یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

انواع روش‌های مدلسازی عدم قطعیت در سیستم های قدرت الکتریکی

علیرضا عبادی زاهدان (نویسنده مسئول)[1]، مجید نجارپور[2]

[1]دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران ، تهران alireza.ebadi@srbiau.ac.ir

[2] دانشگاه ارومیه، ارومیه st_m.najjarpour@urmia.ac.ir

چکیده

برنامه‌ریزی کوتاه مدت شبکه توزیع آینده در معرض عدم قطعیت‌های تولید باد و مصرف بار می‌باشد. بی‌توجهی به ریسک عدم قطعیت‌های ذکر شده منجر به خسارت مالی بزرگ به اپراتور شبکه توریع می‌شود. در نتیجه هدف اپراتورهای شبکه‌های توزیع این است که هزینه کلی شبکه‌های توزیع را با توجه به مقادیر پیش بینی شده تولید توسط باد و مصرف بار مینیمم کنند مادامی‌که تضمین کنند برنامه‌ریزی انرژی و رزرو در حین تغییر متغیرهای غیرقطعی شبکه توزیع قابل اطمینان باقی بمانند. در نتیجه روش‌های مدلسازی عدم قطعیت از اهمیت بسزایی در برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع برخوردار می‌باشند. در این مقاله انواع روش های مدل سازی عدم قطعیت بطور جامع بررسی شده و روش جدید تاگوچی مبتنی بر آرایه های متعامد نیز بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی

تاگوچی، عدم قطعیت، احتمالاتی، آرایه متعامد، IGDT

۱. مقدمه

گسترش شبکه‌های هوشمند در سطح توزیع باعث افزایش حضور منابع انرژی پراکنده شامل سیستم‌های تولید تجدیدپذیر و غیر تجدیدپذیر, سیستم‌های ذخیره انرژی باتری و برنامه‌های پاسخگویی بار می‌شود[۱]. حضور یک یا تعداد بیشتری از این تجهیزات با توجه به عدم قطعیتی که به‌همراه دارند منجر به ایجاد پیچیدگی و چالش‌های بیشتر در برنامه‌ریزی روز بعد شبکه‌های توزیع هوشمند شده‌است [۲]. مسائل بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع در سه حوزه‌ی قطعیت، ریسک وعدم قطعیت تقسیم می‌شوند [۳]. در حوزه قطعیت، همه‌ی پارامترها قطعی و معلوم هستند. یعنی همه‌ی ورودی‌های مدل به شکل مقادیر معلوم به مدل وارد می‌شوند و خروجی‌ها برای یک دوره‌ی زمانی مشخص تعیین می‌شوند [۴]. اگر چه این مسائل تصمیم‌گیرندگان را در کسب یک دیدگاه کلی نسبت به مسائل بهینه‌سازی یاری می‌دهند. اما نمی‌توانند عدم قطعیت موجود در اتخاذ تصمیمات استراتژیک در دنیای واقعی را نشان دهند [۵]. بعنوان مثال در برنامه‌ریزی قطعی شبکه‌ی توزیع بدون در نظر گرفتن ماهیت احتمالاتی متغیرهای پیشبینی شده، رزرو مورد نیاز شبکه‌ی توزیع قبل از برنامه‌ریزی انرژی تعیین می‌شود [۶]. اما بدلیل عدم وجود روش‌های پیشبینی دقیق، روش‌های قطعی برای برنامه‌ریزی روز بعد شبکه توزیع قابل قبول نیست [۷-۱۱].

در محیط‌های دارای ریسک، پارامترهای غیرقطعی‌ای وجود دار مقدار آنها توسط توزیع‌های احتمالی مشخص قابل تخمین است. مسائلی که در حوزه ریسک مطرح می‌شوند مسائل بهینه‌سازی تصادفی نامیده می‌شوند و هدف کلی آن‌ها بهینه‌سازی مقدار مورد انتظار یک تابع هدف می‌باشد. به عنوان مثال برنامه ریزی رزرو مورد نیاز شبکه توزیع درکنار برنامه‌ریزی روز بعد انرژی مورد نیاز براساس سناریوهای احتمالاتی انجام می‌گیرد. میزان دقت و بهینه بودن روش‌های تصادفی به دقت توزیع احتمالاتی متغیرهای غیرقطعی و تعداد سناریوهایی که در طول مسئله بهینه سازی نظرگرفته شده، بستگی دارد. عدم وجود داده‌های تاریخی کافی منجر به یک توزیع احتمالاتی غیردقیق از متغیرهای تصادفی و در نتیجه منجر به نتایج غلط خواهد شد. بعلاوه با افزایش تعداد سناریوها پیچیدگی‌های محاسباتی مسئله بهینه‌سازی به‌شدت افزایش می‌یابد [۱۲- ۱۵].

در حوزه‌ی عدم قطعیت، پارامترها غیرقطعی بوده و به علاوه اطلاعات مناسبی در مورد توزیع احتمالی آن‌ها در دسترس نیست. مسائلی که در حوزه‌ی عدم قطعیت وارد می‌شوند مسائل بهینه‌سازی پایدار نامیده می‌شوند که در آن‌ها تلاش بر این است که عملکرد سیستم در بدترین حالت بهینه گردد . هدف برنامه‌ریزی تصادفی و پایدار، یافتن راه حلی است که بتواند در همه حالت های تصادفی مربوط به متغیرهای غیرقطعی عملکرد مناسبی داشته باشد. تعریف "عملکرد مناسب" در شرایط متفاوت مختلف بوده و تعریف معیار مناسب برای اندازه گیری عملکرد جزو فرآیند مدل سازی محسوب می‌گردد. پارامترهای تصادفی می‌توانند پیوسته باشند یا با سناریوهای گسسته ارائه شوند. اگر در مورد توزیع احتمالی پارامترها اطلاعاتی در دست باشد، می‌توان عدم قطعیت را در قالب یک توزیع گسسته و یا پیوسته نمایش داد. در غیر این صورت لازم است پارامترهای پیوسته در بازه‌های مشخصی محدود گردند [۱۹- ۱۸]

