی تعمیم می‌دهد یعنی محدودیت‌ها تعیین می‌کنند که ظرفیت خط حداقل به اندازه بار مورد نیاز شبکه پس از جدا شدن هر قسمت کوچک از آن بعثت قطعی باشد. (بعد از جدا شدن یک قسمت از شبکه بعثت وقوع خطا در آن، بار بقیه قسمت‌های شبکه که باقی مانده،

موضوع این مقاله یافتن نقشه‌های بهینه جهت به حداقل رساندن احتمال خاموشی مقیاس بزرگ بوسیله افزایش ظرفیت شبکه می‌باشد. چون وقایع نادر، بازده شبیهسازی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، پس تکنیکهای شبیهسازی برای وقایع نادر در خلال شبیه سازی بهینه استفاده می‌شود تا نتایج معنی‌دار و منطقی حاصل شود.

درباره برنامه‌ریزی توسعه انتقال متون و نوشته‌های زیاد وجود دارد. جهت بررسی و دیدن نمونه‌هایی در این رابطه منابع [۱] تا [۳] را ببینید. هدف ما مرور همه آنها نیست اما چند نمونه از آنها را بررسی می‌کنیم که در آن جنبه بهینه‌سازی ریاضیاتی وجود دارد. جنبه منحصر بفرد کار ما این است که از فرمول شبیه‌سازی شده وقایع نادر در خاموش استفاده می‌کنیم. یک فرمولاسیون عادی افزایش ظرفیت، هزینه را منوط به محدودیت

تامین گردد). مراجع [۶] و [۱۰] را ببینید.

تنوع این تکنیک‌های ریاضیاتی قبلاً مسایل از این نوع را حل کرده‌است مثل برنامه ریزی خطی NLP در مرجع [۱۱]، برنامه ریزی عدد صحیح آمیخته MIP در مرجع [۵]، بهینه‌سازی معمولی Optimization در مرجع [۱۲] که منظور از آن راه‌حل‌های است که به اندازه کافی مناسبند و روش‌های اکتشافی در مرجع [۹] آمده‌اند و ... تکنیک‌های دیگر شامل سنجش و ارزیابی چند هدفه در [۱]، [۶]، [۸] و [۱۳] و آنالیز آسیب‌پذیری در [۱۴] و دینامیک سیستم بلندمدت در [۱۰] و [۱۵] (برنامه ریزی دینامیکی). همچنین قابلیت اعتماد شبکه از روش مدل مارکوف برای تجهیزات در [۱۶] و [۱۷] نیز بررسی می‌شود. این مدل‌ها مسایلی چون خطاها، نگهداری و تعمیر تجهیزات شخصی را در نظر می‌گیرند اما معمولاً دینامیک‌های خاموشی آبخشاری را در نظر نمی‌گیرند.

جنبه منحصر بفرد این کار حالتی است که ما از قابلیت اطمینان در حین بهینه‌سازی بحث می‌کنیم. در اینجا ما امکان قطعی خط و دینامیک آبخشاری را در نظر می‌گیریم. ما این را به عنوان یک اتفاق ممکن (اگرچه بعید است) در نظر می‌گیریم. چون احتمال وقایع مورد نظر ما و مرتبط با هم کم است (مثلاً یک در میلیون)، تخمین این احتمالات می‌تواند جنبه محاسباتی ما را به چالش بکشد (قسمت III-B را ببینید). بعلاوه در مفاد بهینه‌سازی احتمال وقایع نادر، باید چندین بار و برای طرح‌های دیگر نیز ارزیابی و سنجیده شود.

ما مشخصاً انتهای سیستم توزیع را مورد توجه قرار می‌دهیم. کار انجام شده در [۱۸] بیان می‌دارد که ارزیابی توزیع خاموشی کامل مهم است: هرچند استراتژی کاهش، احتمال خاموشی در مقیاس کوچک را کاهش می‌دهد اما احتمال خاموشی در یک مقیاس بزرگ را افزایش می‌دهد و برعکس. بنابراین، طبق نوشته‌هایی که ثبت شده، تکرار خاموشی (آنجایی که ۱۰۰۰۰ نفر را تحت تاثیر قرار می‌دهد) از توزیع قانون قدرت پیروی می‌کند یعنی تکرار خروج از مدار و خاموشی که γ عدد از مشتریان را

(γ بزرگ است) تحت تاثیر قرار می‌دهد، تقریباً متناسب است با $\gamma - \alpha$ که در آن α یک عدد ثابت است و $\alpha < 0$ است. برای مثال در مقایسه یک توزیع ساده، یک توزیع قانون قدرت احتمال بزرگتری از یک واقعه خیلی نادر را بیان می‌کند.

فرمولاسیون اصلی افزایش ظرفیت که بحث اصلی ماست، حداقل کردن احتمال خاموشی‌های در مقیاس بزرگ با در نظر گرفتن محدودیتهای هزینه است (بخش ۲ را ببینید). برای ارزیابی خاموشی‌های با مقیاس بزرگ، ما یک مدل اتفاقی برای دینامیک خاموشی شبیه تعدادی از مدل‌های مراجع [۲۱] و [۲۲] در نظر می‌گیریم. مدل ما خطاهای ایجاد شده در خط را به صورت وقایع آنی در نظر می‌گیرد: وقتی که یک خط دچار مشکل می‌شود، بار مجدداً در تمام شبکه توزیع می‌شود. پخش بار جدید ممکن است باعث ایجاد یک خطا در خط دیگری شود و پروسه تا وقتی که دیگر خطایی در خطوط موجود رخ ندهد، ادامه یابد.

