

تخصیص بهینه منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن عدم قطعیت بر اساس تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی با استفاده از الگوریتم اجتماع سالپ بهبود یافته

رحیم فتحی^۱، بهروز طوسی^{۲*} و سجاد گلوانی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴	
واژگان کلیدی:	
الگوریتم اجتماع سالپ، تخصیص بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر، تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی، دیفرانسیل تکاملی، عدم قطعیت، قابلیت اطمینان.	در این مقاله تخصیص بهینه منابع تجدیدپذیر در راستای هدف کمینه‌سازی هزینه تلفات توان و هزینه بهبود قابلیت اطمینان و با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید و مصرف بر اساس روش جدید تئوری تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی (IGDT) ارائه شده است. متغیرهای تصمیم‌گیری شامل مکان، ظرفیت نصب و ضریب قدرت و همچنین شعاع عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر و بار شبکه با استفاده از الگوریتم اجتماع سالپ بهبود یافته (ISSA) بصورت بهینه تعیین شده است. در روش ISSA، عملکرد روش اجتماع سالپ سنتی (SSA) برای بهبود سرعت و دقت همگرایی با استفاده از عمل‌گرهای روش دیفرانسیلی تکاملی (DE) بهبود یافته است. مسأله پیشنهادی با دو روش قطعی و روش مبتنی بر IGDT با راهبرد ریسک‌گریز بر روی شبکه توزیع ۳۳ شینه استاندارد IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که برای شبکه ۳۳ شینه برای توربین بادی با افزایش ۲۰٪ بودجه عدم قطعیت، بار شبکه ۷/۶۱٪ افزایش یافته و تولید توربین بادی به مقدار ۴۴/۰۶٪ کاهش یافته است. همچنین نسبت به حالت قطعی مقدار هزینه تلفات و هزینه قابلیت اطمینان به ترتیب ۲۰/۸۷ و ۴/۵۸ درصد افزایش یافته و سود مالی شبکه نیز ۶/۳۳٪ کاهش یافته است.

۱- مقدمه

می‌شود. در طراحی و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع، مسأله مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه^۲ این منابع برای رسیدن به حداکثر مزایای آن‌ها امری ضروری است بطوریکه مکان‌یابی نامناسب منابع تولید پراکنده در شبکه باعث افزایش تلفات و بالارفتن هزینه‌های تولید و انتقال انرژی می‌شود. بنابراین لازم است با روش‌های بهینه‌سازی، مکان و ظرفیت بهینه این منابع در شبکه توزیع تعیین گردد [۳]. با توجه به اینکه اساسی‌ترین هدف سیستم‌های قدرت تداوم تأمین انرژی الکتریکی ارزان قیمت و با کیفیت مطلوب است مهندسان باید از مفاهیم اساسی و بنیادی ارزیابی قابلیت اطمینان آگاه باشند، زیرا امروزه قانون در ایران و اکثر

قسمت اعظم تلفات الکتریکی، در شبکه‌های توزیع رخ می‌دهد. بنابراین یکی از مهمترین اهداف طراحان شبکه‌های توزیع کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش تلفات شبکه توزیع^۵ بکارگیری منابع تولید پراکنده می‌باشد [۲، ۱] ورود تولیدات پراکنده به صنعت برق باعث شده است بکارگیری تولیدات پراکنده، نیاز نصب فیدرهای جدید را در دوره‌های بعدی کاهش می‌دهد، ارتقا و یا نصب پست جدید را در دوره‌های بعدی به تعویق می‌اندازد که این مسأله منجر به کاهش هزینه تلفات و حتی باعث آزادسازی ظرفیت شبکه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: b.tousi@urmia.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده برق و کامپیوتر - دانشگاه ارومیه - ارومیه -

ایران

۲. دانشیار، دانشکده برق و کامپیوتر - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران

۳. دانشیار، دانشکده برق و کامپیوتر - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران

⁵ Distribution Network

⁶ Distribution Network Planning

⁷ Optimal Placement and Sizing Problem

سال‌های اخیر مورد استقبال پژوهش‌گران و بهره‌برداران سیستم قدرت برای ارزیابی پارامترهای غیرقطعی قرار گرفته‌است. روش IGDT، یک روش غیراحتمالاتی و غیرفازی برای کمیت‌سنجی عدم قطعیت است که پارامتر دارای عدم قطعیت به صورت فاصله میان آنچه که معلوم است (پیش‌بینی شده) و آنچه که ممکن است در واقعیت اتفاق افتد تعریف می‌شود. همچنین از روش IGDT برای تصمیم‌گیری‌های مقاوم در برابر عدم قطعیت‌های شدید استفاده می‌شود [۱۰، ۱۱]. هدف روش IGDT، تعیین حداکثر شعاع عدم قطعیت مجاز برای پارامترهای غیر قطعی مسأله با در نظر گرفتن اینکه تابع هدف مسأله توسط تصمیم‌گیر در محدوده مجاز قرار داشته باشد، است.

روش IGDT مجموعه عدم قطعیت غیرقطعی را که ممکن است دقیق نباشد دریافت می‌کند. سپس تلاش می‌کند تا عملکرد سیستم را در برابر پارامتر غیرقطعی مصون و ایمن کند و در عین حال نقطه کار را در محدوده ایمن حفظ کند. برخی اوقات، میزان عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی چنان شدید است که سیستم شاید نتواند ناپایداری‌های احتمالی ناشی از عدم قطعیت مذکور را تحمل کند. این یکی از ویژگی‌های IGDT برای تضمین این موضوع است که سیستم وارد ناحیه ریسک‌پذیری نمی‌شود. علاوه بر این روش IGDT، شامل دو راهبرد مصونیت، شامل مقاوم بودن و فرصت است. راهبردهای مصونیت را تصمیم‌گیران مربوطه می‌توانند برای مدل کردن عواید مثبت و منفی عدم قطعیت استفاده کنند. راهبرد مقاوم بودن معمولاً برای مدل کردن آثار منفی عدم قطعیت به کار رفته که در برابر آن سیستم باید مقاوم باشد. همین‌طور، کارکرد فرصت به منظور ارزیابی مزایای احتمالی قابل حصول از عدم قطعیت به کار می‌رود. روش IGDT در بین روش‌های دیگر، برخلاف روش مونت کارلو که از مهمترین روش‌ها است، نیازی به تابع چگالی احتمال برای پارامترهای غیرقطعی ندارد. همچنین روش IGDT، برخلاف روش مونت کارلو نیازی به مقدار زیادی داده برای مدل‌سازی عدم قطعیت ندارد. با استفاده از داده‌های موجود در مورد پارامتر عدم قطعیت، IGDT به بهره‌بردار در مورد نتایج مثبت و منفی که می‌تواند ناشی

کشورها، طراحان و سازندگان را مشمول خسارت‌های وارد بر مصرف‌کنندگان در اثر خرابی و عملکرد نامطلوب می‌داند. البته به دلایلی مانند معایب و خرابی‌های احتمالی در تجهیزات بکار رفته در سیستم، و نیز بروز خطاهای پیش‌بینی شده و پیش‌بینی نشده نمی‌توان انتظار داشت که همواره این انرژی در دسترس قرار گیرد از این رو ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت به صورت مقوله‌ای بسیار مهم مطرح می‌گردد [۴]. از طرفی با گسترش روزافزون میزان توان تولیدی توسط منابع تولید پراکنده فتوولتائیک و بادی، نوسان توان خروجی آنها چالشی بزرگ در راستای عملکردی ایمن و اقتصادی برای سیستم‌های قدرت ایجاد کرده است. اگرچه طبیعت نوسان توان به صورت اتفاقی می‌باشد [۵، ۶]، ولی مشخص کردن میزان عدم قطعیت، پیش‌بینی برای تصمیم‌گیری عاملان سیستم‌های قدرت امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. عدم قطعیت روی برنامه‌ریزی‌ها تأثیرگذار بوده و ممکن است چالش‌های جدیدی پیش روی تصمیم‌گیران قرار دهد. روش‌های مختلفی برای ارزیابی عدم قطعیت وجود دارد که برای پرداختن به پارامترهای غیرقطعی توسعه داده شده‌اند. روش‌های ارزیابی عدم قطعیت شامل بهینه‌سازی مقاوم (RO)^۱، تحلیل براساس فاصله (IA)^۲، روش احتمالاتی (PA)^۳، روش امکان‌پذیری (PM)^۴، روش‌های ترکیبی امکان‌پذیری-احتمالاتی (HPP)^۵ و نظریه تصمیم‌گیری شکاف اطلاعاتی (IGDT)^۶ می‌باشد [۷، ۸]. هدف اصلی این روش‌ها سنجش نفوذ پارامترهای ورودی غیرقطعی روی پارامترهای خروجی شبکه‌های توزیع است. یکی از مهمترین روش‌های مرسوم مدل‌سازی عدم قطعیت روش مونت کارلو است. روش مونت کارلو به داده‌هایی نیاز دارد که دارای توزیع احتمالی در بازه تغییرات داده‌ها باشد، این توزیع باید دارای میانگین و واریانس برابر با میانگین و واریانس داده‌های اصلی باشد. مقادیر به صورت کاملاً اتفاقی از توزیع احتمالی انتخاب و به ازای آنها عمل پیش‌بینی انجام می‌شود. علاوه بر این روش مونت کارلو روشی بسیار زمان‌بر است [۷، ۹]. روش IGDT، یکی از روش‌های بسیار مطلوب برای ارزیابی عدم قطعیت سیستم‌ها بوده که در

^۱ Possibility Method^۲ Hybrid Possibility – Probabilistic Approaches^۳ Info-Gap Decision Theory^۴ Robust Optimization^۵ Interval Analysis^۶ Probabilistic Approach

