ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند برای حل پخش‌بار احتمالی جهت برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از ریزشبکه‌ها

نیما نیک مهر[1] سجاد نجفی روادانق [2]

۱- کارشناسی ارشد- آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند-گروه مهندسی برق-دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان
nima.alamdari@yahoo.com, n.nikmehr.eng@ieee.org

۲- دانشیار- آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند-گروه مهندسی برق-دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان
s.najafi@azaruniv.edu

چکیده: یکی از مهم‌ترین اجزای شبکه‌توزیع در آینده منابع انرژی تجدیدپذیر هستند. عدم‌قطعیت در تولید توان منابع تجدیدپذیر از قبیل توربین بادی و سیستم خورشیدی و همچنین میزان بار مصرفی از دیگر ویژگی‌های این شبکه‌ها می‌باشد. روش‌های پخش‌بار معمولی به‌عنوان یک ابزار اساسی در مطالعات سیستم قدرت، ممکن است برای شبکه‌های فعال یا هوشمند از قبیل ریزشبکه‌ها مناسب نباشد. در این مقاله یک روش پخش‌بار مبتنی بر الگوریتم هیورستیک با در نظر گرفتن تاثیر رفتارهای احتمالی و نوسانی منابع انرژی تجدیدپذیر و بار به‌صورت الگوریتم پخش‌بار احتمالی مدل می‌شود. الگوریتم رقابت استعماری به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند برای فرمول‌بندی و حل مسئله پخش‌بار احتمالی به‌کار برده می‌شود. براساس تکنینک پخش‌بار احتمالی پارامترهای محاسبه‌شده سیستم از قبیل ولتاژ باس‌ها و جریان فیدرها به‌عنوان متغیرهای تصادفی هستند. جهت بررسی کارامدی و قابلیت روش ارائه‌شده از شبکه ۳۳ باسه شعاعی-حلقوی ضعیف ارتقاء یافته IEEE با منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود. نتایج به‌دست آمده با روش ارائه شده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه می‌شود. توابع توزیع احتمالی و تجمعی ولتاژ باس‌ها، توان عبوری از خطوط و تلفات کل شبکه حاصل از این دوروش باهم مقایسه می‌شوند.

کلمات کلیدی: پخش‌بار احتمالی، شبکه‌های توزیع هوشمند، عدم قطعیت، الگوریتم رقابت استعماری، روش شبیه‌سازی مونت کارلو.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۳۰

نام نویسنده مسئول: سجاد نجفی روادانق

نشانی نویسنده مسئول: آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های توزیع هوشمند-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر-دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

۱- مقدمه

عدم قطعیت های زیادی در سیستم های توزیع برق در سراسر جهان وجود دارد که عمده ی آنها بدلیل الگوی تجدید ساختار از یک سو وتوسعه روز افزون انرژی های نو از سوی دیگر موجب شده است .در چنین سیستم هایی با پارامتر های احتمالاتی، پخش بار قطعی نمی تواند وضعیت دقیقی از آن سیستم ها را نشان دهد. بنابراین آنالیزهای احتمالاتی به‌عنوان راهکاری جذاب پیش رو قرار می‌گیرند. از آنجا که شرایط سیستم قدرت به طور مداوم (به دلایل متعدد چون تغییر بار باس ها، تغییر توان تولیدی ژنراتورها و قطع خطوط) در حال تغییر است برای ارزیابی شبکه تحت شرایط مختلف نیاز به اجرای پخش بارهای متعدد است .از آنجاکه سیستم قدرت با نفوذ روزافزون منابع تجدیدپذیر با مشخصه های تصادفی روبروست نیاز به محاسبات متنوع پخش بار در نقاط کاری مختلف سیستم مطرح می شود .پخش بار احتمالاتی ابزاری مناسب برای ارزیابی کارایی سیستم قدرت در محدوده کاری محتمل آن است [۱]. با تعریف متغیرهای ورودی تصادفی پخش بار، امکان تعیین رفتار احتمالاتی متغیرهای خروجی فراهم خواهد شد .پخش بار احتمالاتی با تأمین کردن اطلاعاتی در نقاط کار متنوع سیستم قدرت، دارای کاربرد وسیعی در مطالعات طراحی سیستم قدرت است.