طبق نوشته‌های [۲۳]، در زمان فرض وقایع نادر، مدل کردن کامل و تمام جزئیات دینامیک آبخشاری بسیار مشکل خواهد بود. در اینجا فلسفه ما مدل کردن ساده‌ی اجزاء با هدف فهم بالا می‌باشد. فلسفه‌ای شبیه این، در کارهای دیگر مثل [۱۵]، [۲۱]، [۲۲] و [۲۴] آمده است. در اینجا ما المان‌های اصلی مثل توپولوژی شبکه، خصوصیات شبکه که شامل بار شینه‌ها و مشخصه‌های خط می‌باشد، احتمالات خرابی خط که بستگی به بار خط و ظرفیت نامی خط دارد، فیزیک پخش بار و قید- γ را در نظر می‌گیریم. بسیاری از مسائل دیگر مثل اثرات گذرا، خطای انسانی و دینامیک بلند مدت، زمان بندی وقایع (یعنی زمانی که طول می‌کشد تا دمای یک خط دارای اضافه بار افزایش یابد) یا ناپایداری، دینامیک‌های غیرخطی و... در نظر گرفته نشده است. بنابراین ما می‌دانیم که این مدل همه چیز تمام نیست اما معتقدیم که برای بدست آوردن دیدگاهی جهت دینامیک وقایع نادر در سیستم‌های پیچیده تر از این هم، مناسب است.

استفاده‌های اصلی این مقاله به شرح زیر است: اول اینکه ما مساله افزایش ظرفیت را با نسبت به کمینه کردن احتمال

خاموشی های حاصل از وقایع نادر فرموله می کنیم. در ضمن، ما طبیعت اتفاقی بودن دینامیک خاموسی را در نظر می گیریم. خاموشی آبخاری خط ممکن است اما برخلاف اتفاقاتی در خلال شبیه سازی وقایع مجزا و مستقل است. دوم اینکه ما یک تکنیک شبیه سازی وقایع نادر را با شبیه سازی بهینه توام می کنیم در حالی که دیدگاه شبیه سازی بهینه [۲۵] و مدل وقایع نادر [۲۶] جدید نیستند. توامان کردن این دو روش خود روش جدیدی است. سوم اینکه تجربیات عددی، این دیدگاه را به ما می دهد که تصمیم به افزایش ظرفیت چه تاثیری بر احتمال خاموشی ناشی از حوادث نادر در تابع توزیع تجمعی خاموشی دارد. بسته به مدل خاموشی، در خاموشی با مقیاس بزرگ تمایل به تمرکز منابع بر یک مسیر به سمت هر گره وجود دارد تا از این خاموشی ها جلوگیری شود (ساختار درخت مانند) و در خاموشی با مقیاس کوچک تمایل به تقویت چند مسیر برای رسیدن به یک گره وجود دارد تا از این نوع خاموشی های کوچک اجتناب شود. چهارم اینکه ما یک مدل تحلیلی ارائه می دهیم که نتایج عددی مشاهده شده و یک مدل کامل و با تمام جزئیات را توضیح دهد.

۲- مساله افزایش ظرفیت بهینه

مساله ای که ما بدنبال حل کردن آن هستیم به فرم کلی زیر است:

$$\text{Minimize : } \Pr\{\text{blackout size} \geq \text{threshold}\}$$

تابع هدف:

$$\text{Subject to: } \text{expansion cost} \leq \text{budget}$$

قید: (۱)

اندازه خاموشی می تواند از راه هایی مثل تعداد خطوط دچار قطعی شده یا بار جاری کلی به دست آید. در اینجا ما اندازه خاموشی را نسبت به بار جاری به دست می آوریم. با این تخمین که تابع هدف از طریق شبیه سازی مدل احتمالی خاموشی به روش مونت کارلو بدست آمده است (بخش III-A)، وقتی که آستانه اندازه خاموشی بزرگ است، تکنیک حوادث نادر لازم است که تابع هدف را به صورت مناسبی تخمین بزنیم

۳- چارچوب بهینه سازی

شکل ۱، انجام کلی این بهینه سازی را نشان می دهد. این بهینه سازی در سطحی بالا با OptQuest که یک موتور شبیه سازی بهینه سازی است، کنترل می شود. این موتور از روش های فرااکتشافی (فراابتکاری) و تکنیک های بهینه سازی ریاضیاتی برای جستجوی یک راه نزدیک تر بهره می برد. برای استفاده از این موتور، تحلیلگر متغیرهای تصمیم گیری و محدودیت ها را معین می کند و تابعی را ایجاد می کند که تابع هدف را محقق می کند. OptQuest مانند یک جعبه سیاه عمل می کند و ما از داخل آن خبری نداریم. در این مساله، ما شبیه سازی مونته کارلو را بر روی تابع هدف (۲) اجرا می کنیم. متغیرهای تصمیم گیری Aij و Rij با OptQuest کنترل می شود و این مقادیر فضای تصمیم گیری ما می باشند و ورودی های شبیه سازی هستند. در این مساله، روش استاندارد مونته کارلو خیلی آهسته است و دیر به جواب می رسیم. بنابراین تکنیک شکستن وقایع نادر برای رسیدن به پاسخ موثرتر ایجاد می شود. شکستن (تفکیک سازی) خاموشی های آبخاری در مقالات متعددی انجام شده است ([۲۶] و [۲۷]). حال به بررسی جزئیات سه قسمت شکل ۱ از پایین به بالا می پردازیم:

حلقه یک بار برای هر بخش تکرار می شود. این مرحله عهده دار ساماندهی مورد نیاز جهت رهگیری کردن بخش های جدا از هم در کل شبیه سازی می باشد.

- تطبیق قدرت تولید شده و بار: در این مرحله، قدرت تولید شده در یک بخش (جزیره) را با بار موجود در آن جزیره تطبیق می دهیم. اگر بار بیشتر از ظرفیت ژنراتور باشد، آنگاه ریزش بار خواهیم داشت (یعنی برخی از بارها بی برق می ماند) و اگر قدرت تولید شده بیشتر از بار شود، آنگاه قدرت تولیدی جهت تطبیق با بار تنظیم می شود.