تخصیص بهینه منابع تولید پراکنده و بانک های خازنی جهت کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه های توزیع شعاعی استاندارد IEEE ۳۳ و ۶۹ شینه استفاده شده است. در [۱۸]، یک روش برای تعیین مکان بهینه منابع تجدیدپذیر بر اساس شاخص پایداری ولتاژ جدید با استفاده از الگوریتم PSO با هدف کاهش تلفات توان و پروفیل ولتاژ ارائه شده است. در [۱۹]، تجزیه و تحلیل مربوط به قابلیت اطمینان و مشخصات ولتاژ، با قرار دادن مطلوب DG با استفاده از الگوریتم (EMA) به عنوان ابزاری قدرتمند برای حل مسئله بهینه سازی استفاده شده است. به منظور استخراج نقطه بهینه جهانی، EMA از دو عملگر جستجو و دو عملگر جاذب بر اساس تولید اعداد تصادفی استفاده می کند. نتایج شبیه سازی نشان داده است که با قرار دادن بهینه و اندازه DG، تلفات توان کاهش یافته و مشخصات ولتاژ شبکه بهبود می یابد. در ادامه برخی از مطالعات انجام شده در بهره برداری شبکه های توزیع بر اساس منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی (با عدم قطعیت) ارائه شده است. در [۲۰]، روش بهینه سازی مقاوم برای برنامه ریزی سیستم های چندین ریزشبکه ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود در منابع تجدیدپذیر، مقادیر پیش بینی شده بار و قیمت های بازار به کار گرفته شده است. در [۲۱] یک بهینه سازی مقاوم با مدل بودجه غیرقطعی قابل تنظیم برای هماهنگ سازی قابلیت اطمینان و هزینه یک سیستم مقیاس بزرگ ترکیبی بادی/فتوولتائیک/آبی/برق حرارتی در طی دوره عدم قطعیت پیاده سازی شده تا قابلیت اطمینان سیستم بهبود یابد. در [۲۲]، مکان یابی بهینه منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر با استفاده از برنامه ریزی تکاملی (EP) با در نظر گرفتن عدم قطعیت های بار و منابع تولیدات پراکنده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده الگوریتم پیشنهادی به خوبی موجب بهبود پروفیل ولتاژ شده است و در نظر گرفتن عدم قطعیت موجب آگاهی دقیق و واقعی از کلیه احتمالات ممکن برای مشخصه ای شبکه می گردد. در [۲۳] از روش فازی و شبیه سازی مونت کارلو به صورت یک ابزار ترکیبی ارزیابی احتمالاتی-امکان پذیری

از عدم قطعیت باشد اطلاع رسانی می کند تا تصمیمات مناسب و منطقی که ممکن است ایمن یا همراه با ریسک باشد اتخاذ کند. علاوه بر این روش مونت کارلو روشی بسیار زمان بر بوده ولی روش IGDT روش سریعی است [۱۱، ۱۰].

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه تخصیص بهینه تولیدات پراکنده در شبکه های توزیع بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت صورت گرفته است. در [۱۲]، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات PSO^۱ مکان و ظرفیت قطعی توربین های بادی با هدف کاهش تلفات ارائه شده است. در [۱۳]، روش PSO برای یافتن پاسخ های نزدیک بهینه برای مسأله مکان یابی خازن در شبکه توزیع ۱۶ شینه IEEE مبتنی بر انرژی بادی به منظور کاهش تلفات توان و بهبود پروفیل ولتاژ با در نظر گرفتن تابع هزینه شامل هزینه تلفات توان، هزینه نصب خازن ارائه شده است. در [۱۴]، روش ترکیبی بهینه سازی نهنگ همراه با شینها از نظر حساسیت تلفات برای تعیین ظرفیت و مکان بهینه واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر در شبکه های توزیع شعاعی ۱۲، ۳۳، ۶۹ و ۸۵ شینه ارائه شده است. در این مطالعه، تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی شاخصهای فنی برای تلفات توان اکتیو، تغییرات ولتاژ بررسی شده است. بهینه سازی مکان و اندازه ترکیبی پنل های فتوولتائیک و توربین های بادی در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم شیرمورچه (ALO)^۲ در [۱۵] ارائه شده است. فاکتور حساسیت تلفات (LSF)^۳ برای نشان دادن شین های حساس از نظر تلفات ارائه شده است. در این مطالعه، با استفاده از این فاکتور منطقه جستجو و در نتیجه زمان فرآیند بهینه سازی کاهش می یابد. در [۱۶]، الگوریتم تکاملی چندهدفه بر اساس روش تصمیم گیری فازی تحت عنوان روش ترکیبی آموزش یادگیری-گرگ خاکستری (MOHTLBOGWO)^۴ برای جایابی بهینه پنل های خورشیدی و توربین های بادی در شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان بر اساس انرژی تأمین نشده مشترکین (ENS)^۵ (انرژی تأمین نشده مشترکین شبکه در اثر خروج خطوط شبکه) استفاده نموده است. در [۱۷]، از الگوریتم اجتماع سالپ جهت

^۵ Energy Not Supplied

^۶ Evolutionary programming

^۱ Particle Swarm Optimization

^۲ Ant Lion Optimizer

^۳ Loss Sensitivity Factor

^۴ Multi-Objective Hybrid Teaching Learning Based Optimization Grey Wolf Optimizer

سناریوها دور از واقعیت است. بنابراین روش‌های تصادفی نظیر مونت کارلو در مقایسه با روش IGDT قادر به ارائه مطمئن هزینه کل مسأله تخصیص بهینه منابع نمی‌باشند در صورتی که روش IGDT به راحتی این هزینه را بدست آورده است.

در ابتدا مسأله پیشنهادی بصورت قطعی پیاده‌سازی شده و سپس با در نظر گرفتن عدم قطعیت با استفاده از روش IGDT نیز حل شده و نتایج ارزیابی شده است. در این مقاله از روش فرااکتشافی اجتماع سالپ [۲۸، ۲۹] بهبودیافته براساس عمل‌گرهای جهش و کراس آور الگوریتم دیفرانسیلی تکاملی (ISSO) برای حل بهینه‌سازی مسأله و تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری شامل تعیین مکان و ظرفیت بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر فتوولتائیک و بادی در شبکه استفاده شده و عملکرد آن در حل مسأله قطعی با مطالعات پیشین مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است. در حل مسأله جایابی بصورت قطعی، پس از تعیین بهینه مکان و ظرفیت بهینه منابع تجدیدپذیر در شبکه توزیع نتایج مسأله شامل مقادیر تلفات توان اکتیو، حداقل ولتاژ شبکه، مقدار هزینه تلفات توان، مقدار انرژی تأمین نشده مشترکین شبکه، هزینه بهبود قابلیت اطمینان شبکه و همچنین سود مالی ناشی از کاهش تلفات شبکه قبل و پس از بهینه‌سازی مقایسه شده است علاوه بر این مسأله پیشنهادی با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی تولید منابع تجدیدپذیر و بار شبکه با استفاده از روش IGDT برای جایابی منابع تجدیدپذیر بر روی شبکه توزیع ۳۳ پیاده‌سازی شده است. در حل مسأله در روش IGDT مبتنی بر راهبرد ریسک‌گریزی، ماکزیمم شعاع عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر و بار شبکه به ازای بودجه عدم قطعیت معین به همراه ظرفیت و مکان بهینه منابع با استفاده از روش ISSA تعیین شده است. علاوه بر این نتایج حل مسأله بصورت قطعی و IGDT از نظر هزینه تلفات و قابلیت اطمینان و همچنین سود مالی شبکه مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است. بنابراین استفاده از روش IGDT برای حل مسأله جایابی پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی در بهره‌برداری شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن هدف کمینه‌سازی هزینه تلفات توان و هزینه بهبود قابلیت اطمینان به همراه استفاده از یک روش فرا-اکتشافی جدید بهینه‌سازی

برای بررسی اثر تولید توان غیرقطعی منابع تجدیدپذیر روی تلفات توان اکتیو شبکه‌های توزیع استفاده شده است. در [۲۴]، طراحی بهینه شبکه توزیع اکتیو با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید پراکنده بادی با استفاده از الگوریتم ترکیبی تابو-اجتماع ذرات مورد بررسی قرار گرفته است. هدف مطالعه تعیین مکان و ظرفیت بهینه باتری‌ها با کمینه‌سازی هزینه و در نظر گرفتن قیود فنی است. در [۲۵]، روشی برای کنترل پیشگیرانه/اصلاحی ولتاژ در سیستم‌های قدرت هوشمند ارائه شده است. یک روش مقاوم مبتنی بر روش IGDT برای لحاظ عدم قطعیت به کار می‌رود که از راهبردهای ریسک‌گریزی و جستجوگر فرصت استفاده -نموده است. نتایج این روش انعطاف‌پذیری جهت انتخاب درجه مقاوم بودن را با در نظر گرفتن بودجه مطلوب عدم قطعیت بدست آورده است. در [۲۶]، یک مشارکت واحد مبتنی بر قابلیت اطمینان حل شده و سپس بر اساس روش IGDT، نتایج برای تسویه بازار رزرو در حضور بارهای پاسخ‌گوی غیرقطعی به کار رفته است. با استفاده از این روش، بهره‌بردار سیستم می‌تواند بر اساس سطح ریسک مطلوب و با در نظر گرفتن عدم قطعیت سمت تقاضا، بهترین راهبرد را انتخاب کند. در [۲۷]، روش IGDT، برای برنامه‌ریزی مقاوم ساختمان هوشمند آپارتمانی در حضور عدم قطعیت قیمت ارائه شده است. بنابراین، بهره‌برداران خانه هوشمند آپارتمانی، که به عنوان بارهای مقیاس کوچک تلقی می‌شوند، می‌توانند از نظریه نامبرده برای اتخاذ تصمیمات مطلع‌تری در برابر عدم قطعیت قیمت استفاده کنند.

در این مقاله جایابی بهینه پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی در شبکه توزیع با هدف کاهش هزینه تلفات توان اکتیو و هزینه بهبود قابلیت اطمینان براساس انرژی تأمین نشده مشترکین (ENS) با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضای بار و تولید منابع تجدیدپذیر براساس روش IGDT ارائه شده است. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت با استفاده از IGDT برخلاف روش‌های قطعی با پارامترهای قطعی، باعث می‌شود بهره‌بردار در برابر تغییرات احتمالی بار و تولید، تصمیمات مناسبی اتخاذ کند. در روش‌های احتمالاتی نیاز به تابع چگالی احتمال ورودی‌های مسأله و تعریف سناریو می‌باشد که دقت این روش‌های تصادفی به تعریف سناریوهای واقعی بستگی داشته در حالیکه بعضی از

^۱ Improved Salp Swarm Optimization

۲-۱-۲- قابلیت اطمینان

شاخص‌های قابلیت اطمینان، فاکتورهای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم توزیع می‌باشند که برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط IEEE بطور ویژه برای ارزیابی سیستم توزیع ارائه گردیده‌است. براساس شاخص‌های پایه‌ای نقطه بار و مصرف انرژی در نقاط بار انرژی تأمین نشده ENS (kWh/year) بصورت زیر محاسبه می‌شود [۴, ۱۶].

$$ENS = \sum_{i=1}^{N_d} \lambda_{a(i)} \times U_i \quad (5)$$

در رابطه فوق، N_d بیانگر تعداد کل نقاط بار، U_i عدم دسترس‌پذیری نقطه بار i (hours/year) و $\lambda_{a(i)}$ متوسط بار متصل‌شده در نقطه بار i (KW) است. مقدار C_{ENS} هزینه انرژی تأمین‌نشده مشترکین بصورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$C_{ENS} = K_{ENS} \cdot ENS \cdot T_S \quad (6)$$

در رابطه فوق K_{ENS} بیانگر هزینه هر kWh انرژی تأمین نشده مشترکین است.