۱.۱. مروری بر منابع

مطالعات انجام شده در زمینه‌ی شبکه‌های شعاعی روش‌های مختلفی را برای برنامه‌ریزی بهینه‌ی روز بعد این شبکه‌ها معرفی کرده اند. در این قسمت به تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه‌ی برنامه شبکه‌های شعاعی توزیع برق پرداخته شده‌است. مطالعه‌ی انجام گرفته در [۱۹] یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی برای برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع هوشمند ارائه کرده‌است. در سطح اول چارچوب ارائه شده بر خرید از بازار روز پیش و در مدار قرار دادن واحدهای DG تمرکز شده‌است در حالی که توزیع زمان واقعی واحدهایDG، خرید و فروش از بازار زمان واقعی و قطع بار تصمیماتی هستند که در مرحله دوم چارچوب ارانه شده گرفته می‌شوند. مطالعه‌ی انجام گرفته در [۲۰] از ایک الگوریتم پخش توان بهینه به‌منظور کمینه کردن هزینه‌ی کلی عملکرد شبکه توزیع با در نظر گرفتن قیود شبکه‌استفاده کرده‌است و از روش بهینه‌سازی قطعی برای حل مسئله در آن استفاده شده‌است. یک روش برمبنای منطق فازی به‌منظور برنامه‌ریزی شبکه توزیع در [۲۱] ارائه شده‌است که هدف آن کمینه کردن هزینه‌های عملکرد از یک طرف و کمینه کردن آلودگی‌های زیست محیطی از طرف دیگر است. در [۲۲] متغیرهای غیرقطعی مربوط به برنامه‌ریزی شبکه توزیع به‌وسیله‌ی توابع توزیع احتمالاتی مدل شده اند و برنامه‌ریزی رزرو در کنار برنامه‌ریزی روز بعد شبکه توزیع بر مبنای سناریوهای احتمالاتی انجام گرفته‌است. مرجع [۲۳] مدل ارانه شده در مرجع [۱۹] را

توسعه داده‌است؛ به‌طوری که هزینه مورد انتظار عملکرد شبکه توزیع کمینه شده و در کنار آن، ریسک مربوط به عدم قطعیت‌های موجود در مسئله در این مطالعه در نظر گرفته شده‌است.

اما مدل تصادفی ارائه شده در این مرجع بر برنامه‌ریزی انرژی بدون در نظرگرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر مانند پاسخگویی بار تمرکز کرده‌است. همچنین ریسک مربوط به عدم قطعیتهای موجود در مسئله در یک سطح از پیش تعیین شده محدود شده‌است .یک مدل بهینه‌سازی تصادفی دو سطحی بمنظور برنامهریزی انرژی و رزرو شبکه‌های توزیع هوشمند با حضور بالای تولید انرژی الکتریکی توسط باد در [۲۴] ارائه شده‌است که هدف آن کمینه کردن هزینه‌های عملکردی مورد انتظار این شبکه‌ها است.

در[۲۵] یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی ریسک پایه برای برنامه‌ریزی شبکه توزیع هوشمند ارائه شده‌است که دارای اهداف کمینه کردن هزینه عملکرد و مدیریت ریسک میباشد. مرجع [۲۶] یک مدل چند هدفه تصادفی برای برنامه‌ریزی بهینه شبکه‌های توزیع ارائه کرده‌است که هدف آن کمینه کردن هزینه‌ی عملکرد و آلودگی‌های زیست محیطی است. همچنین در این مطالعه پاسخگویی طرف مصرف کننده نیز بعنوان یکی از منابع تامین کننده‌ی انرژی در نظر گرفته شده‌است. یک مدل عملکرد یکپارچه در [۲۷] ارائه شده‌است که در آن توپولوژی شبکه، برنامه‌ریزی ساعتیDGها و قطع بارها بصورتی تعیین شده‌اند که هزینه عملکرد شبکه توزیع کمینه شده‌است.

همچنین در این مطالعه به مسائل مربوط به سمت مصرف کننده توجه ویژه‌ای شده‌است .در [۲۸] یک مدل برای مدیریت هوشمند انرژی مشتریان ارائه شده‌است که مدل آن برنامه ریزی همزمان تجهیزات گرمایی و الکتریکی است بصورتی که هزینه برق کمینه شود.

در [۲۹] یک مدل قیمت گذاری روز بعد ارائه شده‌است که هدف آن بیشینه کردن سود تامین کننده‌های انرژی است بطوریکه راحتی مصرف کننده نیز در این مطالعه در نظر گرفته شده‌است. یک مدل هماهنگ از بارهای قابل قطع و واحدهای DG بر مبنای بهینه‌سازی چند سطحی تصادفی در [۳۰] ارائه شده‌است که تابع هدف آن کمینه کردن هزینه ی عملکرد مورد انتظار ریزشبکه‌ها و مدیریت ریسک با استفاده از برنامه ریزی رزرو است. در [۳۱] بهینه‌سازی عملکرد ریزشبکه‌ها با هدف بیشینه کردن سود و مدیریت ریسک ارائه شده‌است. یک مدل احتمالاتی برای تخمین رزرو چرخان ریز شبکه‌ها در [۳۲] ارائه شده‌است که در این مدل عدم قطعیت‌های مربوط به توان باد و خورشید ، در دسترس نبودن واحدهای DG و عدم قطعیت‌های مربوط به بار در نظر گرفته شده‌است. در [۳۳] یک روش بهینه‌سازی تصادفی دو سطحی بمنظور مدیریت انرژی و رزرو ریز شبکه‌ها ارائه شده‌است که در سطح اول بهینه‌سازی بر مبنای پیش بینی‌های انجام شده در مورد میزان تولید توسط انرژی باد و خورشید و همچنین پیش بینی انجام شده در مورد میزان مصرف مشتریان، صورت می‌گیرد. در سطح دوم میزان بهینه ی رزرو چرخان با استفاده از آنالیز حساسیت تخمین زده می‌شود. در [۳۴] برنامه‌ای پاسخگویی بار از نوع قطع بار و انتقال بار را به منظور برنامه ریزی نیروگاه‌های تولید توان مجازی ترکیب کرده‌است که هدف مطالعه می‌انجام شده در این مرجع بیشینه کردن سود است. یک بهینه‌سازی احتمالاتی با | هدف ادغام برنامه‌های پاسخگویی بار در بازار انرژی توزیع شده بر مبنای قیمت جدی در [۳۵] ارائه شده‌است. در[۳] در کنار برنامه ریزی انرژی، برنامه‌های پاسخگویی بار بمنظور مدیریت تناوب منابع تجدیدپذیر بخصوص انرژی بادی استفاده شده اند. در [۳۷] یک معرفی رزرو چرخان با پاسخگویی بار و منبع انرژی باتری با الگوی احتمالاتی - تصادفی ارائه شده‌است. در [۳۸] و [۳۹] به معرفی روش بهینه‌سازی مقاوم ، نحوه ی عملکرد آن و کاربردهای آن پرداخته شده‌است. همچنین مزایای استفاده از این روش و مقایسه ی آن نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی در این مراجع آورده شده‌است.