- حل معادلات خطی شده پخش بار: معادلات استاندارد پخش بار به صورت غیرخطی می باشد. [۲۸] و [۲۹]. یکی از روش های معمول خطی سازی آن، پخش بار dc است:

$$P_i = \sum b_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad i=1, \dots, n \quad (1)$$

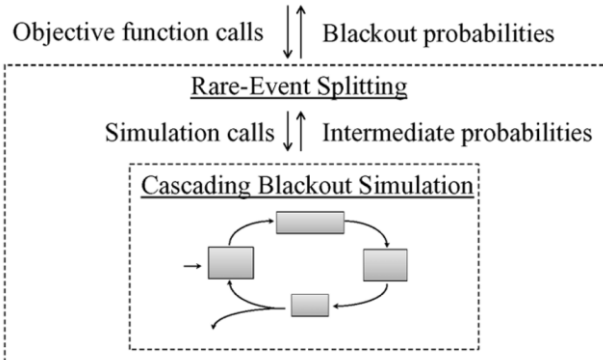
که در آن P_i قدرت حقیقی تزریق شده به شین i و θ_i زاویه ولتاژ آن است. و b_{ij} قسمت موهومی المان Z_{ij} ماتریس ادمیتانس است.

- بررسی تریپ خط: هر خط تا زمانی که ظرفیت حاصل از پخش بار در آن از ظرفیت آن کمتر باشد، در سرویس خواهد بود و به محض اینکه بار روی آن خط از ظرفیت خط بیشتر شود، از سرویس خارج خواهد شد.

B. تفکیک سازی حوادث نادر

برای روشن کردن بحث وقایع نادر، احتمال وقوع این وقایع را یک در میلیون در نظر می گیریم. تعداد آزمایشاتی که جهت تخمین این احتمال با یک شبیه سازی استاندارد و با خطای ۱۰٪ نیاز است، ۱۰۸ آزمایش است. با در نظر گرفتن یک ثانیه جهت جهت هر آزمایش، انجام کل این شبیه سازی حدود ۳ سال طول خواهد کشید. تکنیک های وقایع نادر می تواند بازده این روش را بالا ببرد. یک از این تکنیک ها روش نمونه گیری از موارد مهم تر است که این روش در مراجع [۲۱]، [۲۲] و [۳۰] آمده

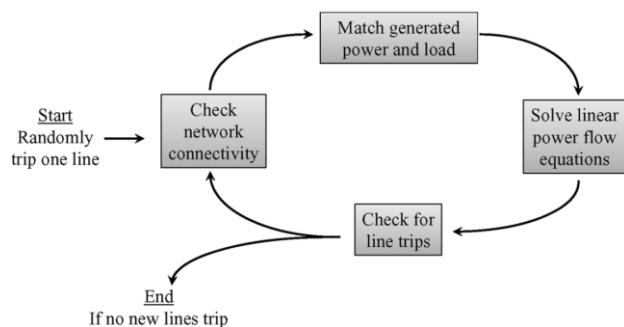
OptQuest Optimization Engine



شکل ۱: چارچوب کلی بهینه سازی

A. شبیه سازی خاموشی های آبخاری

شکل ۲، منطق مدل خاموشی اتفاقی را نشان می دهد. شبیه سازی با انتخاب یک خط جهت تریپ به صورت اتفاقی شروع می شود. این تریپ اتفاقی در یک حلقه که در آن قطعی خط در تکرار قبل باعث قطعی خط در تکرار بعدی می شود، می چرخد. این تاثیرات تا جایی ادامه می یابد که دیگر با قطعی جدیدی برخورد نکنیم.



شکل ۲: منطق کلی مدل خاموشی اتفاقی خطوط

مراحل اصلی مدل، بصورت زیر داده شده است:

- بررسی نحوه اتصال شبکه: وقتی که خط انتقالی قطع می شود، شبکه ممکن است به بخش های (جزیره) جدا از هم تقسیم شود. بخش های جدا شده از هم از لحاظ ریاضیاتی مستقل هستند پس مراحل بعدی در

جستجوی متفرقه و استراتژی جستجوی تابو (منع شده) می باشد [۳۴] تا [۳۷]. تکنولوژی بهینه سازی در OptQuest شامل روش فهرست دستورالعمل جستجو و هم شامل فهرست جدا از روش های تولید راه حل می باشد. این سیستم همچنین از تکنولوژی اضافی جهت مکانیزم جستجو استفاده می کند که شامل طراحی، آزمایش، قطع بی نظمی و برنامه ریزی خطی و برنامه ریزی عدد صحیح آمیخته (MIP) می باشد. OptQuest بر این فرض که یک جعبه سیاه گران قیمت محاسباتی است، ساخته شده است. قبل از اینکه بخواهیم از ارزیاب تابع هدف استفاده کنیم از پیش بینی کننده برای تخمین مقدار تابع هدف استفاده می شوند. چون مسایلی که با OptQuest بررسی می شود پیچیده تر از آن است که آرایه ریاضیاتی داشته باشد، پس راهی برای فهمیدن اینکه آیا جواب بدست آمده بهینه است یا نه وجود ندارد. در موارد خاص که مساله به یک مساله برنامه ریزی خطی و یا برنامه ریزی عدد صحیح آمیخته (MIP) ساده می شود، بهینه بودن آن با جدیدترین روش های روز که بر پایه الگوریتم های کلاسیک است مشخص می شود.

۴- نتایج عددی

در اینجا ما در مورد آزمایش های عددی انجام گرفته روی شبکه های مختلف الشکل مثلا شبکه چهارخانه ای، شبکه درختی و شبکه کوچک واقعی بحث می کنیم: شبکه های درختی و چهارخانه ای، توپولوژی ایده آل شده می باشند. با این حال آنها به شبکه های واقعی نزدیکتر هستند. ساختار شبکه های ایده آل مشابه در مرجع [۳۸] در نظر گرفته شده اند. این حقیقت که توپولوژی شبکه های متعدد دارای خصوصیات فرعی مشابه هستند، دلالت به این دارد که درجه شین فقط یکی از خصوصیات است که رفتار شبکه را تحت تاثیر قرار می دهد.

A. شبکه چهارخانه ای

شکل ۳، یک شبکه چهارخانه ای ۵*۵ را نشان می دهد که شامل ۲۵ شین و ۴۰ خط انتقال و ۴ ژنراتور (خطوط کلفت در یک لحظه قابل بررسی هستند) است و هر باس دارای بار ۱MW است.