۲-۲- قیود مسأله

قیود مساوی و نامساوی برای بهینه‌سازی تابع هدف بصورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۵]:

۲-۲-۱- قیود مساوی

قیود مساوی شامل مجموعه معادلات تعادل توان می‌باشد. جمع جبری توان ورودی و خروجی در سیستم توزیع با در نظر گرفتن تلفات باید برابر باشد، بدین ترتیب که:

$$P_{Swing} + \sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG}(i) = \sum_{i=1}^{N_b} P_{Loss}(i) + \sum_{i=1}^{N_d} P_d(i) \quad (7)$$

$$Q_{Swing} + \sum_{i=1}^{N_{DG}} Q_{DG}(i) = \sum_{i=1}^{N_b} Q_{Loss}(i) + \sum_{i=1}^{N_d} Q_d(i) \quad (8)$$

P_{Swing} و Q_{Swing} توان‌های اکتیو و راکتیو شین اسلک، P_{DG} و Q_{DG} به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده نصب شده، P_{Loss} و Q_{Loss} تلفات اکتیو و راکتیو خطوط، P_d و Q_d دیمانده توان‌های اکتیو و راکتیو شین i ام می‌باشد. N_{DG} ، N_b و N_d به ترتیب تعداد واحدهای تولید پراکنده، تعداد خطوط و تعداد مصارف می‌باشند.

(ISSA) مبتنی بر عمل‌گرهای روش (DE^۱) از نوآوری‌های این مقاله می‌باشند.

۲- فرمول‌بندی مسأله

در این مقاله تابع هدف مسأله، تعیین مکان و ظرفیت بهینه پنل خورشیدی و توربین بادی شبکه به صورت کمینه‌سازی هزینه تلفات توان اکتیو و هزینه بهبود قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده‌است.

۲-۱- تابع هدف

تابع هدف مسأله شامل هزینه‌های تلفات توان و هزینه قابلیت اطمینان به صورت زیر ارائه شده‌است:

$$C_{Total} = C_{Loss} + C_{ENS} \quad (1)$$

که C_{Loss} و C_{ENS} به ترتیب هزینه تلفات توان و هزینه قابلیت اطمینان بار شبکه بر حسب دلار است و C_{Total} هزینه کل و مجموع این دو هزینه است.

پس از محاسبه هزینه کل در تمامی حالات شبیه‌سازی، سود مالی برابر تفاضل هزینه حالت‌های پیشنهادی با هزینه حالت پایه (بدون تخصیص DG) می‌باشد.

۲-۱-۱- تلفات توان

تلفات توان کل شبکه برابر است با تلفات تمام خطوط شبکه. برای محاسبه تلفات شبکه ابتدا باید جریان خطوط را بدست آورد. برای محاسبه جریان خطوط نیز، نیاز به حل مسئله پخش بار و بدست آوردن ولتاژ شین‌ها است. با محاسبه ولتاژ شین‌ها جریان خطوط و تلفات شبکه بصورت زیر محاسبه می‌شود [۱۶].

$$I_k = \frac{V_i - V_j}{R_k + jX_k} \quad (2)$$

$$P_{Loss} = \sum_{k=1}^{N_b} R_k I_k^2 \quad (3)$$

$$C_{Loss} = K_{Loss} \cdot P_{Loss} \cdot T_S \quad (4)$$

که، خط k بین شین‌های i و j قرار دارد. R_k و X_k مقاومت و راکتانس خط k ام و N_b تعداد خطوط شبکه می‌باشد. C_{Loss} بیانگر هزینه تلفات اکتیو شبکه است که از حاصلضرب مقدار تلفات شبکه در K_{Loss} هزینه هر کیلووات و T_S دوره مطالعه یک‌ساله یعنی ۸۷۶۰ ساعت بدست می‌آید.

^۱ Differential Evolution

۲-۲-۲- قیود نامساوی

• قیود ولتاژ

مقدار ولتاژ در هر یک از شین‌ها می‌بایستی بین یک مقدار مینیمم و ماکزیمم بصورت زیر باشد:

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad (9)$$

در رابطه فوق V_{\min} و V_{\max} حدود پایین و بالای ولتاژ به ترتیب ۰/۹۵ و ۱/۰۵ پریونیت در نظر گرفته شده‌اند.

• قید محدوده تولید DG

برای جلوگیری از جریان توان معکوس، ظرفیت نصب شده DG در شبکه بصورت زیر محدود شده است به طوری که نباید بیش از قدرت عرضه شده توسط پست باشد:

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} P_{DG}(i) \leq \frac{3}{4} \left[\sum_{i=1}^{N_b} P_{Loss}(i) + \sum_{i=1}^{N_d} P_d(i) \right] \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} Q_{DG}(i) \leq \frac{3}{4} \left[\sum_{i=1}^{N_b} Q_{Loss}(i) + \sum_{i=1}^{N_d} Q_d(i) \right] \quad (11)$$

از طرفی DGها نیز خود دارای مینیمم و ماکزیمم ظرفیت تولید بصورت زیر می‌باشند:

$$P_{DG}^{\min} \leq P_{DG}(i) \leq P_{DG}^{\max} \quad (12)$$

$$Q_{DG}^{\min} \leq Q_{DG}(i) \leq Q_{DG}^{\max} \quad (13)$$

• قید ظرفیت خط:

توان مختلط عبوری از هر خط باید از مقدار نامی آن که در رابطه زیر داده شده است، کمتر باشد.

$$S_{Li} \leq S_{Li}^{rated} \quad (14)$$

در این روابط Q_{DG}^{\max} و Q_{DG}^{\min} ، P_{DG}^{\max} ، P_{DG}^{\min} حد پایین تولید توان اکتیو، حد بالای تولید توان اکتیو، حد پایین تولید توان راکتیو و حد بالای تولید توان راکتیو واحدهای تولید پراکنده می‌باشد. همچنین S_{Li} توان عبوری از خط و S_{Li}^{rated} مقدار نامی آن می‌باشد.

۳- معرفی روش ISSA

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع سالپ توسط میر جلیلی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با توجه به رفتار اجتماعی سالپ‌ها ارائه شده است [۲۹-۳۰].

سالپ‌ها بدن شفاف و لوله‌ای شکل دارند و بافت بدن آن‌ها

بسیار مشابه ژله ماهی بوده که آب از طریق بدن آن پمپ می‌شود تا نیروی رانش به سمت جلو فراهم شود. در مدل‌سازی الگوریتم اجتماع سالپ از رفتار اجتماعی و زنجیروار آن‌ها برای جنبش و حرکت بهتر با استفاده از تغییرات سریع هماهنگ و تعقیب غذا الهام گرفته شده است. برای مدل‌سازی ریاضی زنجیره‌های سالپ، ابتدا جمعیت به دو گروه تقسیم می‌شود: رهبر^۱ و پیروان^۲. رهبر گروه همان سالپ جلوی زنجیره است، و سایر سالپ‌ها به‌عنوان پیرو در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که از نام این سالپ‌ها هم مشخص است، رهبر در واقع گروه را هدایت و رهبری می‌کند و پیروان از همدیگر (و به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم از رهبر) پیروی می‌کنند. مشابه سایر روش‌های جمعی، موقعیت سالپ‌ها در یک فضای جستجوی n بعدی تعریف می‌شود که در آن n تعداد متغیرهای یک مسئله مشخص است. بنابراین، موقعیت همه سالپ‌ها در یک ماتریس دوبعدی موسوم به x ذخیره می‌شود. همچنین فرض می‌شود که یک منبع غذایی موسوم به F در فضای جستجو به‌عنوان هدف جمع وجود دارد.

برای به‌روزرسانی موقعیت رهبر، روابط زیر به کار می‌رود [۳۱]:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1 \alpha & c_3 \geq 0.5 \\ F_j - c_1 \alpha & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

$$\alpha = [c_2 (ub_j - lb_j) + lb_j] \quad (16)$$

که x_j^1 نشان‌دهنده موقعیت اولین سالپ (رهبر) در بعد j -ام است، F_j موقعیت منبع غذایی در بعد j ام بوده، ub_j نشان‌دهنده کران بالای بعد j ام است، lb_j نشان‌دهنده کران پایین بعد j ام بوده، c_1 ، c_2 و c_3 اعداد تصادفی هستند.

رابطه (۱۵) نشان می‌دهد که رهبر فقط موقعیت خود را نسبت به منبع غذایی به‌روزرسانی می‌کند. ضریب c_1 مهم‌ترین پارامتر در الگوریتم SSA است چون کشف و بهره‌برداری از آن را به‌صورت ذیل متعادل می‌کند [۳۱]:

$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4l}{L}\right)^2} \quad (17)$$

که l تکرار کنونی بوده و L حداکثر تعداد تکرارها است.

² Followers

¹ Leaders

از افزایش تابع هدف، به دست آید. استراتژی ریسک گریز تابع هدف را در برابر امکان خطا در پیش‌بینی پارامتر غیرقطعی ورودی مقاوم می‌سازد. مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری باید به گونه‌ای تعیین شود که تابع هدف واقعی یعنی تابع هدف بدست آمده از مسأله قطعی در برابر انحراف پارامتر غیرقطعی γ نسبت به مقدار پیش‌بینی شده $\bar{\gamma}$ بصورت بهینه محاسبه شود. زمانی که تابع هدف در برابر حداکثر شعاع عدم قطعیت ایمن‌سازی شود، تصمیم‌گیری مقاوم بدست می‌آید.