پخش بار احتمالاتی نخستین بار در سال ۱۹۷۰ در [۲] مطرح شد . در این روش، شبکه با مدل DC نمایش داده می شود و با فرض مستقل بودن بار باس‌ها از یکدیگر ابتدا پخش بار سنتی (قطعی) اجرا می‌شود. در این پخش‌بار، بارها بر اساس مقدار متوسط تعریف شده خود هستند. در مرجع [۳] مسئله با در نظر گرفتن مدل AC شبکه موردبحث قرار گرفته شده است. در مرجع[۴] پخش بار احتمالاتی به حوزه سه فاز بسط داده شده است تاعدم قطعیت هایی که تحت تاثیرشرایط عملیاتی حالت ماندگار یک سیستم قدرت نامتعادل می باشند، موردارزیابی قرارگیرند.

از نتایج حاصل از مسئله پخش‌بار احتمالی می‌توان در سایر مطالعات سیستم قدرت استفاده کرد. مثلاً موضوع کنترل ولتاژ باابزارهای کنترل سیستم ازطریق مسئله پخش بار احتمالی در مراجع [۵-۶] موردتحقیق قرارگرفته شده است. موضوع اساسی دراین مراجع کنترل متغیرهایی از قبیل تپ های ترانسفورماتور، تجهیزات جبرانساز موازی و ولتاژها درباس های کنترل ولتاژ درمسئله پخش بار می باشد چرا که این متغیرها دارای رفتارهای احتمالاتی هستند. یکی دیگر از کاربردهای پخش بار بهینه احتمالاتی در مبحث بازار برق می‌باشد. باتوجه به عدم قطعیت در برخی از پارامترهای سیستم قدرت، استفاده از ابزار احتمالی در مبحث بازار برق اجتناب ناپذیر می‌باشد. برای تعیین قیمت برق از طرف شرکت‌ها، در مرجع [۷] از پخش بار بهینه با تحلیل احتمالی بهره گرفته شده است تا تاثیر رفتار شرکت‌کنندگان برروی هزینه برق مورد ارزیابی قرار گیرد.

برای حل مسئله پخش بار احتمالاتی روش های متعددی ارائه شده‌اند که در یک دسته بندی کلی در یکی از دسته های زیر جای می‌گیرند:

- روش عددی یا تکنیک مونت کارلو که یکی از رایج ترین شیوه‌ها در حل مسئله پخش‌بار احتمالی است. در این روش برای متغیرهای غیرقطعی مسئله تعدادی مقادیر به‌صورت تصادفی باتوجه به توابع توزیع احتمالی این متغیرها تولید می‌شوند و مسئله به‌صورت قطعی برای تمام این مقادیر حل می‌شود. مزیت اصلی این روش در سادگی پیاده‌سازی و اجرای آن است، هرچند نیاز به انجام شبیه‌سازی‌های زیاد جهت رسیدن به همگرایی از نقاط ضعف آن به‌شمار می‌رود [۸].
- روش‌های تقریبی از قبیل روش تخمین دو نقطه‌ای که در آن تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی با دو نقطه متمرکز در زیر و بالای مینگین تقریب زده می‌شود. بنابراین برای هر متغیر تصادفی و به‌ازاء هریک از این نقاط یک‌بار مسئله پخش بار قطعی اجرا خواهدشد [۹].
- روش تحلیلی که در آن بااستفاده از ترکیب مفهوم کمولانت و بسط سری گرام-چارلیر، تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی بدست می‌آید [۱۰].