است. یک تکنیک پیشنهادی که تکنیک تفکیک (۳۱) تا [۳۳] نام دارد، استفاده می شود. ایده اصلی تفکیک سازی، ایجاد وقفه در شبیه سازی است یعنی در هر مرحله که به وقایع نادر مورد نظر نزدیک شدیم، ادامه مراحل متوقف و نتیجه را با تقریب مناسب می پذیریم. از نقطه قطع، شبیه سازی به چند تکرار مستقل تقسیم می شود. در این روش زمان بیشتر به مسیرهایی که به راحتی به حادثه نادر منتهی می شود، اختصاص داده می شود.

برای روشن شدن موضوع، فرض کنید که خاموشی در مقیاس بزرگ به عنوان واقعی است که بار سرریز مقدار L یا بیشتر است. ما می توانیم این مساله را به دو مساله راحت تر بصورت زیر تقسیم کنیم:

- ۱) احتمال رسیدن ریزش بار به $2L$ را در نظر می گیریم.
- ۲) احتمال رسیدن ریزش بار از مقدار $2L$ به مقدار L را در نظر می گیریم.

وقتی که ریزش بار به $2L$ برسد، شبیه سازی قطع شده و امکان کنترل تخصیص اضافی مسیرهای اضافی که جهت تخمین احتمالات در (۱) و (۲) وجود دارد. بعبارت دیگر سود مزایای این روش حاصل می شود چون می توانیم زمان مساوی برای هر یک از این دو تست صرف کنیم (زمان نصف می شود). طبق قرارداد، شبیه سازی استاندارد، تمام زمان را به صورت مجازی صرف شبیه سازی (۱) می کند پس تخمین احتمال برای (۲) خیلی خوب نیست. بطور کلی ما می توانیم تعداد زیادی سطح متوسط را تعریف کنیم و احتمال رسیدن به هر سطح را به طور متوالی با شروع از سطح قبلی شروع کنیم. تخمین نهایی، ضرب احتمالات میانی است (برای اطلاعات بیشتر به [۲۰] و [۲۶] مراجعه کنید. یعنی یک شبیه سازی به تکه های مستقل تقسیم می شود و هر قسمت را بررسی کرده و احتمال کل آنها را که مستقلند ضرب می کنیم تا احتمال کل حاصل شود.

C. موتور OptQuest

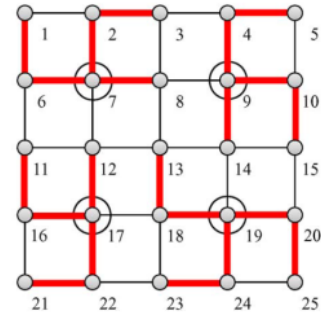
OptQuest از روش های فراابتکاری و بهینه سازی ریاضیاتی جهت کشف فضای جواب و انتخاب متغیرهای تصمیم گیری Aij و Bij که جهت شبیه سازی کلی ما در نظر گرفته شده، استفاده می کند. موتور بهینه سازی اصلی OptQuest بر پایه روش

این نوع شبکه‌ها نمی‌شود پس نتیجه مقاله ممکن است شامل این نوع شبکه باید یا نباشد.

در هنگام استفاده از OptQuest، تحلیلگر می‌تواند راه‌حلهایی را جهت بهینه‌سازی موتور بهینه‌سازی در نظر بگیرد. این راه‌حل‌ها ترکیبی از چند راه‌حل هستند که از روش‌های ذهنی پیروی می‌کنند. ما از این راه‌حل‌ها برای موتور OptQuest استفاده می‌کنیم (همان قضیه فزادنی بودن):

○ = Generator

Load at each bus = 1 MW



شکل ۳: شبکه چهارخانه‌ای؛ خطوط پررنگ درخت‌های کوچکتر تشکیل داده‌اند

(۱) توسعه یکنواخت خطوط موجود: بودجه موجود ما حتی در جهت افزایش ظرفیت خطوط موجود نیز صرف می‌شود. ظرفیت هر خط موجود مطابق با هزینه T/n افزایش می‌یابد.

(۲) افزایش تعداد ریز درخت‌ها: بودجه حتی برای زیرمجموعه‌هایی از خطوط که ساختار درختها را از ژنراتور تا بار شکل می‌دهد نیز در نظر گرفته می‌شود. ایده اصلی اینگونه است که منابع را روی یک مسیر موجود تا هر شین متمرکز کنیم. یک نمونه که در آن حداقل شاخه با خطوط کلفت نشان داده شده در شکل ۳ آمده است. این خطوط هر شینه را دقیقاً به یک ژنراتور متصل می‌کند که این مسیر، کوتاه‌ترین مسیر موجود است. بخاطر تقارن مساله، روش‌های مختلفی برای تعیین این درخت وجود دارد.

شکل ۴، مقایسه دو نمونه از راه‌حل‌های افزایش ظرفیت خط را نشان می‌دهد. توزیع اندازه خاموشی با استفاده از بخش بخش کردن شبکه و بدون هیچ بهینه‌سازی‌ای شبیه‌سازی شده است. شکل نشان می‌دهد که در مورد خاموشی‌های در مقیاس کوچک، جلوگیری از راه‌حل توسعه‌های مشابه (توسعه ۴۰ خطی کمی راحت‌تر از روش کوچکترین درخت است (توسعه ۲۱ خط)، اما در خاموشی‌های با مقیاس بزرگ، روش کوچکترین درخت بهتر از روش افزایش ظرفیت همسان جواب می‌دهد.