۲. مفهوم عدم قطعیت

مقابله با عدم قطعیت برای سالیان متمادی یکی از اصلی ترین مسائل و نگرانی‌های تصمیم گیرندگان مسائل مختلف شامل دولتمردان، مهندسان و دانشمندان بوده‌است. می‌توان مفهوم عدم قطعیت را شرایطی تعریف کرد که داده‌ها و اطلاعات به طور ناقص وجود دارد. برای مثال تفاوت و فاصله بین مقدار اطلاعات لازم برای انجام کاری و مقدار اطلاعات موجود از جمله تعریف ارائه شده برای مفهوم عدم قطعیت می‌باشد. در برنامه ریزی ریاضی معمولا مسائل با پیش فرض قطعی بودن داده‌ها حل می‌شوند حال آنکه در دنیای واقعی اکثر داده‌ها دچار عدم قطعیت اند. عدم قطعیت می‌تواند بر روی بهینگی و موجه بودن مسائل تأثیر بگذارد معمولا از بهترین برآورد داده‌ها جهت به کارگیری در مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود و این داده‌ها را داده‌های اسمی می‌نامند. در مسائل دنیای واقعی ممکن است با تغییر یکی از داده‌ها تعداد زیادی از محدودیت‌ها نقض شده و جواب بدست آمده غیر بهینه یا حتی غیر ممکن باشد. بیشتر تصمیم گیری‌هایی که

توسط تصمیم گیرندگان بخش انرژی انجام می‌گیرد همواره با مقدار مشخصی از عدم قطعیت همراه‌است. از طرف دیگر با افزایش حضور منابع انرژی تجدید پذیر مانند انرژی بادی و خورشیدی و تجدید ساختار سیستم‌های قدرت عدم قطعیت‌های جدیدی در عملکرد و تصمیم گیری‌های مربوط به سرمایه گذاری ایجاد شده‌است. بنابر این، یکی از اصلی ترین شاخصه‌های شبکه‌های برقی آینده برنامه ریزی کوتاه مدت و بلند مدت این شبکه‌ها تحت مقادیر بالایی از داده‌های غیر قطعی خواهد بود. به طور کلی پارامترهای غیر قطعی سیستم‌های قدرت به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۱.۲. پارامترهای فنی

این پارامترها به دو دسته ی پارامترهای ساختاری و پارامترهای عملکردی تقسیم می‌شوند. پارامترهای ساختاری آنهایی هستند که به ساختار شبکه ی قدرت مانند خطاها و خروج اجباری خطوط، ژنراتورها و دستگاه‌های اندازه‌گیری و ... مرتبط هستند. پارامترهای عملکردی مربوط به تصمیمات عملکردی شامل بار با مقادیر تولید شبکه‌های قدرت هستند.

۲.۲. پارامترهای اقتصادی

پارامترهایی که شاخص‌های اقتصادی را تحت تاثیر قرار می‌دهند، در این دست قرار می‌گیرند. پارامترهای اقتصاد خرد در تصمیم گیری‌های مربوط به تجارت‌های کوچک مانند نهادهای تجمیع کننده، مصرف کنندگان خانگی یا صنعتی تمرکز می‌کند؛ حال آنکه پارامترهای اقتصاد کلان بر کل سیستم قدرت تمرکز کرده‌است. به عنوان مثال عدم قطعیت قیمت سوخت، قیمت تولید، مالیات‌های تجاری، کارگر و مواد اولیه در اقتصاد خرد بحث می‌شوند.

و مواردی مانند مقررات زدایی، سیاست‌های زیست محیطی، رشد اقتصادی، نرخ بیکاری، تولید ناخالص داخلی و نرخ بهره در اقتصاد کلان مورد بررسی قرار می‌گیرند. همه ی این‌ها جزو پارامترهای عدم قطعیت اقتصادی می‌باشند و باید به درستی به آنها پاسخ داده شود.

۳. روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت

مطالعات سیستم‌های قدرت و شبکه‌های توزیع توانایی مقابله با عدم قطعیت‌های ذکر شده را ندارند بنابر این مدلسازی‌های مختلفی برای مقابله با عدم قطعیت‌های موجود ایجاد شده‌است. روش‌های استفاده شده در مطالعات شبکه‌های توزیع جهت مدلسازی عدم قطعیت رنج وسیعی از روش‌ها شامل روش‌های احتمالاتی (probabilistic)، روش‌های تصادفی (possiblistic)، روش‌های ترکیبی(احتمالاتی-تصادفی)، تئوری شکاف اطلاعاتی (IGDT) و بهینه‌سازی مقاوم (Robust) را تشکیل می‌دهند.

هدف اصلی این روش‌ها اندازه گیری تاثیر پارامترهای غیر قطعی ورودی بر پارامترهای خروجی سیستم می‌باشد. با این وجود تفاوت اصلی این روش‌ها استفاده از راهکارهای مختلف برای تعریف عدم قطعیت پارمترهای ورودی است. برای مثال، تابع توزیع احتمالاتی در روش‌های احتمالاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد حال آن‌که در روش فازی تابع عضویت برای مدلسازی پارامتر عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک توضیح مختصری از مدلسازی عدم قطعیت بوسیله ی روش‌های ذکر شده در ادامه آمده‌است.