به بیانی دیگر تصمیم‌گیرنده مطمئن خواهد بود به ازای تغییرات پارامتر غیرقطعی در محدوده شعاع عدم قطعیت بدست آمده، مقدار تابع هدف از حد مجازی که برای تعیین شعاع عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی در نظر گرفته شده است تجاوز نخواهد کرد. روابط ریاضی توصیف کننده این استراتژی بصورت زیر است:

$$\mathcal{R}_C = \max_{X, \alpha} \alpha \quad (20)$$

$$H_i(X, \bar{\gamma}) \leq 0, \quad \forall i \in \Omega_I \quad (21)$$

$$G_i(X, \bar{\gamma}) = 0, \quad \forall i \in \Omega_E \quad (22)$$

$$f(X, \gamma) \leq \Delta_C \quad (23)$$

$$\Delta_C = f_b(X, \gamma) \cdot (1 + \beta), \quad \gamma \in \Gamma \quad (24)$$

$$\left| \frac{\gamma - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} \right| \leq \alpha \quad (25)$$

$$0 \leq \beta \leq 1 \quad (26)$$

که Δ_C مقدار بحرانی تابع هدف (حداکثر مقدار مجاز افزایش تابع هدف نسب به مقدار پایه) است که غالباً توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌گردد. این مقدار تابعی از مقدار پایه تابع هدف تعریف می‌شود. \mathcal{R}_C که همان شعاع عدم قطعیت پارامتر غیر قطعی مسأله است یک متغیر مثبت است. پارامتر β نیز همان درجه تحمل افزایش تابع هدف نسب به مقدار پایه به دلیل عدم قطعیت‌های نامطلوب تعریف شده است که مقدار آن توسط تصمیم‌گیرنده مشخص می‌شود. در مدل ارائه شده حداکثر شعاع عدم

پارامترهای c_2 و c_3 اعداد تصادفی هستند که به صورت یکنواخت در فاصله $[0, 1]$ تولید می‌شوند.

برای به‌روزرسانی موقعیت پیروان، روابط زیر به کار گرفته می‌شوند (قانون حرکت نیوتن) [۳۱]:

$$x_j^i = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t \quad (18)$$

که x_j^i و $i \geq 2$ نشان‌دهنده موقعیت سالپ پیرو نام در بعد i ام، t زمان، v_0 سرعت اولیه است. چون زمان در بهینه‌سازی همان تکرار است، اختلاف میان تکرارها برابر یک است، و با در نظر گرفتن $v_0 = 0$ این معادله را می‌توان به صورت زیر نوشت [۳۱]:

$$x_j^i = \frac{1}{2} (x_j^i + x_j^{i-1}) \quad (19)$$

در این مطالعه از عمل‌گرهای تزویج و جهش روش DE [۳۲]، [۳۳] برای بهبود عملکرد روش SSA^۱ استفاده شده است. روش SSA از قابلیت مطلوبی برای تعادل بین اکتشاف و استخراج برخوردار بوده بگونه‌ای که فضای جستجو را اکتشاف نموده و نواحی قابل قبول را که دارای جواب مطلوب می‌باشد استخراج می‌نماید. با این وجود روش SSA در مسائل بهینه‌سازی‌های با مقیاس بزرگتر ممکن است قادر به دستیابی سریع به همگرایی نبوده و در بهینه محلی گرفتار شود به همین دلیل روش SSA بهبود یافته (ISSA) ارائه شده است. روش ISSA جهت غلبه بر برخی از چالش‌های پیش روی روش‌های بهینه‌سازی در شرایط افزایش ابعاد مسأله و همچنین برای دستیابی به همگرایی سریعتر ارائه شده است. بنابراین روش ISSA با هدف تضمین پوشش مناسب فضای جستجوی مربوط به محدوده متغیرهای بهینه‌سازی و همچنین رسیدن به یک همگرایی مطلوب بهینه سراسری ارائه شده است.

۳-۱- مراحل پیاده‌سازی مسأله

در این پژوهش از روش IGDT با راهبرد ریسک گریز (IRA) استفاده شده بگونه‌ای که عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی اثر نامطلوبی بر روی تابع هدف مسئله دارد [۳۴]. بدین معنا که مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری به گونه‌ای تعیین می‌شوند که حداکثر شعاع عدم قطعیت ممکن برای پارامتر غیرقطعی به ازای یک مقدار مشخصی

^۱ ϵ
^۲ Risk Aversion

- محاسبه حداکثر شعاع عدم قطعیت در تولید توان بادی α_{WT}
- بلوک دیاگرام پیاده‌سازی تخصیص بهینه منابع تجدیدپذیر فتوولتائیک و بادی در شبکه‌های توزیع بدون در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی و با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) نشان داده شده است. مراحل پیاده‌سازی روش ISSA در حل مسأله بصورت قطعی در زیر ارائه شده است:

- مرحله ۱- اعمال اطلاعات شبکه‌های توزیع شامل داده های مقاومت اهمی و راکتانس خطوط شبکه و اطلاعات بار اکتیو و راکتیو باس های شبکه و وارد کردن ظرفیت مینیمم و ماکزیمم پنل خورشیدی و توربین بادی

- مرحله ۲- تعیین تعداد جمعیت الگوریتم ISSA و همچنین حداکثر تکرار الگوریتم

- مرحله ۳- تولید تصادفی جمعیت اولیه از مجموعه متغیرهای بهینه سازی شامل محل نصب پنل فتوولتائیک و توربین بادی، ظرفیت توان تولیدی و ضریب قدرت

- مرحله ۴- اجرای پخش بار پسر-پیشرو به ازای مجموعه متغیرهای مرحله ۳

- مرحله ۵- محاسبه مقدار تابع هدف C_{Total} برای هر مجموعه از متغیرها با رعایت قواعد بهره برداری، ظرفیت منابع و انتخاب بهترین مجموعه از نظر مقدار تابع هدف (کمترین هزینه) به عنوان نماینده کل جمعیت

- مرحله ۶- بروز رسانی هر کدام از مجموعه متغیرها توسط الگوریتم ISSA

- مرحله ۷- محاسبه مقدار تابع هدف C_{Total} برای هر مجموعه از متغیرها با رعایت قواعد بهره برداری، ظرفیت منابع و جایگزینی با مجموعه قبل در صورتیکه متغیرهای جدید دارای نتایج بهتری (مقدار بهتر تابع هدف) باشند.

- مرحله ۸- پیاده‌سازی اپراتورهای روش DE به ازای جمعیت الگوریتم. در این گام اپراتورهای جهش و تقاطع روش DE برای هر یک از اعضای جمعیت الگوریتم ISSA، برای بهبود عملکرد آن شامل جلوگیری از به دام افتادن در بهینه محلی و دستیابی

قطعیت \mathfrak{R}_C به گونه‌ای تعیین می‌شود که به ازای تغییرات

پارامتر غیرقطعی γ مطابق رابطه $\left| \frac{\gamma - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} \right| \leq \alpha$ مقدار تابع هدف از محدوده مجاز تعیین شده در رابطه $f(X, \gamma) \leq \Delta_C$ تجاوز نکند.

مقدار پایه تابع همان هزینه C_{Total} (رابطه (۱)) با در نظر گرفتن پارامترهای قطعی است. در این مقاله پارامترهای بار و تولید منابع تجدیدپذیر برخلاف روش قطعی بصورت غیرقطعی با در نظر گرفتن عدم قطعیت لحاظ گرفته شده است بگونه‌ای که براساس راهبرد ریسک گریز افزایش بار و کاهش تولید منابع که منجر به افزایش C_{Total} می‌گردد موجب اثر منفی بر روی تابع هدف می‌گردد. بنابراین در این مطالعه سه پارامتر غیر قطعی بار شبکه α_{Load} ، توان فتوولتائیک α_{PV} و توان بادی α_{WT} در نظر گرفته شده است. لذا بر این اساس مسأله ارائه شده به همراه تقاضای بار هر شین، توان تولیدی پنل‌های فتوولتائیک و توان خروجی توربین‌های بادی در شین مورد نظر بصورت زیر تعریف شده است:

$$\max_{DV} \alpha_{Load}, \alpha_{PV}, \alpha_{WT} \quad (27)$$

$$C_{Total-IGDT} \leq C_{Total} \cdot (1 + \beta) \quad (28)$$

$$P_{Load} = \bar{P}_{load} \cdot (1 + \alpha_{Load}) \quad (29)$$

$$P_{PV} = \bar{P}_{PV} \cdot (1 - \alpha_{PV}) \quad (30)$$

$$P_{WT} = \bar{P}_{WT} \cdot (1 - \alpha_{WT}) \quad (31)$$

روال حل مسأله براساس روش IGDT بدین صورت است که بایستی مقادیر ماکزیمم شعاع عدم قطعیت‌های α_{Load} ، α_{PV} و α_{WT} به ازای افزایش معین یعنی بودجه عدم قطعیت β بصورت بهینه با استفاده از روش ISSA تعیین می‌گردد. بعبارتی در حل مسأله براساس IGDT، پارامترهای زیر بصورت بهینه توسط روش ISSA تعیین می‌گردد.

- محاسبه حداکثر شعاع عدم قطعیت در تقاضای بار شبکه α_{Load}
- محاسبه حداکثر شعاع عدم قطعیت در تولید توان فتوولتائیک α_{PV}

متغیرهای تصمیم‌گیری به گونه‌ای تعیین می‌شوند که حداکثر شعاع عدم قطعیت ممکن برای پارامتر غیرقطعی به ازای یک مقدار مشخصی از افزایش تابع هدف، به دست آید که در این مقاله مقدار افزایش تابع هزینه ۲۰ درصد لحاظ شده است. که عواملی که می‌تواند باعث افزایش هزینه گردد کاهش تولید پنل، توربین و افزایش بار می‌باشد که با توجه به روابط ذکر شده در مقاله مقدار توان بار اضافه شده ولی مقادیر توان پنل و توربین منها شده تا باعث افزایش تابع هزینه شود چون بدترین حالت که باعث افزایش تلفات و هزینه قابلیت اطمینان می‌شود کاهش تولید منابع و افزایش بار است.

شبیه‌سازی‌ها در دو سناریو به روش قطعی توسط روش ISSA انجام شده است. منحنی همگرایی روش ISSA در حل هر دو سناریو در شکل (۳) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تخصیص بهینه توربین بادی، مقدار هزینه تلفات و هزینه قابلیت اطمینان کمتری را بدست آورده است. علاوه بر این قابلیت روش ISSA در مقایسه با روش SSA با ارائه منحنی‌های همگرایی طبق شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده که بیانگر برتری روش ISSA در دستیابی به جواب بهینه با تلورانس همگرایی کمتر و با سرعت همگرایی بیشتر در تکرار کمتر بوده است.



شکل ۱-الف - بلوک دیاگرام حل مسأله براساس روش قطعی

دقیق به بهینه سراسری استفاده می‌شوند. در این گام بهترین مقدار جواب در صورتی که بهتر از مقدار بدست آمده در گام ۷ باشد جایگزین می‌شود.

