KNO-1204-5001

مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه توزیع با استفاده از رویکرد تلفیقی منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ

نویسندگان:

علیرضا عباسی[1]، حسن سیاهکلی[2]

[1]کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، alliireza@yahoo.com

[2]دکترای برق قدرت ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوبH_siahkali@azad.ac.ir

چکیده:

در سال‌های اخیر، نیاز به توسعه شبکه‌های توزیع برق برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد انرژی الکتریکی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید انرژی، اهمیت ویژه‌ای یافته است. منابع تولید پراکنده (DG) به عنوان راهکاری نوین برای بهبود بهره‌وری و پایداری سیستم‌های توزیع مطرح شده‌اند. با این حال، مکان‌یابی و اندازه‌گیری نامناسب این منابع می‌تواند منجر به افزایش تلفات توان، تخریب پروفیل ولتاژ و کاهش قابلیت اطمینان شبکه شود. در این مقاله، رویکردی تلفیقی مبتنی بر منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA)برای مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینهDG ها در شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شینه IEEE پیشنهاد شده است. منطق فازی برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های بار و ظرفیتDG ها به کار رفته و الگوریتم WOA برای بهینه‌سازی اهداف چندگانه مانند کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی در محیط MATLAB نشان می‌دهد که این رویکرد تلفات توان اکتیو را به ۱۶۵,۸۹ کیلووات کاهش داده، میانگین ضریب توان را به ۱۱۰۲,۸۷ ارتقا بخشیده و شاخص‌های قابلیت اطمینان مانند LOLP و EDNS را بهبود داده است. این روش در مقایسه با رویکردهای سنتی، کارایی بالاتری در مدیریت عدم‌قطعیت‌ها و دستیابی به تعادل بهینه ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: تولید پراکنده، شبکه توزیع، مکان‌یابی بهینه، منطق فازی، الگوریتم نهنگ، قابلیت اطمینان

۱.مقدمه

افزایش تقاضای انرژی الکتریکی و ضرورت کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید انرژی، سیستم‌های توزیع برق را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. منابع تولید پراکنده (DG) مانند توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و میکروتوربین‌ها، به عنوان جایگزینی برای نیروگاه‌های متمرکز، مزایایی همچون کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان ارائه می‌دهند [۱]. با این حال، مکان‌یابی و اندازه‌گیری نامناسبDG ها می‌تواند منجر به مشکلات فنی مانند اضافه‌ولتاژ یا افزایش تلفات شود[۲]

در این مقاله، رویکردی نوین برای حل این مسئله ارائه شده است. این رویکرد تلفیقی از منطق فازی برای مدیریت عدم قطعیت‌ها و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) برای جستجوی بهینه است. هدف اصلی، بهینه‌سازی مکان و ظرفیتDG ها با درنظرگیری شاخص‌های فنی و زیست‌محیطی است. شبکه مورد مطالعه، شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE با بار ۳,۷۲ مگاوات اکتیو و ۲,۳ مگاوار راکتیو است.

۲.مبانی نظری

۲,۱ .منابع تولید پراکنده(DG)

DGها واحدهای کوچک تولید برق هستند که در نزدیکی مصرف‌کنندگان نصب می‌شوند. مزایای آن‌ها شامل کاهش تلفات انتقال، بهبود پایداری ولتاژ و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است [۳]. با این حال، چالش‌هایی مانند افزایش سطح اتصال کوتاه و دشواری کنترل در حالت جزیره‌ای وجود دارد.[۴]

طبق تعریف IEEE و استانداردهای بین‌المللی، هر منبع تولید برق با ظرفیت معمولاً **کمتر از ۵۰ مگاوات** (اغلب تا ۱۰ مگاوات) که در نزدیکی بار یا داخل شبکه توزیع نصب می‌شود، DG نامیده می‌شود.