ظرفیت هر خط از یک توزیع با میانگین μ و انحراف معیار $\sigma = 0.5 MW$ پیروی می‌کند. پارامتر μ مطابق با قانون $1N$ و به روش زیر در نظر گرفته می‌شود: حلقه‌های بین تک‌تک خطوطی که خطا در آنها رخ می‌دهد، برای هر خطای خط، نتیجه پخش بار در شبکه را مشخص می‌کند. μ را مساوی دو برابر بزرگترین پخش بار مشاهده شده در هر خط به ازای خطا در هر خط دیگر قرار می‌دهیم. یعنی بعد از هر خطای اولیه خط، همه خطوط در نصف ظرفیت تعریف شده برای آنها کار می‌کنند. حال این $1N$ قانون بدین معنی نیست که برای خطوط بعدی، قطعاً اتفاقی نیفتد. بلکه برای برخی خطوط، سهم بار از ظرفیت خط اتفاقی است. بنابراین باری هر تکرار شبیه‌سازی، معمولاً خطوط کمی وجود دارد که بیشتر از این مقدار (۵۰٪) مثلاً ۹۰٪ یا بیشتر از ظرفیت، سهم داشته باشد. بعد از تریپ اولیه، اگر قدرت هر خط از ظرفیت فعلی آن بیشتر باشد آنگاه خط تریپ می‌خورد و خاموشی ادامه می‌یابد. در مثال‌های عددی بعدی ما شبکه‌های انبوه‌تر بیشتری را در نظر می‌گیریم که μ روی ۰/۷۵ آستانه استفاده نسبت به ۵۰٪ در نظر گرفته می‌شود. به صورت عام‌تر، اجرای روش برای بار دادن شبکه‌های دلخواه ممکن است. برای مثال شبکه‌هایی که بیشتر خطوط آن در زیر ظرفیت نامی خود به صورت نامناسب کار می‌کنند اما خطوط کمی وجود دارند که در ظرفیت‌های نزدیک به ظرفیت نامی خود خوب کار نمی‌کنند. این شبکه‌ها را می‌توان با تعویض بار شین‌ها (π) و یا ظرفیت a_{ij} در شبکه اصلی مورد ارزیابی قرار داد. (تست‌های عددی ما شامل

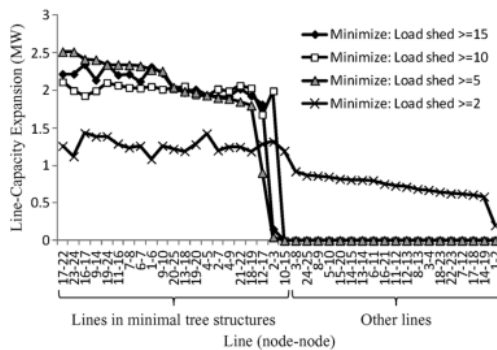
۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

به سمت راه‌حل‌های جدید پیش برود، در غیراینصورت برای هر راه حل کمترین و بیشترین تکرار را اعمال می‌کند.

جدول ۱: پارامترهای نمونه جهت بهینه سازی

Parameter	Value
Expansion budget T	40
Fixed line cost c_f	0 / distance
Variable expansion cost c_v	1 / MW / distance
Minimum line capacity r	1 MW
Total computing budget	10 hours
Computing budget per replication	30 sec.
Minimum replications per solution	3
Maximum replications per solution	20
Confidence level	95%

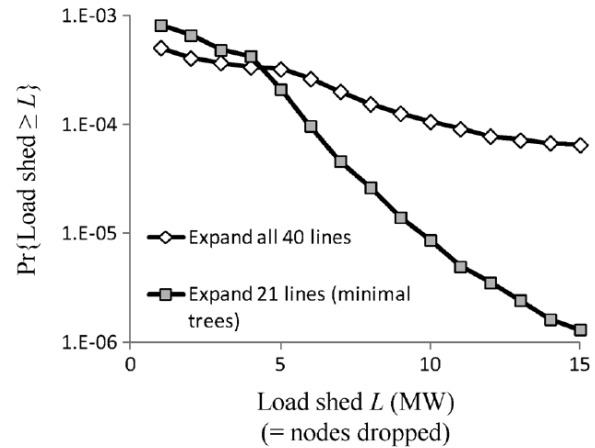
شکل ۵ بهترین حل‌هایی را که از OptQuest بدست می‌آید را نشان می‌دهد. نکته اینکه راه‌حلی که از OptQuest آمده الزاماً راه‌حل بهینه نیست و به سادگی می‌توان گفت که بهترین راه‌حل است که در حین تخصیص هزینه زمانی معین حاصل می‌شود.



شکل ۶: نتایج روش بهترین حل بدست آمده برای شبکه چهارخانه ای

محور x خطوط موجود را در شبکه نشان می‌دهد که با نماد نقطه نقطه مشخص شده است (شکل ۳ را ببینید). محور y ، ظرفیت اضافی اختصاص یافته به هر خط را در بهترین راه حل نشان می‌دهد. چهار مساله بهینه‌سازی با حدود مختلف خاموشی در ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ مگاوات را نشان می‌دهد.

از این شکل نتایج متعددی قابل استخراج است: اول اینکه بهترین راه حل زمانی است که در همه موارد فقط و فقط از توسعه



شکل ۴: مقایسه راه حل‌های مساله توسعه ظرفیت

این نشان می‌دهد که روش‌های مختلف افزایش ظرفیت، منجر به شکل‌های مختلفی از توزیع‌های خاموشی می‌شود. یک بده‌بستان بالقوه بین کم کردن تعداد و تکرار خاموشی‌های کوچک و تعداد و تکرار خاموشی‌های بزرگ وجود دارد. که این مساله در مرجع [۱۸] نیز قابل مشاهده است. کاهش در تعداد خاموشی‌های کوچک، سود لحظه‌ای بیشتری دارد در حالی که خاموشی‌های بزرگ، زمان بیشتری جهت رسیدن به نتیجه مورد نظر نیاز دارد.

حال ما در مورد نتایج بدست آمده از حل مساله بهینه‌سازی (۲) تا (۶) گفتگو می‌کنیم. جدول I پارامترهای نمونه گیری شده در آزمایشات عددی را نشان می‌دهد. سری اول پارامترها، پارامترهای مورد استفاده در خود مساله بهینه‌سازی است و سری دوم پارامترها بوسیله موتور OptQuest مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱). هزینه کلی محاسبه، همان میزان زمان کلی تعیین شده جهت جستجوی یک راه حل بهینه است. هزینه محاسبه هر تکرار، زمان هر شبیه‌سازی است که توسط OptQuest انجام می‌شود که شامل درخواست موتور تعیین تفکیک سازی در شکل ۱ است. هر تکرار شامل برگشت تخمین مقدار احتمال خاموشی است. مادامی که این تخمین‌ها اتفاقی است، OptQuest ممکن است چندین تکرار را انجام دهد تا ببیند که آیا راه حل ما بهتر از راه‌حل‌های موجود است یا نه؟ این نتیجه زمانی با سطح اطمینان بالا حاصل می‌شود که OptQuest

ساختار مساله بهینه‌سازی دارای رفتارهای غیرعادی باشد، نمی‌توانیم مثل آزمایشاتی که در اینجا فرض کردیم عمل کنیم.