- مرحله ۹- بررسی احراز شرایط همگرایی (با شرط دستیابی به کمترین هزینه و اجرای حداکثر تکرار الگوریتم ISSA). در صورت مثبت بودن به مرحله ۱۰ رفته و در غیر اینصورت به مرحله ۶ می‌رویم.
- مرحله ۱۰- توقف الگوریتم و ذخیره بهترین مجموعه متغیر شامل مکان نصب، ظرفیت و ضریب قدرت بهینه پنل فتوولتائیک و توربین بادی

۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

در این بخش نتایج شبیه‌سازی جایابی بهینه پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی در شبکه‌های توزیع شعاعی با هدف کاهش هزینه تلفات توان و هزینه بهبود قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و تولید با استفاده از روش IGDT ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی ابتدا بصورت قطعی با استفاده از روش‌های SSA و ISSA ارائه شده و سپس نتایج شبیه‌سازی با لحاظ عدم قطعیت براساس روش IGDT با در نظر گرفتن بودجه عدم قطعیت ۲۰٪ $\beta = 20\%$ ارائه شده است. روش پیشنهادی در محیط MATLAB بر روی سیستم ۳۳ شینه استاندارد IEEE پیاده‌سازی شده است. قابلیت روش پیشنهادی با روش SSA سنتی و همچنین مطالعات پیشین ارزیابی شده است.

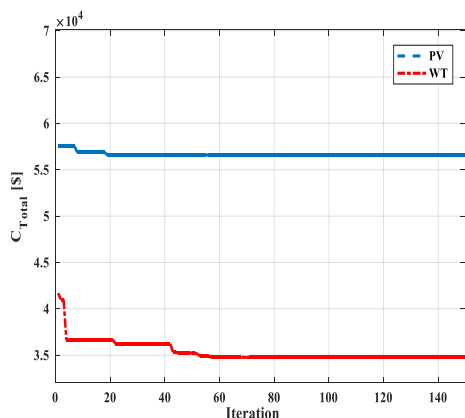
۴-۱- سیستم توزیع ۳۳ شینه

دیاگرام تک‌خطی شبکه توزیع شعاعی ۳۳ شینه در شکل (۲) نشان داده شده است. این شبکه دارای ۱ فیدر اصلی و ۳ زیرشاخه است. در شبکه ۳۳ شینه، مجموع بار مصرفی این شبکه برابر ۳۷۲۰ کیلو وات و ۲۳۰۰ کیلووار می‌باشد. شبکه ۳۳ شینه دارای ۳۲ شاخه است. اطلاعات سیستم در مرجع [۳۵] ارائه شده است.

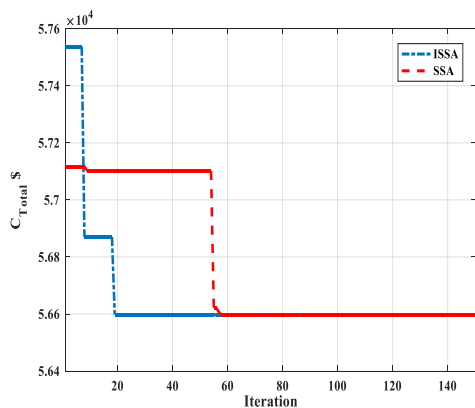
۴-۲- نتایج روش‌های قطعی و IGDT

ابتدا مقدار هزینه کل که شامل هزینه تلفات و هزینه قابلیت اطمینان است در حالت قطعی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ISSA حل شده و مقدار هزینه کل و پایه بدست می‌آید. از روش IGDT با راهبرد ریسک‌گریز استفاده شده گونه‌ای که عدم قطعیت پارامتر غیرقطعی اثر نامطلوبی بر روی تابع هدف مسئله دارد. بدین معنا که مقادیر بهینه

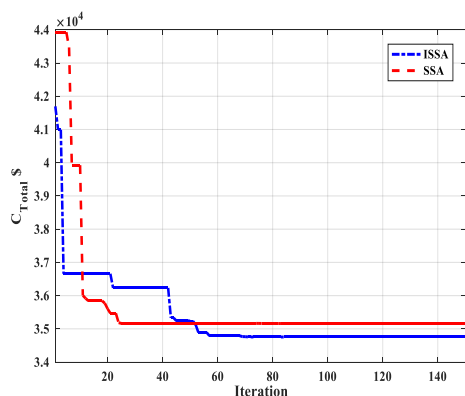
در شکل (۶) و (۷) پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ شینه به ترتیب برای پنل خورشیدی و توربین بادی براساس SSA, ISSA در مقایسه با حالت پایه شبکه نشان داده شده است. همچنین سناریوی تخصیص بهینه توربین بادی دارای کمترین افت ولتاژ در شبکه با توجه به شکل (۸) می باشد که این شکل پروفیل ولتاژ شبکه در سه حالت پایه بدون منبع تولید پراکنده، پنل خورشیدی و توربین بادی می باشد.



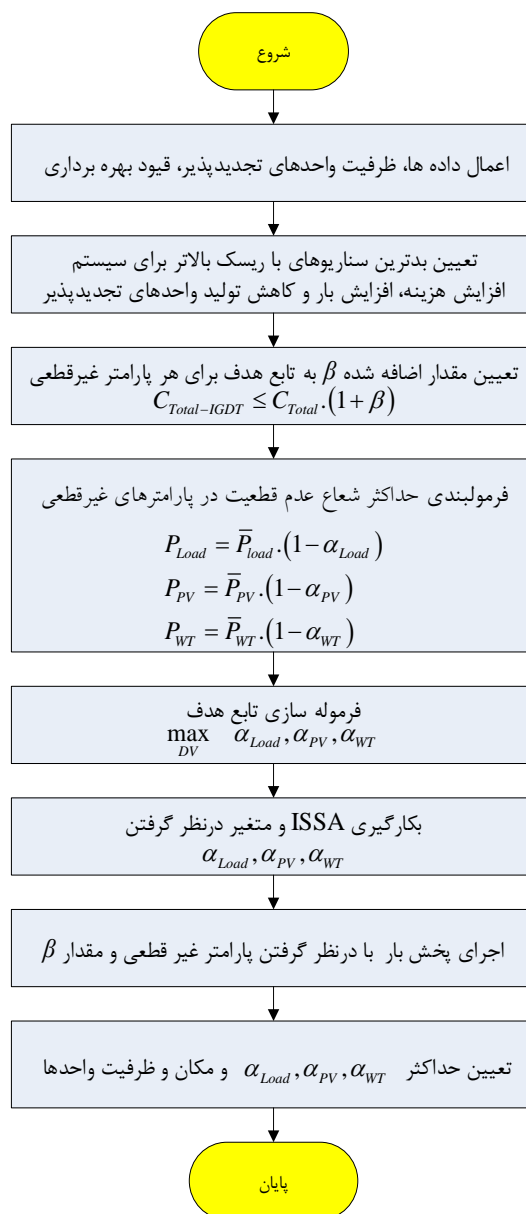
شکل ۳- منحنی همگرایی تابع هدف (هزینه کل) روش ISSA



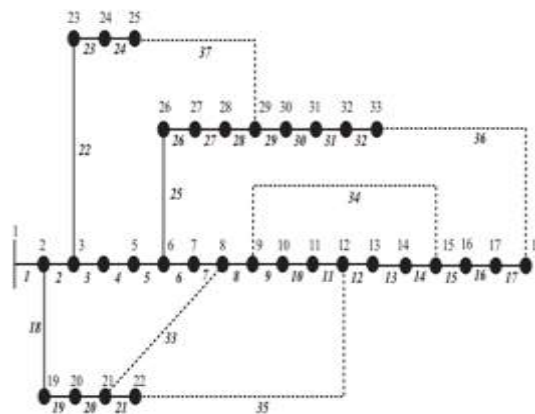
شکل ۴- منحنی همگرایی روش‌های ISSA و SSA برای پنل خورشیدی



شکل ۵- منحنی همگرایی روش‌های ISSA و SSA برای توربین بادی



شکل ۱-ب- بلوک دیاگرام حل مسأله براساس روش IGDT با در نظر گرفتن عدم قطعیت



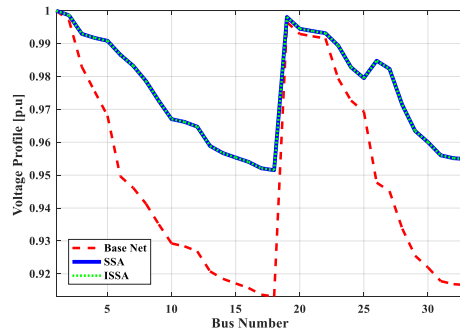
شکل ۲- شبکه ۳۳ شینه IEEE شعاعی

این مقادیر ذکر شده افزایش بار است. علاوه بر این ماکزیمم شعاع عدم قطعیت تولید برای پنل خورشیدی ۳۴/۷۶ و برای توربین بادی ۴۴/۰۶ درصد بدست آمده است. به عبارتی مقدار بودجه عدم قطعیت ۰.۲٪، کاهش تولید به اندازه مقادیر ذکر شده (ماکزیمم شعاع عدم قطعیت تولید) را پوشش می‌دهد.

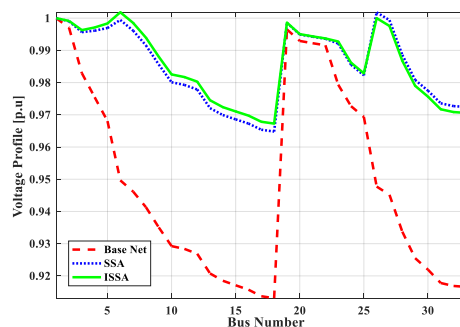
جدول ۱- ماکزیمم شعاع عدم قطعیت بار و تولید واحدهای تجدیدپذیر با روش IGDT و $\sigma = 20\%$

منبع تجدیدپذیر / شعاع عدم قطعیت	پنل فتو ولتائیک	توربین بادی
α_{Load}	۰/۰۵۳۳	۰/۰۷۶۱
α_{PV}	۰/۳۴۷۶	--
α_{WT}	--	۰/۴۴۰۶