۲. ۲ . انواع منابع تولید پراکنده (DG) بر اساس نوع انرژی اولیه

دسته‌بندی	نوع منبع	ظرفیت معمول	مزایا اصلی	معایب اصلی
تجدیدپذیر	توربین بادی(Wind Turbine)	۱۰۰ کیلووات – ۵ مگاوات	بدون سوخت، آلودگی صفر، هزینه عملیاتی پایین	متغیر بودن باد، نیاز به فضای زیاد
تجدیدپذیر	پنل خورشیدی (Photovoltaic - PV)	۱ کیلووات – ۱۰ مگاوات	بدون صدا، نصب آسان، طول عمر بالا	وابستگی به تابش، هزینه اولیه بالا
تجدیدپذیر	میکروهیدرو(Micro/Small Hydro)	۱۰۰ کیلووات – ۱۰ مگاوات	پایدار، ضریب ظرفیت بالا	نیاز به جریان آب دائمی، اثرات زیست‌محیطی
تجدیدپذیر	زیست‌توده(Biomass)	۵۰۰ کیلووات – ۲۰ مگاوات	قابل برنامه‌ریزی، استفاده از پسماند	انتشار گاز، نیاز به سوخت مداوم
تجدیدپذیر	ژئوترمال(Geothermal)	۱–۳۰ مگاوات	پایدار، ضریب ظرفیت بسیار بالا	محدود به مناطق خاص
غیرتجدیدپذیر	میکروتوربین گازی(Microturbine)	۲۵–۵۰۰ کیلووات	پاسخ سریع، قابلیت*CHP	مصرف سوخت فسیلی، آلودگی

معایب اصلی	مزایا اصلی	ظرفیت معمول	نوع منبع	دسته‌بندی
هزینه بسیار بالا، طول عمر محدود	راندمان بالا (تا ٪۶۰)، آلودگی بسیار کم	۵ کیلووات – ۱۰ مگاوات	پیل سوختی(Fuel Cell)	غیرتجدیدپذیر
آلودگی بالا، سر و صدا	ارزان، پاسخ سریع، قابل اطمینان	۱۰ کیلووات – ۵ مگاوات	موتور ژنراتور دیزلی/گازسوز	غیرتجدیدپذیر
فناوری نوظهور، هزینه بالا	راندمان بالا، سوخت متنوع	۱–۵۰ کیلووات	موتور استرلینگ(Stirling Engine)	غیرتجدیدپذیر
هزینه بالا، طول عمر محدود	قابلیت پیک‌شیوی، تنظیم فرکانس	۱۰۰ کیلووات – ۵۰ مگاوات	باتری + اینورتر(BESS)	ذخیره‌سازی + تولید
ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت	پاسخ بسیار سریع (میلی‌ثانیه)	۱۰۰ کیلووات – ۲۰ مگاوات	فلای‌ویل(Flywheel)	ذخیره‌سازی + تولید

*CHP = Combined Heat and Power (تولید همزمان برق و حرارت)

۲,۳ . طبقه‌بندی بر اساس قابلیت دیسپچ(Dispatchability)

قابلیت برنامه‌ریزی	مثال‌ها	نوع
کاملاً بله	میکروتوربین، پیل سوختی، دیزل‌ژن، زیست‌توده	قابل دیسپچ
با ذخیره‌ساز بله	خورشیدی + باتری، بادی + باتری	نیمه‌قابل دیسپچ
خیر	خورشیدی بدون باتری، بادی بدون باتری	غیرقابل دیسپچ

رتبه‌بندی رایج‌ترین DG ها در شبکه‌های توزیع ایران (تا سال ۱۴۰۴)

۱. پنل خورشیدی(PV)
۲. توربین بادی کوچک
۳. دیزل ژنراتور
۴. میکروتوربین گازی
۵. پیل سوختی (در حال توسعه)
۶. سیستم‌های هیبریدی PV + باتری

مزایای کلی استفاده از DG در شبکه توزیع

- کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو
- بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش افت ولتاژ انتهای فیدر
- افزایش قابلیت اطمینان و کاهش زمان خاموشی
- به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در توسعه شبکه
- کاهش انتشار CO_2 و آلاینده‌ها (در صورت تجدیدپذیر بودن)
- امکان جزیره‌ای شدن (Microgrid) در مواقع اضطراری

معایب و چالش‌ها

- افزایش پیچیدگی حفاظت شبکه
- احتمال افزایش جریان اتصال کوتاه
- مشکل تنظیم ولتاژ و توان راکتیو در نفوذ بالا
- نیاز به هماهنگی با سیستم مدیریت توزیع(DMS)

۲.۴ .الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ(WOA)

معرفی‌شده در سال ۲۰۱۶ توسط **Seyedali Mirjalili**و **Andrew Lewis**، یکی از قدرتمندترین و محبوب‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری طبیعت‌الهام در دهه اخیر است که به‌ویژه در مسائل مهندسی قدرت(از جمله مکان‌یابی و اندازه‌گیریDG) بسیار موفق عمل کرده است.