در مرجع [۱۱] سه روش مختلف حل مسئله پخش‌بار بهینه احتمالاتی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. طبق نتایج بدست آمده، روش مونت کارلو به دلیل عدم استفاده ار روش‌های تقریبی جهت رسیدن به نتایج دقیق‌تر نیازمند نمونه‌گیری‌های بیشتری از داده‌های ورودی است. به‌طور کلی برای سیستم‌های با نمونه‌های بالاتر روش مونت کارلو و برای سیستم‌های با نمونه‌گیری کمتر روش تخمین نقطه‌ای مناسب هستند. روش تخمین دو نقطه‌ای معمولی قادر به در نظر گرفتن ارتباط و همبستگی بین پارامترهای متغیر ورودی نمی‌باشد. در [۱۲] روش تخمین دو نقطه‌ای اصلاح شده برای در نظر گرفتن این همبستگی در حل مسئله پخش‌بار احتمالی ارائه شده است. در [۱۳] از تکنیک نمونه‌گیری یکنواخت برای ایجاد ارتباط بین متغیرهای ورودی استفاده کرده است. روش مونت کارلو مبتنی بر پخش‌بار فازی در [۱۴] ارائه شده است. طبق این روش، برای شبکه‌های شعاعی در برخی نمونه‌ها از روش جاروب پسرو-پیشرو به‌کار برده می‌شود.

در [۱۵]، روش کنترل بهینه به‌منظور بررسی پایداری یک ریزشبکه جزیره‌ای مورد تحقیق قرار گرفته است. در مرجع [۱۶]، از سیستم های قدرت بهم پیوسته با نواحی انرژی مقیاس کوچک و جریان مستقیم برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه استفاده شده است. در این راستا، در تحقیقات تازه از ریزشبکه‌های چندگانه برای بهره‌برداری سیستم‌های انرژی بهره گرفته می‌شود. برای نمونه در مرجع [۱۷-۱۸]، از ریزشبکه‌های بهم پیوسته جهت کمینه سازی هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبکه‌ها و همچنین کاهش آلاینده‌ها با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت طرف بار و تولید استفاده شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]

در مقاله ارائه شده، از یک روش جدید که برای اولین بار مطرح می‌شود، برای حل مسئله پخش‌بار احتمالی بهره گرفته می‌شود. روش ارائه شده مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند می‌باشد. با استفاده از روش ارائه شده دامنه ولتاژ باس‌ها، زاویه فاز ولتاژ شینه ها و حتی توان‌های عبوری از خطوط شبکه اعم از توان‌های اکتیو و راکتیو وهمچنین تلفات شبکه که همگی به‌عنوان نتایج خروجی هستند، در فرم تابع توزیع احتمالی یا در قالب تابع توزیع تجمعی نشان داده می‌شوند.

سهم اصلی و نوآوری مقاله را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

حضور منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع سنتی، نه‌تنها باعث تغییر ساختار شبکه توزیع از حالت شعاعی به حالت شعاعی-حلقوی می‌شود بلکه به‌خاطر عدم‌قطعیت‌ها و نوسانات منابع تولید پراکنده و بارهای مصرفی، بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت تحت تاثیر قرار می‌گیرند. در شبکه‌های توزیع هوشمند که منابع تولید پراکنده نقش اساسی در تولید توان دارند، نسبت مقاومت به راکتانس (R/X) بالا بوده و همواره در حال تغییر می‌باشد. در این شرایط روش‌هایی مانند نیوتن-رافسون و جاروب پسرو و پیشرو توانایی حل مسئله پخش‌بار در محیط ریزشبکه‌ها را نخواهند داشت. روش نیوتن-رافسون برای شبکه‌های حلقوی و روش جاروب پسرو و پیشرو برای شبکه‌های شعاعی مناسب هستند. یکی از مزیت‌های روش ارائه شده در این مقاله حل مسئله پخش‌بار درحضورمنابع تولید پراکنده با نرخ R/X بالا می‌باشد که بدون در نظر گرفتن ساختار شبکه قادر به حل مسئله با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی است. برای نشان دادن صحت، درستی و حتی دقت روش ارائه شده، نتایج بدست آمده با نتایج حاصله از روش مونت کارلو که دقیق‌ترین روش در حوزه پخش بار احتمالی تلقی می‌شود، مقایسه خواهند شد.