۱.۳. روش احتمالاتی

مدل‌های بهینه‌سازی احتمالاتی اولین بار توسط دنزیک و بیل در سال ۱۹۹۵ ابداع شد [۴۰]. این مدل‌ها یک دید احتمالی برای جانشینی قطعیت در زمانی که ضرایب و پارامترهای ناشناخته، احتمالی هستند ارائه می‌دهند. تعداد زیادی از مدل‌های دارای عدم قطعیت از توزیع‌های آماری برای عدم قطعیت داده‌ها استفاده می‌کنند. پس این مدل‌ها زمانی قابل استفاده هستند که یا تابع توزیع احتمالاتی پارامترهای ورودی مشخص و معلوم باشد، یا بتوان توزیع مشخصی به آنها اختصاص داد [۵۰-۴۱]. به عنوان مثال سرعت باد از توزیع ویبال تبعیت می‌کند و عدم قطعیت بار توسط تابع توزیع نرمال مدل می‌شود.

در این روش فرض شده‌است که تابع توزیع احتمالاتی (PDF) متغیرهای ورودی در دسترس است. هدف، رسیدن به PDF متغیرهای خروجی با استفاده از PDF متغیرهای ورودی است. روش احتمالاتی به دو دسته‌ی تکنیک‌های عددی (Numerical) و تکنیک‌های تحلیلی (Analytical) تقسیم می‌شود.

۲.۳. روش‌های عددی

یکی از رایج ترین و دقیق‌ترین این روش‌ها شبیه سازی مونت کارلو Monte Carlo است. این روش کاملا به سایز سیستم وابسقاست و زمانی استفاده می‌شود که سیستم به شدت غیرخطی، پیچیده و دارای تعداد زیادی متغیر غیرقطعی باشد. به صورت کلی، روش مونت کارلو به هر تکنیکی اطلاق می‌شود که از طریق نمونه‌سازی آماری، پاسخ‌های تقریبی برای مسائل کمی فراهم می‌کند. شبیه‌سازی مونت کارلو بیشتر برای توصیف روشی جهت انتشار عدم قطعیت‌های موجود در ورودی مدل به عدم قطعیت‌ها در خروجی مدل، به کار می‌رود. بنابراین مونت‌کارلو، شیه‌سازی‌ای است که صریحا و به صورت کمّی، عدم قطعیت را نمایش می‌دهد. شبیه‌سازی مونت کارلو متکی به فرآیند نمایش صریح عدم قطعیت با تعیین ورودی‌ها به عنوان توزیع‌های احتمال است. اگر ورودی‌های توصیف‌کننده یک سیستم، غیرقطعی باشند، آنگاه پیش‌بینی عملکرد پیش رو الزاما غیرقطعی است. این بدان معنی است که نتیجه هر گونه تحلیل مبتنی بر ورودی‌های نمایش داده شده با توزیع‌های احتمال، خود یک توزیع احتمال است. در شبیه‌سازی مونت کارلو، کل سیستم به تعداد دفعات زیادی اجرا می‌شود (برای مثال ۱۰۰۰ بار). به هر بار شبیه‌سازی، تحقق (realization) سیستم گفته می‌شود. برای هر تحقق، تمام پارامترهای غیرقطعی نمونه برداری می‌شود (یعنی یک مقدار تصادفی از توزیع اختصاصی مربوط به هر پارامتر، انتخاب می‌شود). سپس این سیستم در طول زمان شبیه‌سازی می‌شود (با معین بودن مجموعه پارامترهای ورودی) به گونه‌ای که کارایی سیستم بتواند محاسبه شود. این امر منتج به ایجاد تعداد زیادی نتیجه مستقل و جداگانه می‌شود. که هر کدام نمایشگر یک "آینده" احتمالی برای سیستم هستند (یعنی یک مسیر احتمالی که سیستم احتمالا با گذشت زمان دنبال خواهد کرد). نتایج تحقق‌های مستقل سیستم به شکل توزیع‌های احتمالی خروجی‌های ممکن درخواهند آمد. در نتیجه، خروجی‌ها به صورت مقادیر تک نیستند، بلکه توزیع احتمال هستند. مطالعات انجام شده بر روی شبکه‌های توزیع با استفاده از روش مونت کارلو شامل [۴۱-۴۷] می‌شوند.

۳.۳. روش‌های تحلیلی

روش‌های تحلیلی، سیستم و ورودی‌های آن را با استفاده از بیان ریاضی آنالیز می‌کنند. ایده‌ی اصلی روش‌های تحلیلی انجام محاسبات با استفاده از تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی ورودی است. روش‌های تحلیلی بر دو مبنای خطی سازی و تخمین تابع توزیع احتمال استوار هستند. این روش بر چگونگی تولید نمونه‌هایی از متغیرهای ورودی که توانایی تهیه‌ی اطلاعات مناسبی در مورد تابع توزیع احتمال متغیرهای ورودی دارد، تمرکز کرده‌است. روش تخمین نقطه ای (point estimate method) یکی از مشهورترین روش‌های تحلیلی تخمین پایه می‌باشند [۴۸- ۵۰].