- **الهام‌گیری زیستی**

الگوریتم از رفتار شکار گروهی **نهنگ‌های گوژپشت (Humpback Whale)** الهام گرفته شده است. این نهنگ‌ها تنها حیوانی هستند که از تکنیک شکار منحصربه‌فرد **حباب‌مارپیچی (Bubble-net feeding)** استفاده می‌کنند:

۱. شناسایی طعمه و محاصره آن
۲. حمله با ایجاد مارپیچ حباب(Spiral Bubble-net)
۳. جستجوی تصادفی برای طعمه جدید

- **مراحل اصلی الگوریتمWOA**

هدف در مسئلهDG	توضیح ریاضی و مفهومی	مرحله
نزدیک شدن جمعیت به بهترین مکان/اندازهDG	نهنگ‌ها موقعیت بهترین جواب فعلی (Best Whale) را شناخته و بقیه به سمت آن حرکت می‌کنند.	.1محاصره طعمه(Encircling Prey)
بهره‌برداری (Exploitation) قوی	دو مکانیزم همزمان • :حرکت مارپیچی •انقباض دایره محاصره	.2حمله مارپیچی حباب (Bubble-net Attacking)
کاوش (Exploration) و فرار از بهینه محلی	حرکت کاملاً تصادفی بر اساس موقعیت یک نهنگ تصادفی (نه بهترین)	.3جستجوی طعمه(Search for Prey)

- **روابط ریاضی کلیدی WOA**

$D = abs(C * X^* (t) - X (t))$ (فاصله تا بهترین جواب)

$X (t+1) = X^* (t) - A * D$ (به‌روزرسانی موقعیت - محاصره)

$A = 2 a r - a$ با $a = 2 - 2 (t / T)$

$C = 2 r$

حمله مارپیچی (Bubble-net):

$X (t+1) = D' e^{(b l)} \cos (2 \pi l) + X^* (t)$

$D' = abs(X^* (t) - X (t))$

که $l \in [-1,1]$ و b ثابت شکل مارپیچ (معمولاً ۱) است.

احتمال ۵۰٪ بین مکانیزم انقباض دایره‌ای و مارپیچی انتخاب می‌شود.

- **نسخه‌های توسعه‌یافته مورد استفاده**

۱. Multi-Objective WOA (MOWOA) :برای حل همزمان چند هدف (کاهش تلفات + بهبود ولتاژ + قابلیت اطمینان)
۲. با آرشیو خارجی و انتخاب رهبر از مرز پارتو(Pareto Archive + Leader Selection)
۳. Chaotic WOAیا :Lévy-flight WOA برای افزایش تنوع و فرار از بهینه محلی
۴. ترکیب با منطق فازی :(Fuzzy-WOA)

چرا WOA در مسئله مکان‌یابی DG بسیار موفق است؟

مزیت در مسئله مکان‌یابیDG	ویژگیWOA
تنظیم آسان، پایداری بالا	(p و a فقط) تعداد پارامتر تنظیم بسیار کم
جلوگیری از گیر کردن در بهینه محلی	Exploitation و Exploration تعادل عالی بین
همگرایی سریع به جواب‌های با کیفیت بالا	مکانیزم مارپیچی بسیار قوی
را همزمان بهینه می‌کند DG مکان (گسسته) + اندازه (پیوسته)	عملکرد عالی در فضاهای پیوسته و گسسته
در مقالات ۲۰۲۲–۲۰۲۵ معمولاً بهترین نتیجه را می‌دهد	همگرایی سریع‌تر ازPSO ، GAو DE در اکثر مسائل قدرت

مقایسه عملکرد WOA با الگوریتم‌های معروف

رتبه کلی	زمان محاسبه	بهترین ولتاژ(pu)	میانگین کاهش تلفات(%)	الگوریتم
۵	بالا	۰,۹۴–۰,۹۶	۲۲–۲۸	GA
۴	متوسط	۰,۹۵–۰,۹۷	۲۵–۳۲	PSO
۳	متوسط	۰,۹۵–۰,۹۸	۲۷–۳۴	DE
۲	کم	۰,۹۶–۰,۹۸	۳۰–۳۶	GWO
۱	**کم**	**۰,۹۷–۰,۹۹**	**۳۳–۴۳**	**WOA/MOWOA**

نتیجه‌گیری

الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) به‌دلیل سادگی، قدرت کاوش و بهره‌برداری بالا، و عملکرد برتر در مسائل چندهدفه و غیرخطی، در حال حاضر یکی از بهترین انتخاب‌ها برای حل مسئله **مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه DG** در شبکه‌های توزیع است. ترکیب آن با منطق فازی (مانند کاری که شما انجام دادید) باعث شده حتی در حضور عدم‌قطعیت بار و تولید نیز نتایج بسیار قابل اعتمادی ارائه دهد.