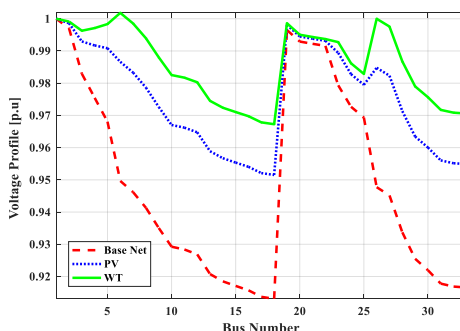
نتایج عددی شبیه‌سازی در دو روش قطعی براساس الگوریتم‌های SSA و ISSA و روش IGDT با لحاظ $\beta = 20\%$ با استفاده از الگوریتم ISSA در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج بدست‌آمده به روش قطعی نشان می‌دهد که عملکرد روش ISSA در تخصیص پنل همانند روش SSA بوده و در تخصیص توربین بهتر بوده به عبارتی هزینه تلفات و هزینه قابلیت اطمینان کمتری را بدست آورده است. روش ISSA، ظرفیت، مکان نصب و ضریب قدرت بهینه توربین را به ترتیب برابر ۲۴۴۵ کیلووات، شین ۲۶ و ۰/۸۲۳۴ تعیین نموده است. تخصیص بهینه توربین بادی موجب شده که تلفات توان شبکه از مقدار ۲۰۲/۶۸ کیلووات به ۶۲/۴۸ کیلووات، ENS از مقدار ۶۴۴۷ کیلووات ساعت به مقدار ۳۸۲۴/۷۷ کیلووات ساعت، هزینه تلفات از مقدار ۱۰۶۵۲۸/۲۶ دلار به ۳۲۸۴۲/۵۷ دلار، هزینه ENS از مقدار ۳۲۲۳/۵۱ دلار به مقدار ۱۹۱۲/۳۸ دلار کاهش یابد. علاوه بر این هزینه کل از مقدار ۱۰۹۷۵۱/۷۷ دلار به ۳۴۹۹۶/۸۱ دلار کاسته شده که برای شبکه ۳۳ شینه مقدار ۷۴۹۹۶/۸۱ دلار یعنی معادل ۶۸/۳۳ درصد سود یا صرفه‌جویی مالی داشته است. همچنین تخصیص بهینه پنل خورشیدی با سود مالی ۴۸/۴۳ درصد می‌باشد. بکارگیری توربین بادی به دلیل تزریق توان راکتیو علاوه بر توان اکتیو، موجب کاهش بیشتر هزینه شده و سود مالی بیشتری را بدست آورده است. در روش IGDT بودجه عدم قطعیت به مقدار ۰.۲٪ افزایش یافته و به‌ازای آن مقادیر ماکزیمم شعاع عدم قطعیت بار شبکه و تولید منابع تجدیدپذیر بصورت بهینه براساس ISSA طبق جدول ۱، تعیین شده اند.



شکل ۶- پروفیل ولتاژ شبکه (پنل خورشیدی) براساس ISSA، SSA در مقایسه با حالت پایه



شکل ۷- پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ شینه برای (توربین بادی) براساس SSA، ISSA در مقایسه با حالت پایه



شکل ۸- پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ شینه برای پنل و توربین براساس ISSA در مقایسه با حالت پایه

مقادیر ماکزیمم شعاع عدم قطعیت بار شبکه α_{Load} و تولید واحدهای تجدیدپذیر α_{PV} و α_{WT} در جدول ۱ ارائه شده است. در روش IGDT مقدار بودجه عدم قطعیت برابر ۰.۲٪ در نظر گرفته شده تا به ازای آن میزان افزایش بار شبکه و همچنین کاهش تولید منابع تجدیدپذیر برآورد شود. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای افزایش ۰.۲٪ هزینه کل در حالت قطعی، ماکزیمم شعاع عدم قطعیت بار شبکه (افزایش بار نسبت به حالت قطعی) پنل خورشیدی ۵/۳۳ درصد و برای توربین بادی ۷/۶۱ درصد بدست آمده که به معنای این است ۰.۲٪ بودجه عدم قطعیت قادر به پوشش

جدول ۲- نتایج عددی روش‌های قطعی و IGDT با $\beta = 20\%$

پنل فتوولتائیک	Base Net	SSA	ISSA	IGDT (ISSA)
اندازه kW		۲۶۰۹	۲۶۰۹	۱۸۱۷/۵
محل نصب	--	۶	۶	۸
ضریب قدرت		۱	۱	۱
تلفات توان kW	۲۰۲/۶۸	۱۰۳/۹۸	۱۰۳/۹۸	۱۲۵/۱۶
انرژی تأمین نشده kWh/year	۶۴۴۷	۳۸۸۳/۶۹	۳۸۸۳/۶۹	۴۲۵۴/۷۶
هزینه تلفات توان \$	۱۰۶۵۲۸/۲	۵۴۶۵۳/۹۳	۵۴۶۵۳/۹۳	۶۵۷۸۷/۲۸
هزینه قابلیت اطمینان \$	۳۲۲۳/۵۱	۱۹۴۱/۸۴	۱۹۴۱/۸۴	۲۱۲۷/۳۸
هزینه کل \$/year	۱۰۹۷۵۱/۷	۵۶۵۹۵/۷۸	۵۶۵۹۵/۷۸	۶۷۹۱۵
سود مالی \$/year %	--	۵۳۱۵۵/۹۹ (۴۸/۴۳%)	۵۳۱۵۵/۹۹ (۴۸/۴۳%)	۴۱۸۳۷ (۳۸/۱۲%)
توربین بادی	Base Net	SSA	ISSA	IGDT (ISSA)
اندازه kW		۱۶۷۳	۲۴۴۵	۲۰۰۴/۵
محل نصب	--	۲۹	۲۶	۷
ضریب قدرت		۰/۷۸۶۹	۰/۸۲۳۴	۰/۸۰۰۷
تلفات توان kW	۲۰۲/۶۸	۶۴/۰۵	۶۲/۴۸	۷۵/۵۲۸۴
انرژی تأمین نشده kWh/year	۶۴۴۷	۲۹۸۳/۹۲	۳۸۲۴/۷۷	۴۰۱۷/۲۳
هزینه تلفات توان \$	۱۰۶۵۲۸/۲	۳۳۶۶۸/۰۲	۳۲۸۴۲/۵۷	۳۹۶۹۷/۷۲
هزینه قابلیت اطمینان \$	۳۲۲۳/۵۱	۱۴۹۱/۹۶	۱۹۱۲/۳۸	۲۰۰۰/۰۸
هزینه کل \$/year	۱۰۹۷۵۱/۷	۳۵۱۵۹/۹۸	۳۴۷۵۴/۹۶	۴۱۷۰۶
سود مالی \$/year %	--	۷۴۵۹۱/۷۹ (۶۷/۹۶%)	۷۴۹۹۶/۸۱ (۶۸/۳۳%)	۶۸۰۴۶ (۶۲%)

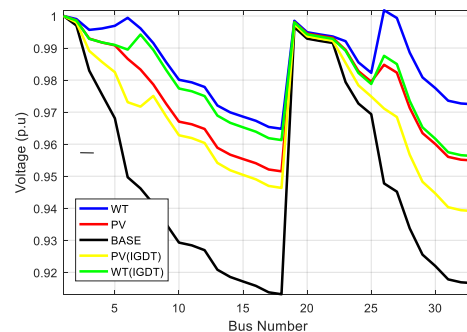
سناریو در حالت قطعی برابر ۳۴۷۵۴/۹۶ دلار بوده که با افزایش ۲۰٪ بودجه عدم قطعیت به ۴۱۷۰۶ دلار، طبق جدول ۱، مقدار بار شبکه ۷/۶۱٪ افزایش و تولید توربین بادی به مقدار ۴۴/۰۶٪ کاهش یافته، مقدار هزینه تلفات از ۳۲۸۴۲/۵۷ دلار به ۳۹۶۹۷/۷۲ دلار و هزینه قابلیت اطمینان از مقدار ۱۹۱۲/۳۸ دلار به ۲۰۰۰/۰۸ دلار افزایش یافته‌است. همچنین سود مالی شبکه از ۷۴۹۹۶/۸۱ دلار (۶۸/۳۳٪) به ۶۸۰۴۸ (۶۲٪) کاهش یافته است. بنابراین افزایش بودجه عدم قطعیت موجب افزایش هزینه تلفات و قابلیت اطمینان شده‌است. از طرفی نتایج نشان داده که در روش IGDT به وضوح درصد تغییرات پارامترهای غیر قطعی بار و تولید به ازای مقدار مشخص بودجه عدم قطعیت بدست آمده که این از مزیت‌های روش مذکور بوده و برخلاف روش‌های احتمالاتی براساس توابع توزیع احتمال که نتایج به تعریف نمونه داده‌ها وابسته‌است. در روش IGDT به راحتی میزان تغییرات پارامترهای غیرقطعی مشخص می‌گردد. منحنی پروفیل ولتاژ شبکه ۳۳ شینه براساس

با در نظر گرفتن مقادیر شعاع عدم قطعیت برای هر سناریو، نتایج عددی مقادیر تلفات و ENS و همچنین هزینه‌های آن‌ها محاسبه گردید. طبق جدول ۲ مقدار تلفات در حالت پایه در حل قطعی پنل، از ۲۰۲/۶۸ کیلو وات به ۱۰۳/۹۸ کیلووات و در حالت غیر قطعی به ۱۲۵/۱۶ کیلووات، مقدار ENS از ۶۴۴۷ کیلووات ساعت در سال به ۳۸۸۳/۶۹ کیلووات ساعت در سال در حالت قطعی و در حالت غیر قطعی به ۴۲۵۴/۷۶ کیلووات ساعت در سال رسیده است. همچنین مقدار تلفات در حالت پایه در حل قطعی توربین از ۲۰۲/۶۸ کیلووات به ۶۴/۰۵ کیلووات و در حالت غیر قطعی به ۷۵/۵۲ کیلووات، مقدار ENS از ۶۴۴۷ کیلووات ساعت در سال به ۲۹۸۳/۹۲ کیلووات ساعت در سال در حالت قطعی و در حالت غیر قطعی به ۴۰۱۷/۲۳ کیلووات ساعت در سال رسیده‌است. پس تخصیص پنل و توربین باعث کاهش ENS شده‌است. در حل مسأله براساس روش IGDT با $\beta = 20\%$ نیز کمترین هزینه مربوط به تخصیص توربین است. نتایج نشان داده که مقدار هزینه این

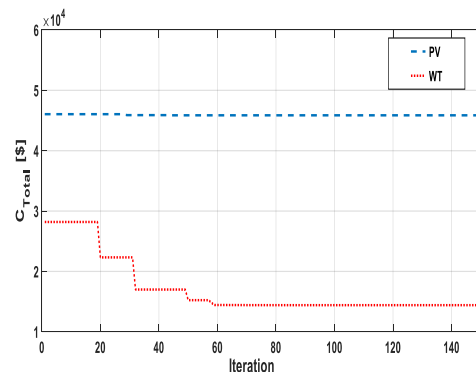
مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد روش MOHTLBOGWO برای شبکه ۳۳ شینه سود مالی بیشتری را بدست آورده که دلیل بر برتری روش ISSA است. جهت مقایسه نتایج روش IGDT با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی بار و تولید، عملکرد آن در تخصیص پنل خورشیدی با نتایج قطعی این سناریو در مرجع [۱۵] مقایسه و بحث شده است.