۴.۳. روش تصادفی

منطق فازی یا Fuzzy Logic برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط پروفسور لطفی‌زاده، استاد علوم کامپیوتری دانشگاه برکلی کالیفرنیا (Berkeley) ابداع شد. منطق فازی معتقد است که ابهام در ماهیت علم است. بر خلاف دیگران که معتقدند که باید تقریب‌ها را دقیق‌تر کرد تا بهره‌وری افزایش یابد، لطفی‌زاده معتقد است که باید به دنبال ساختن مدل‌هایی بود که ابهام را به عنوان بخشی از سیستم مدل کند. در منطق ارسطویی، یک دسته‌بندی درست و نادرست وجود دارد. تمام گزاره‌ها درست یا نادرست هستند. بنابراین جمله «هوا سرد است» در مدل ارسطویی اساساً یک گزاره نمی‌باشد» چرا که مقدار سرد بودن برای افراد مختلف متفاوت است و این جمله اساسا همیشه درست یا همیشه نادرست نیست . در منطق فازی، جملاتی هستند که مقداری درست و مقداری نادرست هستند. برای مثال، جمله "هوا سرد است" یک گزاره منطقی فازی می‌باشد که درستی آن گاهی کم و گاهی زیاد است. گاهی همیشه درست و گاهی همیشه نادرست و گاهی تا حدودی درست است. ساده ترین تلقی برای تعریف منطق فازی این است که " منطق فازی جواب یک سوال را به جای تقسیم به دو بخش درست یا نادرست، در اصل به یک محدوده جواب در این بین توسعه داده‌است". نمونه معمول آن، وجود رنگ خاکستری در

طیف نگی بین سیاه و سفید است. در این روش به منظور مدل‌سازی پارامتر ورودی از یک تابع عضویت استفاده می‌شود. درواقع این روش به دنبال تعیین تابع عضویت متغیرهای خروجی با استفاده از تابع عضویت متغیرهای ورودی است. منطق فازی و استفاده از آن برای مدلسازی عدم قطعیت تا حد زیادی به در دسترس بودن خبره و ماهیت پارامتر عدم قطعیت بستگی دارد. مطالعات انجام شده بر روی شبکه‌های توزیع با استفاده از روش تصادفی شامل [۵۶- ۶۰] می‌شوند.

۵.۳. روش ترکیب احتمالاتی- تصادفی

گاهی اوقات تصمیم‌گیرنده با توابع هدف چند متغیره مواجه‌است بطوری که پارامترهای غیرقطعی احتمالاتی و تصادفی بطور همزمان در مسئله وجود دارد. به عنوان مثال فرض کنیم y تابعی از متغیرهای ورودی x و z است. X برداری از پارامترهای ورودی غیرقطعی است که توسط تابع عضویت تعریف شده و z برداری از پارامتره‌ای غیرقطعی است که توسط تابع چگالی احتمال تعریف شده‌است. برای حل چنین مسائلی نیاز به روش‌های ترکیبی از هر دو روش احتمالاتی و تصادفی مورد نیاز است. در این روش پارامترهای احتمالاتی و تصادفی به طور همزمان به منظور مدلسازی عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثالی از این روش‌ها می‌توان روش فازی- مونت کارلو و فازی- سناریو پایه نام برد. در واقع این روش برای عدم قطعیت‌هایی که بعضی از آن‌ها احتمالاتی و بعضی تصادفی تعریف می‌شوند مناسب است. مطالعات انجام شده بر روی شبکه‌های توزیع با استفاده از روش ترکیب احقالاتی - تصادفی شامل [۶۱] و [۶۲] می‌شوند.

۶.۳. روش تصمیم‌گیری بر مبنای شکاف اطلاعاتی (IGDT)

بر خلاف روش‌های قبل این روش از تابع توزیع احتمالاتی یا تابع عضویت استفاده نمی‌کند؛ بلکه تغییرات مقدار خحطا (اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده) را اندازه گیری می‌کند. این روش اولین بار توسط Yakov ben Haim ارائه شده‌است.

تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی به‌یک تصمیم گیرنده کمک می‌کند تا اولویت‌ها را تشخیص داده، ریسک‌ها و فرصت‌ها را ارزیابی نماید. اهمیت و تاکید اصلی IGDT این است که تصمیمات تحت شرایط سخت عدم قطعیت نباید نیاز به اطلاعات اضافی نسبت به اطلاعات قابل دسترس برای تصمیم‌گیرنده داشته باشد. این روش بر این تاکید دارد که با اطلاعات خیلی کم چگونه می‌توان تصمیم‌های مناسبی گرفت. روش IGDT دارای تابع چگالی احتمال یا تابع عضویت فازی نیست و بر اختلاف مابین اطلاعات معلوم و اینکه چه چیزی می‌تواند معلوم شود متمرکز است و کمتر بر ساختار عدم قطعیت تاکید می‌کند. مطالعات انجام شده بر روی شبکه‌های توزیع با استفاده از روش IGDT شامل [۶۳- ۶۵]می‌شوند.

۷.۳. روش بهینه‌سازی مقاوم

ایده‌ی اولیه در بهینه‌سازی مقاوم، در نظر گرفتن بدترین سناریوی ممکن و بهینه‌سازی بر اساس بدترین سناریو است. به عنوان مثال فرض می‌شود که ممکن است ضرایب در یکی از محدودیت‌های مسئله ای تغییر کند. در بهینه‌سازی مقاوم، بدترین حالتی که ممکن است برای آن محدودیت با توجه به تغییر ضرایب پیش بیاید در نظر گرفته شده و طبق آن بهینه‌سازی انجام می‌شود در نتیجه تصمیمات گرفته شده در بدترین حالت عدم قطعیت پارامترها بهینه باقی می‌ماند.

مهم ترین کاستی این روش محافظه کارانه عمل کردن آن است. ممکن است این روش کاربرد عملی زیادی نداشته باشد ولی به عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری بسیار مفید خواهد بود. تصمیم مقاوم تصمیمی است که نسبت به عدم قطعیت محیط تاب آورده و عملکرد ناشی از آن حداقل نوسان را داشته باشد. یک جواب برای یک مسئله بهینه‌سازی، یک جواب مقاوم است، اگر دارای خاصیت مقاوم شدنی (Feasibility Robustness) و مقاوم بهینه (Optimality Robustness) باشد. مقاوم شدنی به این معناست. که جواب باید برای تمامی (بیشتر) حالات ممکن پارامترهای دارای عدم قطعیت شدنی باقی بماند. مقاوم بهینه نیز بدین معناست که مقدار تابع هدف به ازای جواب مقاوم باید برای تمامی (بیشتر) حالات ممکن پارامترهای دارای عدم قطعیت، نزدیک به مقدار بهینه خود بوده و یا به عبارت دیگر حداقل انحراف را از مقدار بهینه خود داشته باشد.