3 . منطق فازی

منطق فازی برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها در بار و ظرفیتDG ها استفاده می‌شود. توابع عضویت مثلثی برای متغیرهای ورودی (تغییرات ولتاژ، زاویه فاز، تلفات) و خروجی(توان)DG

قوانین فازی با روش Max-Min پردازش می‌شوند

۱ . چرا از منطق فازی استفاده شد؟

- بار مصرفی در شبکه توزیع در طول روز و فصل‌ها تغییر می‌کند (عدم‌قطعیت).
- تولیدDG های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) متغیر و غیرقابل پیش‌بینی است.
- الگوریتم‌های کلاسیک (مثل پخش بار دقیق) در برابر این عدم‌قطعیت‌ها حساس هستند.
- منطق فازی امکان مدل‌سازی «تقریبی» و «انسانی» این عدم‌قطعیت‌ها را بدون نیاز به توزیع احتمال دقیق فراهم می‌کند.

۲ . ساختار سیستم فازی پیشنهادی (FIS: Fuzzy Inference System)

متغیر	توابع عضویت	دامنه تقریبی (بر اساس شبکه ۳۳ شینه)
ΔV (تغییر ولتاژ)	Low – Medium – High	۰ تا ۰٫۱ پریونیت
Δθ (زاویه فاز)	Low – Medium – High	−۵° تا +۵°
P_loss (تلفات)	Low – Medium – High	۰ تا ۳۰۰ کیلووات
P_DG (توان خروجی)	Very Low – Low – Medium – High – Very High	۰ تا ۱۲ مگاوات

۳ .نمونه‌ای از قوانین فازی ۲۷گانه

شماره	IF (ΔV)	AND (Δθ)	AND (P_loss)	THEN (P_DG)
۱	High	High	High	Very High
۵	Low	Low	Low	Very Low
۱۲	Medium	Low	High	High
۲۷	High	Medium	Medium	Medium
...	...	...	...	...

۴ .نقش دقیق منطق فازی در حلقه بهینه‌سازی

۱. در هر تکرار الگوریتمWOA ، یک کاندیدای مکان و اندازه DG پیشنهاد می‌شود.
۲. پخش بار انجام می‌شودΔV → ، Δθو P_loss محاسبه می‌شود.
۳. این سه مقدار به سیستم فازی داده می‌شود.
۴. سیستم فازی یک توان پیشنهادی اصلاح‌شده (P_DG,fuzzy)خروجی می‌دهد.
۵. WOAاز این مقدار برای تنظیم بهتر اندازه DG در تکرارهای بعدی استفاده می‌کند.
۶. در نتیجه: حتی اگر WOA یک اندازه خیلی بزرگ یا خیلی کوچک پیشنهاد دهد، منطق فازی آن را تعدیل می‌کند.

۴.۱ .مزایای ترکیب فازی WOA

تأثیر در نتایج	مزیت
پروفیل ولتاژ پایدارتر (۰,۹۵۰۶۴ تا ۰,۹۹۵۲۲ pu)	کاهش حساسیت به عدم‌قطعیت بار
جلوگیری از افزایش EDNS در نفوذ بالا	جلوگیری از نصب DG بیش از حد
تعداد تکرار کمتر، نتایج تکرارپذیر	همگرایی سریع‌تر و پایدارترWOA
قوانین فازی قابل درک برای اپراتور شبکه هستند	تفسیرپذیری بالا

۴.۲. شاخص‌های قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان شبکه توزیع قبل و بعد از نصبDG ها با استفاده از شاخص‌های استاندارد بین‌المللی ارزیابی شده است. مهم‌ترین شاخص‌هایی که در فصل چهارم و جدول‌های ۴-۵ و ۴-۶ محاسبه و مقایسه شده‌اند، به همراه تعریف دقیق، فرمول و مقدار به‌دست‌آمده در پژوهش شما در جدول زیر خلاصه شده‌اند:

ردیف	شاخص	نام کامل	واحد	تعریف عملیاتی	مقدار در حالت پایه (بدون DG)	مقدار نهایی با روش پیشنهادی (فازی + WOA)	توضیح
۱	SAIFI	System Average Interruption Frequency Index میانگین دفعات قطع سیستم	قطع/مشتری-سال	میانگین تعداد دفعاتی که هر مشتری در سال قطع می‌شود	—	—	شبیه‌سازی استاتیک)
۲	SAIDI	System Average Interruption Duration Index میانگین مدت قطع سیستم	ساعت/مشتری-سال	میانگین مدت زمانی که هر مشتری در سال بدون برق می‌ماند	—	—	(استاتیک)
۳	CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index میانگین مدت قطع هر مشتری	ساعت/قطع	میانگین زمان لازم برای وصل مجدد پس از هر قطعی	—	—	—
۴	ASAI	Average Service Availability Index شاخص متوسط در دسترس بودن سرویس	(۰–۱) پریونیت	درصد زمانی که برق در دسترس است (۱ = ۱۰۰٪)	—	—	—
۵	**LOLP**	**Loss of Load Probability** احتمال از دست رفتن بار	(۰–۱) پریونیت	احتمال اینکه در یک بازه زمانی مشخص، تولید DG + کافی برای تأمین بار نباشد	**۰,۰۱۲۵۳۶**	**۰,۰۱۲۵۳۶** (بدون تغییر)	تقریباً ثابت
۶	**LOLE**	**Loss of Load Expectation** انتظار از دست رفتن بار	ساعت/سال	تعداد ساعت‌های مورد انتظار در سال که بار تأمین نمی‌شود	**۱۲۴,۵۳۶**	**۱۲۴,۵۳۶** (بدون تغییر)	تقریباً ثابت

ردیف	شاخص	نام کامل	واحد	تعریف عملیاتی	مقدار در حالت پایه (DG بدون)	مقدار نهایی با روش پیشنهادی (فازی + WOA)	توضیح
۷	**EDNS** یا **EENS**	**Expected Demand Not Supplied** یا **Expected Energy Not Supplied** انرژی مورد انتظار تأمین‌نشده	مگاوات-ساعت/سال یا کیلووات-ساعت/سال	مقدار انرژی که در سال به‌دلیل کمبود تولید یا محدودیت شبکه تأمین نمی‌شود	**۱۰,۹۳۱**	**۱۱,۱۱۵** (افزایش)	مهم‌ترین شاخص کمی
۸	**LOEE**	Loss of Energy Expectation انتظار از دست رفتن انرژی	مگاوات-ساعت/سال	همان EDNS/EENS (در برخی منابع به‌جای هم استفاده می‌شود)	—	بالاترین مقدار در سناریوی ۴ (شکل ۴-۱۲)	برای مقایسه سناریوها

نتایج

- LOLPو LOLE تقریباً ثابت ماندند ⟵ نصب DG بهینه تأثیر قابل‌توجهی روی احتمال و مدت قطع بار نداشت(به‌دلیل شبیه‌سازی استاتیک و فرض در دسترس بودن ٪۱۰۰DG ها.)
- EDNS/EENS با افزایش تعداد و نفوذ DG کمی افزایش یافت (از ۱۰,۹۳۱ به ۱۱,۱۱۵) ⟵ نشان‌دهنده اثر منفی احتمالی «نفوذ بیش‌ازحد «DG بدون مدیریت صحیح.
- این افزایش جزئی با استفاده از برنامه‌های مدیریت بار سمت تقاضا (Demand Response – DR) مبتنی بر بارهای حساس به قیمت (Interruptible/Curtailable loads) جبران شد ⟵ که دقیقاً همان نتیجه‌گیری مهم فصل پنجم است.

نتیجه‌گیری نهایی درباره قابلیت اطمینان

بهینه‌سازی مکان و اندازه DG با روش فازی WOA + باعث بهبود چشمگیر تلفات و ولتاژ شد، اما برای جلوگیری از کاهش اندک قابلیت اطمینان در سطوح نفوذ بالا، استفاده همزمان از برنامه‌های DR ضروری است.

این چهار شاخصLOLP ، LOLE، EDNSو LOEE مهم‌ترین معیارهای قابلیت اطمینان پایان نامه هستند و در جداول ۵-۴، ۶-۴ و شکل ۱۲-۴ به‌صورت کامل مقایسه شده‌اند.

روش‌شناسی

۳,۱ .مدل‌سازی مسئله

تابع هدف اصلی، کمینه‌سازی تلفات توان اکتیو است:

$ P_{loss} = \sum_{i=1}^{N} R_i \cdot I_i^2 $

با قیود ولتاژ (۰,۹۵ تا ۱,۰۵ پریونیت) و ظرفیت.DG

۳,۲ .رویکرد فازی

رویکرد فازی یکی از اجزای اصلی روش پیشنه [method]است که برای **مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌های موجود در بار مصرفی و ظرفیت تولید DG** به‌کار گرفته شده است. این رویکرد با ترکیب منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ(WOA) ، امکان حل مسئله مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینهDG ها را در شرایط واقعی‌تر و انعطاف‌پذیرتر فراهم کرده است.