در مرجع [۱۵]، جایابی بهینه یک پنل خورشیدی با هدف کاهش تلفات، بهبود پروفیل و پایداری ولتاژ شبکه ۳۳ شینه با استفاده از الگوریتم شیرمورچه (ALO) طبق جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای شبکه ۳۳ شینه مقدار تلفات ۱۰۳/۰۵۳ کیلووات بدست آمده است. لازم به ذکر است که در [۱۵]، پارامترهای بار شبکه و تولید بصورت قطعی در نظر گرفته شده و عدم قطعیت آن‌ها لحاظ نشده است. با توجه به اینکه بار شبکه بطور پیوسته در حال تغییر است از طرفی توان پنل‌های خورشیدی به دلیل تغییرات ذاتی تابش دائماً در حال تغییر می‌باشد بنابراین در نظر گرفتن بار شبکه و تولید منبع تجدیدپذیر بصورت قطعی دور از بهره‌برداری دقیق و واقعی شبکه توزیع است. بنابراین در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی می‌تواند بهره بردار را از مشخصه‌های دقیق شبکه آگاه نموده تا بتواند براساس بودجه‌های سرمایه‌گذاری و ریسک‌های موجود تصمیمات درستی اتخاذ نموده و براساس آن برنامه‌ریزی در شبکه پیاده گردد. همانطور که مشاهده می‌گردد مقدار تلفات با بودجه عدم قطعیت ۲۰٪ براساس IGDT برای شبکه ۳۳ شینه با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و تولید ۱۲۵/۱۶ کیلووات بدست آمده که مقادیر تلفات بدست آمده در مرجع [۱۵]، نسبت به مقادیر روش IGDT با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی بار و شبکه فاصله داشته و نمی‌تواند به بهره بردار در اتخاذ تصمیمات درست کمک نماید. همچنین نتایج حل تخصیص بهینه توربین بادی مبتنی بر IGDT با بودجه عدم قطعیت ۲۰ درصد با روش مونت کارلو مقایسه شده است. طبق جدول ۲، برای شبکه ۳۳ با سه مقدار هزینه کل در روش قطعی برابر ۳۴۷۵۴/۹۶ دلار و براساس روش IGDT برابر ۴۱۷۰۶ دلار بدست آمده است. در این مطالعه جهت مقایسه نتایج با روش مونت کارلو، تعداد ۵۰۰ سناریو برای بار شبکه و توان تولیدی توربین بادی تولید شده است.

روش IGDT و $\beta = 20\%$ در شکل (۹) نشان داده شده که مشاهده می‌گردد با تخصیص بهینه منابع تجدیدپذیر نوسانات ولتاژ شبکه نسبت به حالت پایه کاسته شده است. همچنین واضح است که تخصیص توربین از پروفیل ولتاژ بهتری نسبت به تخصیص پنل برخوردار بوده مقدار حداقل ولتاژ بیشتری دارد. برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی منحنی همگرایی روش ISSA در حل هر دو سناریو در شکل (۱۰) برای شبکه ۶۹ شینه استاندارد IEEE ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تخصیص بهینه توربین بادی، مقدار هزینه تلفات و هزینه قابلیت اطمینان کمتری را بدست آورده است.



شکل ۹- منحنی پروفیل ولتاژ براساس روش IGDT



شکل ۱۰- منحنی همگرایی تابع هدف (هزینه کل) روش ISSA برای شبکه ۶۹ شینه

۵- مقایسه با مطالعات پیشین

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی با مطالعات پیشین ارزیابی شده است. طبق جداول ۳ و ۴، تخصیص بهینه پنل خورشیدی و توربین بادی در شبکه ۳۳ شینه با مرجع [۱۶] مقایسه شده است. در مرجع [۱۶]، جایابی بهینه پنل خورشیدی و توربین بادی با هدف کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان با استفاده از الگوریتم چندهدفه ترکیبی آموزش یادگیری-گرگ خاکستری (MOHTLBOGWO)

اطمینان تصمیم‌گیری شده ولی در مقابل زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. بنابراین روش‌های اتفاقی نظیر مونت کارلو در مقایسه با روش IGDT قادر به ارائه مطمئن هزینه کل مسأله تخصیص بهینه توربین بادی نمی‌باشند در صورتی که روش IGDT به راحتی این هزینه را بدست آورده‌است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله جایابی منابع تجدیدپذیر فتوولتائیک و بادی در شبکه توزیع با هدف کاهش هزینه تلفات توان اکتیو و هزینه بهبود قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن پارامترهای غیر قطعی بار شبکه و تولید منابع به کمک روش IGDT ارائه شده‌است. مسأله پیشنهادی در ۲ سناریوی شبیه‌سازی شامل تخصیص یک پنل، تخصیص یک توربین بصورت قطعی بدون عدم قطعیت و سپس با استفاده از روش IGDT با راهبرد ریسک‌گریز با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و تولید حل شده و نتایج هزینه تلفات و هزینه انرژی تأمین نشده مشترکین به عنوان شاخص قابلیت اطمینان ارزیابی شده‌است. در این مقاله از روش فرا-اکتشافی اجتماع سالپ بهبود یافته با عمل‌گرهای جهش و کراس اور الگوریتم دیفرانسیلی تکاملی (ISSA) برای تعیین متغیرهای تصمیم‌گیری استفاده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده در حل مسأله بصورت قطعی، عملکرد توربین بادی نسبت به پنل‌های فتوولتائیک در کاهش هزینه بهتر بوده‌است. نتایج حاکی از این بوده که سناریوی تخصیص بهینه توربین بادی موجب دستیابی به کمترین هزینه، بیشترین سود مالی حداقل ولتاژ شبکه ۳۳ شینه بوده‌است. همچنین کارایی روش ISSA در مقایسه با روش SSA از نظر دستیابی به هزینه کمتر به تأیید رسیده‌است. در حل مسأله در روش IGDT مبتنی بر راهبرد ریسک‌گریزی، ماکزیمم شعاع عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر و بار شبکه به ازای بودجه عدم قطعیت معین به همراه مکان و ضریب قدرت بهینه منابع با استفاده از روش ISSA تعیین شده‌است. علاوه بر این نتایج حل مسأله بصورت قطعی و IGDT از نظر هزینه تلفات و قابلیت اطمینان و همچنین سود مالی شبکه مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته‌است. نتایج حل مسأله با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقطعی بار و تولید منابع تجدیدپذیر براساس روش IGDT نشان داده که بهترین سناریو از نظر کمترین هزینه سناریوی تخصیص

جدول ۳- مقایسه جایابی پنل فتوولتائیک با مطالعات پیشین

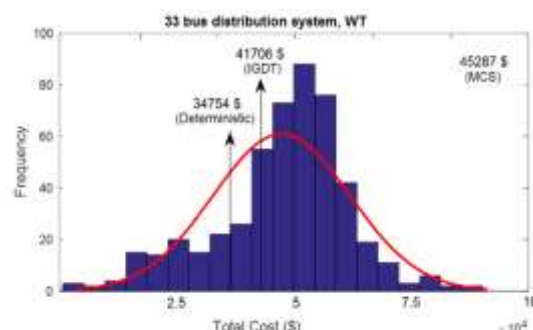
پنل فتوولتائیک	ISSA	MOTLBOGWO [۱۶]
اندازه (کیلووات)/محل نصب ضریب قدرت	۲۶۰۹/۶ ۱	۱۸۱۷,۵/۸ ۱
تلفات توان (کیلو وات)	۱۰۳/۹۸	۱۲۵/۱۶۶۱
(سال/دلار) سود مالی	۵۳۱۵۵/۹۹	۴۱۸۳۷

جدول ۴- مقایسه جایابی توربین بادی با مطالعات پیشین

توربین بادی	ISSA	MOTLBOGWO [۱۶]
محل /اندازه (کیلووات) نصب ضریب قدرت	۲۴۴۵/۲۶ /۰/۸۲۳۴	۲۰۷۸/۳۰ ۰/۸۳۳
تلفات توان (کیلو وات)	۶۲/۴۸	۷۳/۳۸
(سال/دلار) سود مالی	۷۴۹۹/۸۱ ۶	۷۲۳۲۱/۷

جدول ۵- مقایسه نتایج روش IGDT با مطالعات پیشین

پنل فتوولتائیک	ISSA IGDT	ALO [۱۵]
محل /اندازه (کیلووات) نصب	۱۸۱۷,۵/۸	۲۴۵۰/۶
تلفات توان (کیلو وات)	۱۲۵/۱۶	۱۰۳/۰۵۳



شکل ۱۱- مقایسه هزینه کل برای روش‌های قطعی، MCS و IGDT

مقدار متوسط هزینه کل در روش مونت کارلو براساس توابع توزیع احتمال در شکل (۱۱) برای شبکه ۳۳ باسه ۴۵۲۸۷ دلار بدست آمده‌است. همانطور که می‌دانیم خروجی روش مونت کارلو به شدت به تعریف توابع توزیع احتمال ورودی‌های آن و مدل بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر سناریو وابسته بوده که از معایب عمده این روش است. دقت روش‌های تصادفی به شدت به تعریف سناریوها وابسته است که در این حین ممکن است تعدادی از سناریوهای از واقعیت دور باشند. افزایش تعداد سناریو، موجب افزایش دقت و

n_d	تعداد کل نقاط بار
$\lambda_a(i)$	متوسط بار متصل شده در نقطه بار i (کیلو وات)
U_i	عدم دسترس پذیری نقطه بار i (ساعت در سال)
ENS	انرژی تأمین نشده مشترکین (کیلو وات ساعت در سال)
K_{ENS}	هزینه هر کیلو وات ساعت انرژی تأمین نشده مشترکین (دلار)
P_{Swing}	توان اکتیو پست (کیلو وات)
Q_{Swing}	توان راکتیو پست (کیلو وار)
P_{DG}	توان اکتیو منبع تولید پراکنده (کیلو وات)
Q_{DG}	توان راکتیو منبع تولید پراکنده (کیلو وار)
Q_{LOSS}	تلفات راکتیو خطوط (کیلو وار)
P_d	دیماند توان‌های اکتیو شین i (کیلو وات)
Q_d	دیماند توان‌های راکتیو شین i (کیلو وار)
N_{DG}	تعداد منابع تولید پراکنده
V_{min}	حداقل ولتاژ باس (ولت)
V_{max}	حداکثر ولتاژ باس (ولت)
S_{Li}	توان مختلط عبوری از خط
x_j^1	موقعیت اولین سالپ (رهبر) در بعد j ام
F_j	موقعیت منبع غذایی در بعد j ام
ub_j	کران بالای بعد j ام
lb_j	کران پایین بعد j ام
x_j^i	موقعیت سالپ پیرو i ام در بعد j ام
Δ_C	مقدار بحرانی تابع هدف
\mathfrak{R}_C	شعاع عدم قطعیت پارامتر غیر قطعی
β	درجه تحمل افزایش تابع هدف
α_{load}	حداکثر شعاع عدم قطعیت بار شبکه
α_{pv}	حداکثر شعاع عدم قطعیت توان فتوولتائیک
α_{wt}	حداکثر شعاع عدم قطعیت توان بادی
P_{pv}	توان فتوولتائیک
P_{wt}	توان بادی