C. شبکه تست ۱۴ شینه استاندارد IEEE

در این قسمت، ما از یک شبکه ۱۴ شینه IEEE به عنوان شبکه تست استفاده می‌کنیم. طول و عرض جغرافیایی باس‌ها مشخص نشده است پس از طول خطوط چشم پوشی شده است (ما فرض می‌کنیم $d_{ij} = 1$). مطابق مساله قبل، متوسط ظرفیت هر خط را به اندازه $3/4$ بزرگترین ظرفیت دیده شده در خطوط دیده می‌شود و به ازای تمام حالت‌هایی که در آن خاموشی فقط برای یک شین اتفاق می‌افتد در نظر می‌گیریم.

پارامترهای بهینه‌سازی به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

هزینه توسعه T برای یک افزایش ظرفیتی برابر با $1000 \times 0.7\%$ واحد در نظر گرفته می‌شود. هزینه زمانی ما حدود ۱۲ ساعت برای هر مساله حداقل‌سازی و زمان مصرفی جهت هر تکرار ۶۰ ثانیه می‌باشد. بقیه پارامترها مطابق جدول I است. چون شبکه شامل دو سطح ولتاژ متفاوت است، قیدهایی را برای جلوگیری از ایجاد خط اتصال جدید بین این دو سطح ولتاژ قرار می‌دهیم و طبق آن تنها خط‌های جدید در داخل این دو سطح ولتاژ در نظر گرفته می‌شوند نه بین این دو سطح ولتاژ. شکل ۱۰ نتایج دو مساله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

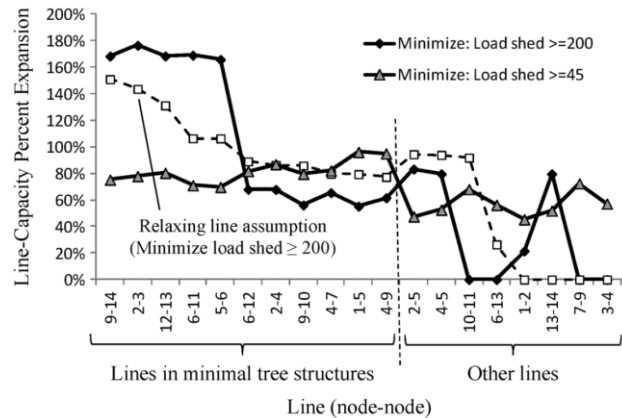
خطوط موجود استفاده کنیم و خط جدیدی اضافه نگردد ولو اینکه هزینه ثابت احداث خطوط جدید صفر باشد. دوم اینکه بهترین راه حل برای حداقل کردن احتمال خاموشی ۵، ۱۰ و ۱۵ مگاوات نزدیک به راه حل کوچکترین درخت است. یعنی راه‌حلی که همان مقدار افزایش ظرفیت را در راه حل کوچکترین درخت به هر خط اعمال می‌کند (شکل ۳). در مقابل، بهترین راه حل برای حداقل کردن احتمال قطعی ۲MW، به راه‌حلی که همان مقدار ثابت را به تمام خطوط شبکه وارد می‌کند، نزدیکتر است. با این وجود، گرایش به افزایش ظرفیت خطوط به اندازه کمی بیشتر از روش کوچکترین درخت وجود دارد. این مساله با شکل ۴ همسان است که در آن راه حل کوچکترین درخت در تمام موارد مگر خاموشی‌های کوچک به روش توسعه یکسان خطوط برتری دارد. نتیجتاً با اینکه روش کوچکترین درخت ممکن است در تمام موارد بهینه نباشد ولی به نظر می‌رسد که در اکثر موارد مطلوب عمل می‌کند و بهترین جواب با OptQuest یافته و از راه حل اصلی ما انحراف زیادی ندارد. سوم اینکه بعضی از راه‌حل‌ها افزایش ظرفیت یک یا دو خط را در روش کوچکترین درخت حذف می‌کند (یعنی مثلاً خطوط ۲-۳ و یا ۱۵-۱۰). این راه‌حل‌ها ممکن است جهت پایین آمدن احتمال خاموشی‌های بزرگ، فدای حفاظت یک یا دو شین از شبکه شوند (اجازه دهیم که احتمال خاموشی‌های کوچک بیشتر شود).

نهایتاً ما یک محدودیت بالقوه با ساختار مساله بهینه‌سازی (۳) و (۴) را در نظر می‌گیریم. بهینه‌سازی قصد دارد که احتمال خاموشی در یک سطح ویژه را حداقل کند. نکته جالب توجه راه حل این است که در هنگام به حداقل رساندن احتمال خاموشی در حدی خاص به بعضی از شین‌ها را از خط خارج کنیم. مثلاً فرض کنید که می‌خواهیم $\Pr \{shed load \geq 10\}$ را حداقل کنیم. یک سیاست بالقوه این است که همه منابع را جهت حفاظت ۱۶ شین در شبکه قرار دهیم در حالی که از ۲۵ شین دیگر صرف نظر کنیم. بعبارت دیگر می‌توانیم یک خاموشی ۹MW را تحمل کنیم اما نمی‌خواهیم که شین دهم با مشکل روبرو شود. نتیجه این است که این راه حل میل دارد به مراتب بدتر از بهترین راه حل یافت شده با OptQuest باشد. بنابراین هرگاه