دلیل انتخاب رویکرد فازی

- عدم‌قطعیت‌های بار (تغییرات روزانه، فصلی و تصادفی) و تولیدDG های تجدیدپذیر (مانند خورشیدی و بادی) را نمی‌توان با مدل‌های دقیق ریاضی (کریسپ) به‌خوبی توصیف کرد.
- منطق فازی اجازه می‌دهد متغیرها به‌صورت «تقریبی» و با درجه عضویت (بین ۰ و ۱) مدل شوند، که مشابه تصمیم‌گیری انسانی است.
- این رویکرد خطاهای ناشی از تغییرات ناگهانی بار را کاهش داده و از پیشنهاد اندازه‌های نامناسب DG توسط الگوریتم جلوگیری می‌کند.

گام‌های اصلی رویکرد فازی در پژوهش

۱. **فازی‌سازی :(Fuzzification)** تبدیل مقادیر دقیق (کریسپ) ورودی‌ها به درجه عضویت در مجموعه‌های فازی.
۲. **استنتاج فازی :(Fuzzy Inference)** اعمال قوانین فازی (If-Then) برای تصمیم‌گیری.
۳. **غیرفازی‌سازی :(Defuzzification)** تبدیل خروجی فازی به مقدار دقیق (کریسپ) برای استفاده در الگوریتم.WOA

اجزای سیستم فازی پیشنهادی

- **ورودی‌ها (۳ متغیر):**
  - تغییر ولتاژ(ΔV)
  - تغییر زاویه فاز(Δθ)
  - تلفات سیستم(P_loss)
- **خروجی (۱ متغیر):**
  - توان اکتیو پیشنهادی(P_DG) DG
- **توابع عضویت** :عمدتاً مثلثی (Triangular) با ۳ سطح زبانی) Low – Medium – High :برای سادگی و دقت مناسب.(
- **قوانین فازی** :۲۷ قانون از نوعMamdani ، بر اساس آزمون و خطا و دانش حوزه) عملگر AND با.(Min-Max
- **روش غیرفازی‌سازی** :مرکز ثقل – (Centroid) دقیق و پرکاربرد.

نحوه ادغام رویکرد فازی با الگوریتمWOA

۱. WOAیک کاندیدای مکان و اندازه DG پیشنهاد می‌دهد.
۲. پخش بار انجام می‌شود ⟵ مقادیرΔV ، ΔθوP_loss محاسبه می‌گردد.
۳. این مقادیر به سیستم فازی وارد می‌شوند.
۴. سیستم فازی یک **توان پیشنهادی تعدیل‌شده** (P_DG,fuzzy)خروجی می‌دهد.
۵. WOAاز این خروجی برای اصلاح اندازه DG در تکرارهای بعدی استفاده می‌کند.
۶. نتیجه: اندازه DG نه تنها بر اساس اهداف ریاضی، بلکه با توجه به شرایط واقعی شبکه تنظیم می‌شود.

مزایای رویکرد فازی در نتایج پژوهش

- **پایداری بیشتر پروفیل ولتاژ** :دامنه ولتاژ از ۰,۹۵۰۶۴ تا ۰,۹۹۵۲۲ پریونیت (نزدیک به ایده‌آل).
- **کاهش حساسیت به عدم‌قطعیت** :حتی در تغییرات بار، تلفات اکتیو به ۱۶۵,۸۹ کیلووات محدود شد.
- **جلوگیری از نفوذ بیش‌ازحد DG**: تعدیل هوشمند اندازه برای جلوگیری از اثرات منفی روی قابلیت اطمینان) مانند افزایش جزئی.(EDNS
- **تفسیرپذیری بالا** :قوانین فازی قابل درک و تنظیم توسط اپراتورهای شبکه هستند.

خلاصه نقش رویکرد فازی

رویکرد فازی به‌عنوان «لایه هوشمند تعدیل‌کننده» عمل کرد که محدودیت‌های الگوریتم‌های فرابتکاری خالص (مانند پیشنهاد اندازه‌های غیرواقعی) را جبران نمود و روش پیشنهادی را به یک راه‌حل عملی و مقاوم در برابر عدم‌قطعیت تبدیل کرد. این ترکیب (Fuzzy + WOA)یکی از نوآوری‌های اصلی پایان‌نامه شماست و نتایج برتر آن در مقایسه با روش‌های بدون فازی (سناریوهای دوم و سوم) به‌خوبی نشان‌دهنده اثربخشی آن است.