توربین بادی است. نتایج نشان داده که برای شبکه ۳۳ شینه مقدار هزینه کل سناریوی تخصیص بهینه توربین بادی در حالت قطعی برابر ۳۴۷۵۴/۹۶ دلار بوده که با افزایش ۲۰٪ بودجه عدم قطعیت به ۴۱۷۰۶ دلار رسیده که مقدار بار شبکه ۷/۶۱٪ افزایش یافته و تولید توربین بادی به مقدار ۴۴/۰۶٪ کاهش یافته است. همچنین نسبت به حالت قطعی مقدار هزینه تلفات و هزینه قابلیت اطمینان به ترتیب ۲۰/۸۷ و ۴/۵۸ درصد افزایش یافته و سود مالی شبکه نیز ۶/۳۳٪ کاهش یافته است. نتایج بدست آمده در مقایسه با مطالعات قطعی پیشین نشان داده که راهبرد ریسک‌گریزی یک ابزار تصمیم‌گیری مقاوم برای رسیدگی به عدم قطعیت بار شبکه و توان منابع تجدیدپذیر بدست می‌دهد. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت با استفاده از IGDT برخلاف روش‌های قطعی با پارامترهای قطعی، باعث می‌شود بهره‌بردار در برابر تغییرات احتمالی بار و تولید، تصمیمات مناسبی اتخاذ کند.

پیوست

جدول الف) اطلاعات مربوط به هزینه‌ها

K_{Loss}	۰/۰۶ دلار
K_{ENS}	۰/۵ دلار

جدول ب) علائم و نشانه‌ها

C_{Total}	هزینه کل (برحسب دلار)
C_{loss}	هزینه تلفات (برحسب دلار)
C_{ENS}	هزینه قابلیت اطمینان (برحسب دلار)
R_k	مقاومت خط k ام (اهم)
X_k	راکتانس خط k ام (اهم)
I_k	جریان خط k ام (آمپر)
V_i	ولتاژ باس i (ولت)
V_j	ولتاژ باس j (ولت)
P_{loss}	تلفات توان اکتیو (کیلو وات)
K_{loss}	هزینه هر کیلو وات توان اکتیو (دلار)
T_s	زمان مطالعه (سال)

مراجع

- [1] سید محمد مهدی میر طلائى و گلناز تاجمیر، "طراحی، مدل‌سازی و ساخت یک مبدل Z-Source بهره بالا برای کاربرد در اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه برق"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۲۱-۲۲۹.
- [2] A. Schweer, "Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system", Cigre working group 37.23, editor, Cigre Technical Brochure 137, September 1999.
- [3] M. J. Hadidian-Moghaddam, S. Arabi-Nowdeh, M. Bigdeli, and D. Azizian, "A multi-objective optimal sizing and siting of distributed generation using ant lion optimization technique", Ain shams engineering journal, Vol. 9, No. 4, December 2018, pp. 2101-2109.

[4] R. Billinton, and R.N. Allan, Reliability assessment of large electric power systems, Springer Science and Business Media, 2012.

[۵] علی رضا ابراهیمی، عباس دیدبان و رضا کی پور، "استراتژی کنترلی نوین در سیستم‌های انرژی ترکیبی بادی-خورشیدی برمبنای تعیین محدوده‌های بهینه شارژ و دشارژ باتری‌ها در بازه‌های زمانی مختلف"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۳-۱۷۳.

[۶] سید قاسم میربابایی رکنی، مسعود رادمهر و علیرضا ذکریازاده، "مدل‌سازی مدیریت منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه با استفاده از روش توزیع شده"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۴۱-۲۵۲.

[7] R. H. A. Zubo, G. Mokryani, H. S. Rajamani, J. Aghaei, T. Niknam, and P. Pillai, "Operation and planning of distribution networks with integration of renewable distributed generators considering uncertainties: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 72, May 2017, pp. 1177-1198.

[8] A. Naderipour, S. A. Nowdeh, P. B. Saftjani, Z. Abdul-Malek, M. W. B. Mustafa, H. Kamyab, and I. F. Davoudkhani, "Deterministic and probabilistic multi-objective placement and sizing of wind renewable energy sources using improved spotted hyena optimizer", Journal of Cleaner Production, Vol. 286, Vol. 1, March 2021, p.124941.

[9] A. Soroudi, "Distribution network planning under uncertainty considering dg units", PhD thesis, 2013, University College Dublin, 10.13140/2.1.4406.1129.

[10] R. Mafakheri, P. Sheikahmadi, and S. Bahramara, "A two-level model for the participation of microgrids in energy and reserve markets using hybrid stochastic-IGDT approach", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 119, July 2020, p.105977.

[11] A. Ahmadi, A. Esmaeel Nezhad, P. Siano, B. Hredzak, and S. Saha, "Information-Gap Decision Theory for Robust Security-Constrained Unit Commitment of Joint Renewable Energy and Gridable Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 16, No. 5, May 2020, pp. 3064-3075.

[12] A. Safaei, B. Vahidi, and H. Askarian-abyaneh, "A two-step optimization algorithm for wind turbine generator placement considering maximum allowable capacity", Renewable energy, Vol. 92, July 2016, pp. 75-82.

[13] H. S. Ramadan, A. F. Bendary, and S. Nagy, "Particle swarm optimization algorithm for capacitor allocation problem in distribution systems with wind turbine generators", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 84 January 2017, pp. 143-152.

[14] A. Selim, S. Kamel, L.S. Nasrat, and F. Jurado, "Voltage Stability Assessment of Radial Distribution Systems Including Optimal Allocation of Distributed Generators", International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, Vol. 6, No. 1, February 2020, pp. 32-40.

[15] E. S. Ali, S. M. Abd Elazim, and A. Y. Abdelaziz, "Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations", Renewable Energy, Vol. 101, February 2017, pp. 1311-1324.

[16] S. Arabi Nowdeh, I. Faraji Davoudkhani, M. J. Hadidian Moghaddam, E. Seifi Najmi, A. Y. Abdelaziz, A. Ahmadi, S. E. Razavi, and F. H. Gandoman, "Fuzzy multi-objective placement of renewable energy sources in distribution system with objective of loss reduction and reliability improvement using a novel hybrid method", Applied Soft Computing, Vol. 77, April 2019, pp. 761-779.

[17] K. S. Sambaiah, and T. Jayabarathi, "Optimal allocation of renewable distributed generation and capacitor banks in distribution systems using salp swarm algorithm", International journal of renewable energy research, Vol. 9, No.1 March 2019, pp. 96-107.

[18] S. S. Parihar, and N. Malik, "Optimal allocation of renewable DGs in a radial distribution system based on new voltage stability index", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 30, No. 4, November 2020.

[19] M. Daneshvar, M. Abapour, B. Mohammadi, and S. Asadi, "Impact of optimal DG placement and sizing on power reliability and voltage profile of radial distribution networks", Majlesi Journal of Electrical Engineering, Vol. 13, No.2, June 2019, pp. 91-102

[20] A. Hussain, V. H. Bui and H. M. Kim, "Robust optimization-based scheduling of multi-microgrids considering uncertainties", Energies, Vol. 9, April 2019, pp. 761-779.

- [21] C. Peng, P. Xie, L. Pan, and R. Yu, "Flexible Robust Optimization Dispatch for Hybrid Wind/Photovoltaic/Hydro/Thermal Power System", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 2, March 2016, pp. 751-762.
- [22] D. K. Khatod, V. Pant and J. Sharma, "Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, May 2013, pp. 683-695.
- [23] A. Soroudi, and M. 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*, Vol. 15, No. 1, January 2011, pp. 794-800.
- [24] S. S. Tanwar, and D. K. Khatod, "Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system ", *Energy*, Vol. 127, May 2017, pp. 52-67.
- [25] A. Khazali, N. Rezaei, A. Ahmadi, and B. Hredzak, "Information gap decision theory based preventive/corrective voltage control for smart power systems with high wind penetration ", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, No. 10, October 2018, pp. 4385-4394.
- [26] A. Najafi-Ghalelou, S. Nojavan, and K. Zare, "Heating and power hub models for robust performance of smart building using information gap decision theory", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 98, June 2018, pp. 23-35.
- [27] S. M. Moghaddas-Tafreshi, M. Jafari, S. Mohseni, and S. A. Kelly, "Optimal operation of an energy hub considering the uncertainty associated with the power consumption of plug-in hybrid electric vehicles using information gap decision theory", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 112, November 2019, pp. 92-108.
- [28] A. Naderipour, Z. Abdul-Malek, Z. A. Noorden, I. F. Davoudkhani, S. A. Nowdeh, H. Kamyab, S. Chelliapan, and S. M. S. Ghiasi, "Carrier wave optimization for multi-level photovoltaic system to improvement of power quality in industrial environments based on Salp swarm algorithm", *Environmental Technology and Innovation*, Vol. 21, February 2021, p.101197.
- [29] M. Tubishat, N. Idris, L. Shuib, M. A. Abushariah, and S. Mirjalili "Improved Salp Swarm Algorithm based on opposition based learning and novel local search algorithm for feature selection", *Expert Systems with Applications*, Vol. 145, May 2020, p.113122.
- [30] K. Gholami, and M. H. Parvaneh, "A mutated salp swarm algorithm for optimum allocation of active and reactive power sources in radial distribution systems", *Applied Soft Computing*, Vol. 85, December 2019, p.105833.
- [31] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, and S. M. Mirjalili, " Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems", *Advances in Engineering Software*, Vol. 114, December 2017, pp. 163-191.
- [32] P. P. Biswas, P. N. Suganthan, G. Wu, and G. A. Amaratunga, "Parameter estimation of solar cells using datasheet information with the application of an adaptive differential evolution algorithm", *Renewable Energy*, Vol. 132, March 2019, pp. 425-438.
- [33] S. Dhabal, R. Chakrabarti, N. S. Mishra, and P. Venkateswaran, "An improved image denoising technique using differential evolution-based salp swarm algorithm", *Soft Computing*, Vol. 190, August 2020, pp. 1941-1961.
- [34] M. Majidi, B. Mohammadi-Ivatloo, and A. Soroudi, "Application of information gap decision theory in practical energy problems: A comprehensive review", *Applied Energy*, Vol. 249, September 2019, pp. 157-165.
- [35] M. E. Baran, and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing ", *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 9, No. 4, April 1989, pp. 101-102.