VI. نتیجه گیری

ما یک مدل شبیه سازی بهینه را برای فرموله کردن مساله افزایش قدرت شبکه به منظور حداقل کردن احتمال خاموشی آبخاری معرفی کردیم. فضای تصمیم گیری شامل افزودن تعدادی خط جدید و تقویت و به روز رسانی خط های موجود بود (توسعه و افزایش ظرفیت تولید مد نظر ما نبود). مساله بهینه سازی را با استفاده از ترکیب یک حل کننده بازرگانی به نام OptQuest و تکنیک تفکیک کردن برای تخمین احتمالات اتفاقات نادر مورد نظر در یک زمان منطقی و معقول انجام دادیم. این یک جنبه متمایز این کار با متون موجود در رابطه با افزایش ظرفیت بود. آزمایشات عددی متنوعی را در شبکه های با توپولوژی خاص شامل شبکه چهار خانه ای، شبکه درختی، شبکه تست IEEE برقرار کردیم. بهینه سازی با دو روش ابتکاری حل یکنواخت که ظرفیت هر خط شبکه را به صورت یکنواخت افزایش می داد و حل کوچکترین درخت که یک زیرمجموعه از خطوط شبکه که از یک ژنراتور شروع می شد را ترکیب کردیم. هر مساله بهینه سازی را با محاسبه هزینه های زمانی ۱ الی ۳ روزه ارزیابی کردیم و بهترین پاسخ گزارش شده را بدست آوردیم.

یک مشاهده کلیدی این بود که تدابیر مختلف افزایش ظرفیت باعث شکل گیری شکل های متفاوتی از توزیع خاموشی گردید. یافته های ما نشان می دهد که تدابیری که در خاموشی های با مقیاس کوچک موفق بودند ضرورتاً در خاموشی های در مقیاس بزرگ موفق نبودند و بالعکس. به ویژه خاموشی های کوچک معمولاً از طریق راه حل هایی که به لحاظ کیفی به راه حل ابتکاری افزایش یکنواخت شبیه بود، احتمالاً مورد نظر را حداقل می کرد. به عبارت دیگر با تمرکز تمام منابع بر تقویت و قوی سازی یک مسیر برای هر شین شبکه از خاموشی های در مقیاس بزرگ جلوگیری می شد و این روش نسبت به قرار دادن منابع موجود در مسیرهای مختلف متصل به یک شین موفق تر بود. یافته دوم این است که بهترین روش معمولاً روشی است که خطوط جدیدی را به شبکه اضافه نمی کند و خطوط جدید تنها در شبکه هایی که از تمام ظرفیت خطوط آن استفاده نمی شود و به اصطلاح (low-utilization) هستند استفاده می شود. ما این رفتار را در یک تحلیل تئوریک برای مدل دو شین که به صورت تحلیلی قابل حل بود تایید کردیم.



شکل ۷: نتایج روش بهترین حل بدست آمده برای شبکه ۱۴ شینه IEEE

یکی از آنها احتمال وقوع خاموشی ۲۰۰ MW را حداقل می کند و دیگری احتمال وقوع خاموشی ۴۵ MW را (بار شبکه حدود ۲۵۹ MW است). این نتایج برای شبکه های درخت مانند و هم شبکه های چهارخانه ای یکسان است. در خاموشی های با مقیاس بزرگ، روش "بهترین راه حل" تمایل به تمرکز منابع بر روی ساختار کوچکترین درخت دارد هر چند که بعضی از خطوط خارج از کوچکترین درخت نیز در این مورد توسعه می یابند. برای خاموشی های کوچک، روش "بهترین راه حل" تمایل به افزایش ظرفیت هر خط شبکه به طور نسبی دارد (در اینجا تقریباً برابر $25\% \pm 7\%$). در اینجا تفاوت های کیفی بین این دو روش به روشنی دو شبکه ایده آل قبل (با بررسی شکل های ۵ و ۷ و ۱۰) نیست. حل های شبکه IEEE ۱۴ شینه به نظر می رسد که به حل شبکه درخت مانند نزدیکتر باشد تا به شبکه چهارخانه ای.

شکل همچنین شامل مثالی است که در آن مشخصه های خط در هنگام افزایش ظرفیت تغییر می کند (با استفاده از اطلاعات خط انتقال از مرجع [۲۸])، ما یک منحنی برای ساختن ارتباط تقریبی بین سوسپتانس خط و بار گذرای امیدانسی موجی (SIL) برقرار می کنیم. با در نظر گرفتن SIL به عنوان جایگزین ظرفیت خط، یک ارتباط فرضی بین ظرفیت و سوسپتانس خط حاصل می شود. با این فرض خفیف، مساله به صورتی می شود که در آن تمرکز منابع بر ساختار کوچکترین درخت است به علاوه تعداد کمی از خطوط دیگر.

IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1434–1443, Aug. 2011.

[9] E. da Silva, H. Gil, and J. Areiza, “Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, no. 3, pp. 1168–1175, Aug. 2000.

[10] D. Kirschen and G. Strbac, “Why investments do not prevent black-outs,” Electricity J., vol. 17, no. 2, pp. 29–36, 2004.

[11] H. Youssef and R. Hackam, “New transmission planning model,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, no. 1, pp. 9–18, Feb. 1989.

[12] M. Xie, J. Zhong, and F. Wu, “Multiyear transmission expansion planning using ordinal optimization,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 4, pp. 1420–1428, Nov. 2007.

[13] D. Camac, R. Bastidas, R. Nadira, C. Dortolina, and H. Merrill, “Transmission planning criteria and their application under uncertainty,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 4, pp. 1996–2003, Nov. 2010.

[14] M. Carrión, J. Arroyo, and N. Alguacil, “Vulnerability-constrained transmission expansion planning: A stochastic programming approach,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 4, pp. 1436–1445, Nov. 2007.

[15] H. Ren, I. Dobson, and B. Carreras, “Long-term effect of the n-1 criterion on cascading line outages in an evolving power transmission grid,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 3, pp. 1217–1225, Aug. 2008.

[16] H. Ge and S. Asgarpour, “Reliability evaluation of equipment and substations with fuzzy Markov processes,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 3, pp. 1319–1328, Aug. 2010.

[17] G. K. Chan and S. Asgarpour, “Optimum maintenance policy with Markov processes,” Electric Power Syst. Res., vol. 76, pp. 452–456, 2006.