۳,۳ .الگوریتمWOA

جمعیت اولیه نهنگ‌ها به صورت تصادفی تولید شده و موقعیت‌ها بر اساس توابع هدف به‌روزرسانی می‌شوند. مرز پارتو برای اهداف چندگانه تشکیل می‌شود.

۳,۴ .شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در MATLAB با شبکه ۳۳ شینه انجام شد. سناریوها: پایه، بدون قابلیت اطمینان، با قابلیت اطمینان.

نتایج

۴,۱ .پروفیل ولتاژ و تلفات

در حالت پایه، حداقل ولتاژ ۰,۹۰۳۷۸ پریونیت و تلفات ۲۱۰,۹۹ کیلووات بود. پس از اعمال روش، حداقل ولتاژ به ۰,۹۵۰۶۴ پریونیت .(شین ۲۷) و تلفات به ۱۶۵,۸۹ کیلووات کاهش یافت. توان راکتیو ۴۳,۹۶۸ کیلووار

۴,۲ .مکان و ظرفیتDG

.بهترین مکان‌ها: شین‌های ۲۸ (۱۰ مگاوات)، ۲۱ (۸ مگاوات)، ۱۲ (۷ مگاوات)

۴,۳ .قابلیت اطمینان

- نصب بهینه DG با روش فازی WOA + باعث **بهبود چشمگیر تلفات و ولتاژ** شد، اما شاخص EDNS کمی افزایش یافت (نشان‌دهنده اثر منفی احتمالی نفوذ بالا).
- این افزایش جزئی با برنامه‌های مدیریت بار سمت تقاضا (Demand Response - DR) مبتنی بر بارهای حساس به قیمت (Interruptible/Curtailable loads) جبران شد.
- نتیجه‌گیری اصلی DG :بهینه‌شده نقش مثبت دارد، اما برای حفظ یا افزایش قابلیت اطمینان در سطوح نفوذ بالا، باید با DRترکیب شود.

اهمیت قابلیت اطمینان در عمل

- کاهش زمان و دفعات قطعی ⟵ رضایت مشترکان و کاهش جریمه‌های قانونی.
- در شبکه‌های مدرن (شبکه هوشمند، میکروشبکه) قابلیت اطمینان یکی از اهداف اصلی برنامه‌ریزی است.
- استانداردهای بین‌المللی مانند IEEE Std 1366 این شاخص‌ها را برای ارزیابی عملکرد شرکت‌های توزیع الزامی می‌دانند.

قابلیت اطمینان به‌عنوان یکی از سه هدف اصلی (همراه با کاهش تلفات و بهبود ولتاژ) در نظر گرفته شد و روش پیشنهادی نشان داد که با مدیریت هوشمند فازی می‌توان تعادل مناسبی بین این اهداف برقرار کرد.

بحث

نتایج نشان‌دهنده بهبود ٪۲۱ در تلفات و ٪۵ در پروفیل ولتاژ است. ترکیب فازی WOA-عدم‌قطعیت‌ها را مدیریت کرده و نسبت به روش‌های سنتی مانند GA برتر است [۸]. محدودیت: عدم دسترسی به داده‌های واقعی شبکه توزیع.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مکان‌یابی و اندازه‌گیری بهینه منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه توزیع برق، با درنظرگیری عدم‌قطعیت‌های بار و تولید، و همزمان توجه به شاخص‌های فنی (تلفات و پروفیل ولتاژ) و قابلیت اطمینان، انجام شد. روش پیشنهادی مبتنی بر ترکیب رویکرد منطق فازی و الگوریتم بهینه‌سازی نهنگ (WOA) بود که در محیط MATLAB روی شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE پیاده‌سازی و ارزیابی گردید.

خلاصه مهم‌ترین دستاوردها

- کاهش چشمگیر تلفات :تلفات توان اکتیو از حدود ۲۱۱ کیلووات (حالت پایه) به ۱۶۵,۸۹ کیلووات کاهش یافت (کاهش حدود ٪۲۱,۴).
- بهبود پروفیل ولتاژ :حداقل ولتاژ شبکه از ۰,۹۰۳۷۸ پریونیت به ۰,۹۵۰۶۴ پریونیت ارتقا یافت و حداکثر به ۰,۹۹۵۲۲ پریونیت رسید ⟵ نوسانات ولتاژ به حداقل رسید.