از این منظر که برای مدلسازی عدم قطعیت در مدل‌های مقاوم به دانستن توزیع عدم قطعیت و یا وجود خبره نیازی نیست و تنها کافیست حدود پارامتر غیرقطعی را بدانیم، به کار بردن این مدل‌ها برای مدلسازی عدم قطعیت نسبت به مدل‌های احتمالی و فازی، ساده‌تر است. این روش اولین بار توسط Soyester ارائه شد. وی مدلی ارائه کرد تا در آن جوابی ممکن برای تمامی‌داده‌های متعلق به‌یک

مجموعه محدب ساخته شود ولی مدل ارائه شده به دلیل زیاده روی در محافظه کارانه عمل کردن با جواب بهینه اسمی‌فاصله‌ای زیاد داشت. پس از او نیز افرادی مانند Ben-Tal و Nemirovski و Birtsymas به ارائه مدل‌های بهتری پرداختند تا به اندازه ممکن فاصله از مقدار بهینه را کاهش دهند. مطالعات انجام شده بر روی شبکه‌های توزیع با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم شامل [۶۶] و [۶۷] می‌شوند.

۹.۳. روش آنالیز بازه ای (Interval)

در این روش فرض می‌شود که پارامترهای عدم قطعیت از یک بازه‌ی معلوم مقدار می‌گیرند. این روش قدری شبیه مدلسازی احتمالاتی با یک تابع توزیع احتمالاتی مشخص است. این روش برای مسائلی مناسب است که حد بالا و پایین هر پارامتر ورودی غیرقطعی توسط یک بازه تعریف شده باشد و با استفاده از این بازه، محدوده‌ی متغیرهای خروجی را می‌یابد. این روش توسط Moore ارائه شده‌است. مطالعات انجام شده بر روی شبکه‌های توزیع با استفاده از روش بهینه‌سازی مقاوم شامل [۶۸- ۷۰] می‌شوند.

۱۰.۳. آرایه های متعامد

آرایه‌های متعامد نقش اصلی در روش تاگوچی ایفا می‌کنند، در ۱۹۴۰ معرفی گردید. این آرایه‌ها در طراحی آزمایش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و مقادیر بهینه متغیرهای سیستم با استفاده از تعداد کمی آزمایش، می‌یابند. مجموعه S را مجموعه‌ای از اعداد متفاوت در نظر بگیرید. ماتریس A دارای N ردیف و K ستون حاوی عناصر مجموعه S است یک آرایه متعامد با S سطح و توان t نامیده می‌شود[۱۴،۱۱].

۱۱.۳. روش تاگوچی

روش تاگوچی یک روش آماری است که بر اساس آرایه های متعامد برای بهینه سازی سیستم ها بکار می‌رود. در این مقاله برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های بار و باد از روش تاگوچی استفاده می کنیم، در مسأله پخش‌بار بهینه احتمالاتی، هدف از فاکتورها همان متغیرهای تصادفی است، در این روش تعداد فاکتورها را با m و تعداد سطح از فاکتورها را با n نشان می‌دهند، و بعد از آن، به تعداد آزمایش انجام می‌شود. البته انجام همه آزمایش ها، اغلب دشوار و بسیار هزینه بر است. به کمک آرایه‌های متعامد، امکان انجام حداقل آزمایش‌ها وجود دارد. واژه (سطح) بیانگر مقداری از توزیع احتمالاتی است. گام اول در استفاده از روش تاگوچی، تعیین تعداد سطوح هر فاکتور است. روش تاگوچی با فاکتورهای دوسطحی به کمترین میزان محاسبات پخش‌بار نیاز دارد بنابراین تنها دو سطح از هر فاکتور در نظر می‌گیریم. همواره امکان تنظیم ۲ سطح از یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال وجود دارد، زیرا این توزیع یک توزیع متقارن است. که این سطوح باید به صورت $\mu-\sigma$ و $\mu+\sigma$ بیان شود μ و σ به ترتیب نشان دهنده‌ی میانگین و انحراف از معیار است. مدل بار ارائه شده دراین مقاله توزیع نرمال است. برای یک متغیر تصادفی با توزیع ویبول مانند نیروگاه بادی، نیز می‌توان سطوح را به صورت $\mu-\sigma$ و $\mu+\sigma$ در نظر گرفت. که $\mu-\sigma$ به عنوان سطح ۱ و $\mu+\sigma$ به‌عنوان سطح ۲ معرفی می‌شوند.

۶- جمع بندی

برنامه‌ریزی بهینه شبکه‌ی توزیع در حضور پارامترهای غیرقطعی نیاز به روش‌های مناسبی جهت مدلسازی عدم قطعیت دارد. بسته به شرایط مسئله، نوع و تعداد متغیرهای غیرقطعی و میزان اطلاعات دردسترس، روش‌های مختلفی جهت مدلسازی در مطالعات مختلف استفاده شده‌است. در این مقاله روش‌های مدلسازی عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع بسته به نوع مدلسازی عدم قطعیت صورت گرفت.

منابع

[1] Saber, Ahmed Yousuf, and Ganesh Kumar Venayagamoorthy. "Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions." IEEE Transactions on Industrial Electronics 58.4 (2011): 1229-1238.

[2] Zhang, Ning, et al. "Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading." IEEE Transactions on Smart Grid 7.1 (2016): 420-427.

[3] Milligan, Michael, et al. "Alternatives No More: Wind and Solar Power Are Mainstays of a Clean, Reliable, Affordable Grid." IEEE Power and Energy Magazine 13.6 (2015): 78-87.

[4] Wandhare, Rupesh G., and Vivek Agarwal. "Novel integration of a PV-wind energy system with enhanced efficiency." IEEE Transactions on Power Electronics 30.7 (2015): 3638-3649.

[5] Liu, Cong, et al. "Fuzzy Energy and Reserve Co-optimization with High Penetration of Renewable Energy." IEEE Transactions on Sustainable Energy(2016).

[6] Alipour, Manijeh, Behnam Mohammadi-Ivatloo, and Kazem Zare. "Stochastic risk-constrained short-term scheduling of industrial cogeneration systems in the presence of demand response programs." Applied Energy 136 (2014): 393-404

[7] Wood, Allen J., and Bruce F. Wollenberg. Power generation, operation, and control. John Wiley & Sons, 2012.