[18] D. Newman, B. Carreras, V. Lynch, and I. Dobson, “Exploring complex systems aspects of blackout risk and mitigation,” IEEE Trans. Rel., vol. 60, no. 1, pp. 134–143, Mar. 2011.

[19] “Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations,” 2004 [Online]. Available: <http://www.nerc.com>

[20] J. Shortle, C. H. Chen, B. Crain, A. Brodsky, and D. Brod, “Optimal splitting for rare-event simulation,” IIE Trans., vol. 44, no. 5, pp. 352–367, 2012.

[21] J. Chen, J. Thorp, and I. Dobson, “Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model,” Electr. Power Energy Syst., vol. 27, no. 4, pp. 318–326, 2005.

[22] K. Bae and J. Thorp, “A stochastic study of hidden failures in power system protection,” Decision Support Syst., vol. 24, no. 3–4, pp. 259–268, 1999.

کارهای جدیدی که می‌توان درباره این موضوع انجام داد که باعث پیچیده‌تر شدن مساله می‌گردد، دخیل کردن موضوعاتی مثل خرابی ژنراتور، تاثیرات گذرا و خطای انسانی می‌باشد. علاوه بر این پیشنهاد می‌شود که چهارچوب این بهینه‌سازی را با اجرای یک شبکه هوشمند مثل قرار دادن سنسور و کنترل‌های خوددرمان ترکیب کرده و آنها را با هم مطابقت دهیم.

تاییدیه

نویسندگان این مقاله از تمام خوانندگانی که پیشنهادات سازنده را در جهت بهبود مقاله ارایه نمایند، صمیمانه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] S. Lee, “For the good of the whole,” IEEE Power Energy Mag., vol. 5, no. 5, pp. 24–35, 2007
- [2] D. Morrow and R. Brown, “Future vision: The challenge of effective transmission planning,” IEEE Power Energy Mag., vol. 5, no. 5, pp. 36–45, 2007.
- [3] W. Li and P. Choudhury, “Probabilistic transmission planning,” IEEE Power Energy Mag., vol. 5, no. 5, pp. 46–53, 2007.
- [4] R. Romero, R. Gallego, and A. Monticelli, “Transmission system expansion planning by simulated annealing,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 1, pp. 364–369, Feb. 1996.
- [5] S. Haffner, A. Monticelli, A. Garcia, J. Mantovani, and R. Romero, “Branch and bound algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model,” Proc. Inst. Electr. Eng.—Gen., Transm., Distrib., vol. 147, no. 3, pp. 149–156, 2000.
- [6] P. Maghouli, S. Hosseini, M. Buygi, and M. Shahidehpour, “A scenario-based multi-objective model for multi-stage transmission expansion planning,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 470–478, Feb. 2011.
- [7] H. Yu, C. Chung, and K. Wong, “Robust transmission network expansion planning with Taguchi’s orthogonal array testing,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1573–1580, Aug. 2011.
- [8] J. Zhao, J. Foster, Z. Dong, and K. Wong, “Flexible transmission network planning considering distributed generation impacts,”

- [37] F. Glover, M. Laguna, and R. Mart, "Scatter search and path relinking: Advances and applications," in Handbook of Metaheuristics, F. Glover and G. Kochenberger, Eds. Boston, MA, USA: Kluwer Academic, 2003, pp. 1–35.
- [38] B. Carreras, V. Lynch, M. Sachtjen, I. Dobson, and D. Newman, "Modeling blackout dynamics in power transmission networks with simple structure," in Proc. 34th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci., 2001.
- [23] M. Anghel, K. Werley, and A. Motter, "Stochastic model for power grid dynamics," in Proc. 40th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci., 2007.
- [24] B. Carreras, V. Lynch, I. Dobson, and D. Newman, "Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts," Chaos, vol. 12, no. 4, pp. 985–994, 2002.
- [25] M. Better, F. Glover, and M. Laguna, "Advances in analytics: Integrating dynamic data mining with simulation optimization," IBM J. Res. Devel., vol. 51, no. 3/4, pp. 477–487, 2007.
- [26] J. Shortle, "Efficient simulation of blackout probabilities using splitting," Electr. Power Energy Syst., vol. 44, no. 1, pp. 743–751, 2013.
- [27] J. Kim, J. Bucklew, and I. Dobson, "Splitting method for speedy simulation of cascading blackouts," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 3010–3017, Aug. 2013.
- [28] A. V. Meier, Electric Power Systems: A Conceptual Introduction. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2006.
- [29] S. Frank, I. Steponavice, and S. Rebennack, "Optimal power flow: A bibliographic survey I, formulations and deterministic methods," Energy Syst., vol. 3, no. 3, pp. 221–258, Sep. 2012.
- [30] Q. Chen and L. Mili, "Risk-based composite power system vulnerability evaluation to cascading failures using importance sampling," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet., 2011.
- [31] P. L'Ecuyer, V. Demers, and B. Tuffin, "Splitting for rare-event simulation," in Proc. Winter Simulation Conf., L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol, and R. M. Fujimoto, Eds., 2006, pp. 137–148, Piscataway, NJ: IEEE.
- [32] P. L'Ecuyer, F. L. Gland, P. Lezard, and B. Tuffin, "Splitting techniques," in Rare Event Simulation Using Monte Carlo Methods, G. Rubino and B. Tuffin, Eds. Chichester, U.K.: Wiley, 2009, pp. 39–62.
- [33] J. Shortle and P. L'Ecuyer, "Introduction to rare-event simulation," in Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science, J. Cochran, Ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.
- [34] F. Glover, J. P. Kelly, and M. Laguna, "New advances and applications of combining simulation and optimization," in Proc. Winter Simulation Conf., J. M. Charnes, D. J. Morrice, D. T. Brunner, and J. J. Swain, Eds., 1996, pp. 144–152.
- [35] F. Glover and M. Laguna, Tabu Search. Boston, MA, USA: Kluwer Academic, 1997.
- [36] F. Glover, M. Laguna, and R. Mart, "Scatter search," in Advances in Evolutionary Computation: Theory and Applications, A. Ghosh and S. Tsutsui, Eds. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2003, pp. 519–537.