- ارتقای ضریب توان :میانگین ضریب توان اکتیو به ۱۱۰۲,۸۷ افزایش یافت و تلفات راکتیو به ۴۳,۹۶۸ کیلووار محدود شد.
- قابلیت اطمینان :شاخص‌های LOLP و LOLE تقریباً ثابت ماندند، اما EDNS با نفوذ بالای DG کمی افزایش یافت (از ۱۰,۹۳۱ به ۱۱,۱۱۵ کیلووات-سال) ← این اثر منفی با برنامه‌های مدیریت بار سمت تقاضا (DR) مبتنی بر بارهای حساس به قیمت به‌طور مؤثر جبران شد.

نوآوری‌ها و نقاط قوت روش پیشنهادی

- استفاده از منطق فازی برای مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها، که اندازه DG پیشنهادی توسط WOA را به‌صورت هوشمند تعدیل کرد و از پیشنهادهای غیرواقعی جلوگیری نمود.
- بهره‌گیری از نسخه چندهدفه الگوریتم نهنگ (MOWOA) با مرز پارتو، که تعادل مناسبی بین کاهش تلفات، بهبود ولتاژ و حفظ قابلیت اطمینان برقرار کرد.
- ادغام مدیریت بار (DR) به‌عنوان مکمل، که پایداری شبکه در سطوح نفوذ بالای DG را تضمین کرد.

اهمیت عملی نتایج

روش پیشنهادی نه تنها عملکرد فنی شبکه توزیع را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید، بلکه با کاهش نیاز به توسعه پرهزینه شبکه و تسهیل ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر، به اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و پایداری انرژی کمک می‌کند. این راهکار می‌تواند به‌عنوان ابزاری عملی برای اپراتورهای شبکه توزیع در ایران و سایر کشورها مورد استفاده قرار گیرد

پیشنهادات برای تحقیقات آتی

- ادغام ذخیره‌سازهای انرژی (ESS) با DG برای مدیریت بهتر نوسانات تجدیدپذیر.
- بررسی روش در شبکه‌های هوشمند واقعی با داده‌های میدانی و سناریوهای دینامیکی.
- توسعه مدل با درنظرگیری هزینه‌های اقتصادی و آلودگی زیست‌محیطی به‌عنوان اهداف اضافی.
- ترکیب با الگوریتم‌های نوین‌تر مانند نسخه‌های بهبودیافته WOA (Chaotic WOA یا Hybrid WOA).

در نهایت، این پژوهش نشان داد که ترکیب هوش مصنوعی (منطق فازی + الگوریتم نهنگ) همراه با مدیریت فعال بار، راه‌حلی قدرتمند، انعطاف‌پذیر و عملی برای چالش‌های مدرن شبکه‌های توزیع برق ارائه می‌دهد و گامی مؤثر در جهت شبکه‌های پایدار و هوشمند آینده است.

منابع

[۱] Kumar, M., et al. (۲۰۲۲). Energies, ۱۵(۲۱), ۷۸۵۰.

[۲] Yan, X., & Zhang, Q. (۲۰۲۳). Sustainability, ۱۵(۱۲), ۹۵۸۰.

[۳] Zishan, F., et al. (۲۰۲۳). Int. J. Ind. Electron. Control Optim., ۶(۲), ۸۹-۱۰۰.

[۴] Ntombela, M., et al. (۲۰۲۲). Computation, ۱۰(۱۰), ۱۸۰.

[۵] Salam, I. U., et al. (۲۰۲۳). Energies, ۱۶(۱۶), ۵۹۰۷.

[۶] Paramasivam, M., et al. (۲۰۱۳). IEEE Trans. Power Syst., ۲۸(۴), ۳۸۶۵-۳۸۷۳.

[۷] Schlabbach, J., & Rofalski, K. H. (۲۰۱۴). Power System Engineering.

[۸] Kumar, D., & Samantaray, S. R. (۲۰۱۵). IEEE PCITC.

[۹] Reddy, P. D. P., et al. (۲۰۱۷). Whale optimization algorithm for optimal sizing of renewable resources for loss reduction in distribution systems. *Sustainable Energy Research*, ۴, Article 3.

[۱۰] Ang, S., & Leeton, U. (۲۰۱۹). Optimal placement and size of distributed generation... *Suranaree J. Sci. Technol.*, ۲۶(۱), ۱–۱۲.

[۱۱] Yehia, M., et al. (۲۰۲۲). A Novel Hybrid Fuzzy-Metaheuristic Strategy