[8] Algarni, Ayed AS, and Kankar Bhattacharya. "A generic operations framework for discos in retail electricity markets." IEEE Transactions on Power Systems24.1 (2009): 356-367.

[9] Cecati, Carlo, et al. "Smart operation of wind turbines and diesel generators according to economic criteria." IEEE Transactions on Industrial Electronics58.10 (2011): 4514-4525.

[10] Chakraborty, Shantanu, et al. "Intelligent economic operation of smart-grid facilitating fuzzy advanced quantum evolutionary method." IEEE Transactions on Sustainable Energy 4.4 (2013): 905-916.

[11] Zakariazadeh, Alireza, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano. "Stochastic operational scheduling of smart distribution system considering wind generation and demand response programs." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 63 (2014): 218-225.

[12] Zakariazadeh, Alireza, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano. "Stochastic operational scheduling of smart distribution system considering wind generation and demand response programs." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 63 (2014): 218-225.

[13] Zakariazadeh, Alireza, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano. "Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multiobjective mathematical programming approach." Energy Conversion and Management 78 (2014): 151-164.

[14] Tan, Yi, et al. "A two-stage stochastic programming approach considering risk level for distribution networks operation with wind power." IEEE Systems Journal 10.1 (2016): 117-126.

[15] Zakariazadeh, Alireza, Shahram Jadid, and Pierluigi Siano. "Stochastic multi-objective operational planning of smart distribution systems considering demand response programs." Electric Power Systems Research 111 (2014): 156-168.

[16] Mazidi, Mohammadreza, Hassan Monsef, and Pierluigi Siano. "Incorporating price-responsive customers in day-ahead scheduling of smart distribution networks." Energy Conversion and Management 115 (2016): 103-116.

[17] Mazidi, Mohammadreza, Hassan Monsef, and Pierluigi Siano. "Robust day-ahead scheduling of smart distribution networks considering demand response programs." Applied Energy 178 (2016): 929-942.

[18] Mazidi, Mohammadreza, Hassan Monsef, and Pierluigi Siano. "Design of a risk-averse decision making tool for smart distribution network operators under severe uncertainties: An IGDT-inspired augment ε-constraint based multi-objective approach." Energy 116 (2016): 214-235.

[19] Algarni A.A.S, Bhattacharya K. A generic operations framework for Discos in retail electricity markets. IEEE Trans. Power Syst. 2009; 24(1): 356 -367.

[20] Cecati C, Citro C, Siano P. Smart operation of wind turbines and diesel generators according to economic criteria. IEEE Trans. Ind. Electron. 2011; 58(10):4514 -4525.

[21] Chakraborty S, Ito T, Senjyu T, Saber A.Y. Intelligent economic operation of smart-grid facilitating fuzzy advanced quantum evolutionary method. IEEE Trans. Sustainable Energy 589 2013; 4(4):905-916.

[22] Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Stochastic operational scheduling of smart distribution system considering wind generation and demand response programs. Int. J. Elect. Power Energy Syst. 2014; 63:218-225.

[23] Safdarian A, Fotuhi-Firuzabad M, Lehtonen M. A stochastic framework for short-term 597 operation of a distribution company. IEEE Trans. Power Syst. 2013; 28(4):4712-4721.

[24] Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: A multi-objective mathematical programming approach. Int. J. Energy Convers. Manage. 2014; 78:151-164. 601

[25] Tan Y, Cao Y, Li C, Li Y, Zhou J, Song Y. A Two-Stage Stochastic Programming Approach Considering Risk Level for Distribution Networks Operation with Wind Power. IEEE Systems Journal 2014; to be published.

[26] Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Stochastic multi-objective operational planning of smart distribution systems considering demand response programs. Electr. Power Syst. Res. 2014; 606 111:156-168.

[27] Golshannavaz S, Afsharnia S, Aminifar F. Smart distribution grid: optimal dayahead scheduling with reconfigurable topology. IEEE Trans Smart Grid 2014;5 (5):2402–11.

[28] Shirazi E, Zakariazadeh A, Jadid S. Optimal joint scheduling of electrical and thermal appliances in a smart home environment. Energy Convers Manage 2015;106:181–93.

[29] Doostizadeh M, Ghasemi H. A day-ahead electricity pricing model based on smart metering and demand-side management. Energy 2012;46(1):221–30.

[30] Mazidi M, Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid. Energy Convers Manage 2014;86:1118–27.

[31] Nguyen DT, Le LB. Risk-constrained profit maximization for microgrid aggregators with demand response. IEEE Trans Smart Grid 2015;6(1):135–46.

[32] Wang M, Gooi HB. Spinning reserve estimation in microgrids. IEEE Trans Power Syst 2011;26(3):1164–74.

[33] Mohan V, Singh JG, Ongsakul W. An efficient two stage stochastic optimal energy and reserve management in a microgrid. Appl Energy 2015;160 (15):28–38.

[34] Nosratabadi M, Hooshmand R, Gholipour E. Stochastic profit-based scheduling of industrial virtual power plant using the best demand response strategy. Appl Energy 2016;164(15):590–606.

[35] Siano P, Sarno D. Assessing the benefits of residential demand response in a real time distribution energy market. Appl Energy 2016;161(1):533–51.

[36] Aghaei J, Alizadeh M. Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: a review. Renew Sustain Energy Rev 2013;18:64–72.

[37] Khazali A, Kalantar M. Spinning reserve quantification by a stochastic– probabilistic scheme for smart power systems with high wind penetration. Int J Energy Convers Manage 2015;96:242–57.

[38] Bertsimas D, Litvinov E, Sun XA, Zhao J, Zheng T. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem. IEEE Trans Power Syst 2013;28(1):52–63.

[39] Dantzig, George B. "Linear programming under uncertainty." Management science 1.3-4 (1955): 197-206.

[40] Zio, Enrico, et al. "Monte Carlo simulation-based probabilistic assessment of DG penetration in medium voltage distribution networks." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 64 (2015): 852-860.

[41] Conti, Stefania, and Santi Agatino Rizzo. "Monte Carlo simulation by using a systematic approach to assess distribution system reliability considering intentional islanding." IEEE Transactions on Power Delivery 30.1 (2015): 64-73.

[42] Li, Gengfeng, et al. "Risk analysis for distribution systems in the northeast US under wind storms." IEEE Transactions on Power Systems 29.2 (2014): 889-898.

[43] Arya, Rajesh. "Estimation of distribution system reliability indices neglecting random interruption duration incorporating effect of distribution generation in standby mode." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 63 (2014): 270-275.

[44] Soroudi, Alireza, et al. "Probabilistic dynamic multi-objective model for renewable and non-renewable distributed generation planning." IET generation, transmission & distribution 5.11 (2011): 1173-1182.

[45] Liu, Zhipeng, Fushuan Wen, and Gerard Ledwich. "Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties." IEEE Transactions on power delivery 26.4 (2011): 2541-2551.

[46] Singh, Ravindra, Bikash C. Pal, and Richard B. Vinter. "Measurement placement in distribution system state estimation." IEEE Transactions on Power Systems 24.2 (2009): 668-675.

[47] Su, Chun-Lien. "Stochastic evaluation of voltages in distribution networks with distributed generation using detailed distribution operation models." IEEE Transactions on Power Systems 25.2 (2010): 786-795.

[48] Soroudi, Alireza, Morteza Aien, and Mehdi Ehsan. "A probabilistic modeling of photo voltaic modules and wind power generation impact on distribution networks." IEEE Systems Journal 6.2 (2012): 254-259.

[49] Su, Chun-Lien. "Stochastic evaluation of voltages in distribution networks with distributed generation using detailed distribution operation models." IEEE Transactions on Power Systems 25.2 (2010): 786-795.

[50] Carvalho, Pedro MS, et al. "Distribution network expansion planning under uncertainty: a hedging algorithm in an evolutionary approach." Power Industry Computer Applications., 1997. 20th International Conference on. IEEE, 1997.

[51] Martins, Vinicius F., and Carmen LT Borges. "Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties." IEEE Transactions on Power Systems 26.4 (2011): 2164-2172.

[52] Yu, Han, and W. D. Rosehart. "An optimal power flow algorithm to achieve robust operation considering load and renewable generation uncertainties." IEEE Transactions on Power Systems 27.4 (2012): 1808-1817.

[53] Dadkhah, Maryam, and Bala Venkatesh. "Cumulant based stochastic reactive power planning method for distribution systems with wind generators." IEEE Transactions on Power Systems 27.4 (2012): 2351-2359.

[54] Schellenberg, Antony, William Rosehart, and José Aguado. "Cumulant-based probabilistic optimal power flow (P-OPF) with Gaussian and gamma distributions." IEEE Transactions on Power Systems 20.2 (2005): 773-781.

[55] Ramírez-Rosado, Ignacio J., and J. Antonio Domínguez-Navarro. "Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks." IEEE Transactions on Power Systems 19.4 (2004): 1801-1810.

[56] Soroudi, Alireza, et al. "Possibilistic evaluation of distributed generations impacts on distribution networks." IEEE Transactions on power systems 26.4 (2011): 2293-2301.

[57] Saric, Andrija T., and Rade M. Ciric. "Integrated fuzzy state estimation and load flow analysis in distribution networks." IEEE transactions on power delivery 18.2 (2003): 571-578.

[58] Augugliaro, Antonino, et al. "Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multiobjective approach." IEEE Transactions on Power Systems 19.3 (2004): 1516-1527.

[59] Zhang, Jietan, Haozhong Cheng, and Chun Wang. "Technical and economic impacts of active management on distribution network." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 31.2 (2009): 130-138.

[60] Soroudi, Alireza. "Possibilistic-scenario model for DG impact assessment on distribution networks in an uncertain environment." IEEE Transactions on Power Systems 27.3 (2012): 1283-1293.

[61] Soroudi, Alireza, and Mehdi Ehsan. "A possibilistic–probabilistic tool for evaluating the impact of stochastic renewable and controllable power generation on energy losses in distribution networks—a case study." Renewable and Sustainable Energy Reviews 15.1 (2011): 794-800.

[62] Chen, Kening, et al. "Robust restoration decision-making model for distribution networks based on information gap decision theory." IEEE Transactions on Smart Grid 6.2 (2015): 587-597.

[63] Mazidi, Mohammadreza, Hassan Monsef, and Pierluigi Siano. "Incorporating price-responsive customers in day-ahead scheduling of smart distribution networks." Energy Conversion and Management 115 (2016): 103-116.

[64] Mazidi, Mohammadreza, Hassan Monsef, and Pierluigi Siano. "Design of a risk-averse decision making tool for smart distribution network operators under severe uncertainties: An IGDT-inspired augment ε-constraint based multi-objective approach." Energy 116 (2016): 214-235.

[65] Mazidi, Mohammadreza, Hassan Monsef, and Pierluigi Siano. "Robust day-ahead scheduling of smart distribution networks considering demand response programs." Applied Energy 178 (2016): 929-942.

[66] Conejo, Antonio J., Juan M. Morales, and Luis Baringo. "Real-time demand response model." IEEE Transactions on Smart Grid 1.3 (2010): 236-242.

[67] Chaturvedi, A., K. Prasad, and R. Ranjan. "Use of interval arithmetic to incorporate the uncertainty of load demand for radial distribution system analysis." IEEE Transactions on Power Delivery 21.2 (2006): 1019-1021.

[68] Shaalan, Hesham E., and Robert P. Broadwater. "Using interval mathematics in cost-benefit analysis of distribution automation." Electric power systems research 27.2 (1993): 145-152.

[69] Zhang, Peng, Wenyuan Li, and Shouxiang Wang. "Reliability-oriented distribution network reconfiguration considering uncertainties of data by interval analysis." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 34.1 (2012): 138-144.

[70] Bertsimas D, Brown D.B, Caramanis C. Theory and applications of robust optimization. 608 SIAM review 2011; 53(3):464-501.