۲- مدل احتمالی بار مصرفی

بار تا حد زیادی به فعالیت های بشری و فاکتور زمانی بستگی دارد. تغییرات بار بصورت پیوسته می باشد و این تغییرات با عدم قطعیت همراه است. در تئوری احتمالات، بار غیر قطعی می تواند توسط تابع چگالی احتمالی که مناسب رفتار بار در هر لحظه می‌باشد، تنظیم شود. به‌عبارتی در پخش بار قطعی، بارهای مصرفی بصورت ثابت و بدون هیچ تغییری در نظر گرفته می شوند. در حالیکه در عمل و واقعیت بارها در هر لحظه از زمان در حال تغییرند و برای مدل کردن این تغییرات از تابع توزیع احتمالی بجای عدد ثابت بهره گرفته می شود. در این مقاله ازتابع توزیع نرمال برای مدل‌سازی بار در هر باس استفاده می‌کنیم. تابع چگالی احتمال برای توزیع نرمال بر حسب امید ریاضی و واریانس تعریف می‌شود.و تابع آن به صورت زیر است [۱۹-۲۰]:

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}] \qquad (۱)$$

در رابطه بالا x نشان‌دهنده متغیر تصادفی یا توان مصرفی می‌باشد که به‌ازای هر x یک عدد برای تابع f(x) به‌دست می‌آید. میزان بارهای اکتیو و راکتیو مصرفی در هر باس را براساس میزان پراکندگی بارها از مقدار میانگین می‌توان به‌صورت زیر نیز بیان کرد:

$$P_{l,i}^{sch}=P_{l,i0}^{sch}+r\Delta P_l P_{l,i0}^{sch}$$
$$Q_{l,i}^{sch}=Q_{l,i0}^{sch}+r\Delta Q_l Q_{l,i0}^{sch}$$
$$r\in(-1,1)$$
$$0<\Delta P_l<P_{l,i0}^{sch}$$
$$0<\Delta Q_l<Q_{l,i0}^{sch} \qquad (۲)$$

در رابطه بالا، $P_{l,i}^{sch}$ و $Q_{l,i}^{sch}$ به‌ترتیب توان‌های حقیقی و غیرحقیقی مصرفی برنامه‌ریزی شده در باس i است. $P_{l,i0}^{sch}$ و $Q_{l,i0}^{sch}$ توان‌های اولیه حقیقی و غیرحقیقی مصرفی برنامه‌ریزی شده در باس i، r عددی تصادفی بین ۱- و ۱+ می‌باشد. ΔP_l و ΔQ_l تعیین کننده میزان انحراف توان‌های اکتیو و راکتیو از مقدار اولیه هستند. به‌عبارتی توان‌های حقیقی و راکتیو مصرفی به‌ترتیب به اندازه ΔP_l و ΔQ_l درهر نمونه از مقدار میانگین توان‌ها فاصله می‌گیرد که مقدار r این فاصله یا پراکندگی را می‌تواند تنظیم نماید.

۳- مدل احتمالی توان تولیدی توربین بادی

سرعت باد به‌طور پیوسته درحال تغییر است. میزان متوسط مشخص شده برای یک منطقه خاص صرفاً نمی‌تواند میزان تولید توربین بادی نصب شده در آن منطقه را مشخص کند. برای مشخص کردن فراوانی سرعت باد در یک منطقه در چنین حالتی می‌توان از توابع توزیع احتمالی بهره گرفت. تابع توزیعی که در مدل‌سازی سرعت باد کاربرد بیشتری دارد، توزیع ویبال[×] است. در بسیاری از مطالعات انجام شده، پیشنهاد شده است تا از توزیع ویبال به عنوان تابع توزیع احتمالاتی سرعت باد استفاده شود [۲۱]. رابطه (۳) رابطه عمومی یک توزیع ویبال با متغیر X را با پارامتر مقیاس λ (Scale) و پارامتر شکل K (Shape) بیان می کند:

$$\text{Weibull}(\lambda,K)=\lambda K X^{K-1}\exp[-\lambda X^K] \qquad (۳)$$

برای سرعت باد از همین توزیع احتمالی بر اساس رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$f(V)=\frac{h}{c}(\frac{v}{c})^{h-1}\exp[-(\frac{v}{c})^h] \qquad (۴)$$

× Weibull distribution function

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

پارامترهای h و c به‌ترتیب نشان‌دهنده پارامترهای شکل و مقیاس برای سرعت باد v هستند. در این مقاله مقادیر h و c به‌ترتیب ۲ و ۹ در نظر گرفته می‌شوند.

در یک توربین بادی توان خروجی متأثر از سرعت باد بوده و یک رابطهٔ غیرخطی بین این دو پارامتر وجود دارد. منحنی مشخصه "توان-سرعت" توربین‌های بادی، مقدار توان اکتیو تولیدی توربین بادی را به ازای سرعت های مختلف باد نشان می دهد و توسط رابطه زیر قابل بیان است [۲۲]:

$$P_{WT}(v)=\begin{cases}0 & 0\le v\le v_{ci}\ \text{or}\ v_{co}\le v\\ P_{WT,r}\times\dfrac{v^2-v_{ci}^2}{v_r^2-v_{ci}^2} & v_{ci}\le v\le v_r\\ P_{WT,r} & v_r\le v\le v_{co}\end{cases} \quad (۵)$$

v_{ci}، v_r، v_{co} به‌ترتیب سرعت وصل، سرعت نامی و سرعت قطع بالا هستند. $P_{WT,r}$ سرعت نامی توربین بادی است.

۴- مدل احتمالی توان تولیدی سیستم‌های خورشیدی

دو عامل مهمی که باعث ایجاد تغییرات و رفتار احتمالی در تولید توان سلول‌های خورشیدی هستند، میزان تابش اشعه خورشید و دمای محیط می‌باشند. برای تولید تابع توزیع احتمالی این پارامترها از چندتابع توزیع می‌توان بهره گرفت. در این مقاله از از تابع توزیع نرمال برای مدل‌سازی پارامترهای مربوطه استفاده می‌شود.

بعداز مدل‌سازی تابش خورشید و دمای محیط با تابع توزیع احتمالی از رابطه زیر برای بدست آوردن میزان تولید توان خورشیدی در فرم تابع توزیع احتمالی استفاده می‌شود:

$$P_{pv}=P_{STC}\times\frac{G_{ING}}{G_{STC}}\times(1+k_\alpha(T_c-T_r)) \quad (۶)$$

میزان تابش خورشید و دمای محیط در شرایط استاندارد به‌ترتیب $G_{STC}=1000W/m^2$ و $T_r=25^\circ C$ در نظر گرفته می‌شود. G_{ING} میزان تابش اشعه خورشید، T_c دمای پیرامون سلول و k_α ضریب دما به ازای توان حداکثر.

۵- حل مسئله پخش‌بار احتمالی با الگوریتم هوشمند ICA

۵-۱- فرمول‌بندی مسئله

دراین بخش روشی مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند برای حل مسئله پخش‌بار ارائه می‌گردد. روش ارائه شده به‌دلیل وجود محدودیت‌های موجود در روش‌های کلاسیک در حضور منابع تولید پراکنده و در حضور شبکه‌های هوشمند معرفی می‌گردد. هدف از الگوریتم‌های هوشمند یا بهینه‌سازی کمینه‌سازی یا به‌عبارتی دیگر مینیموم‌سازی یک یا چند تابع هدف می‌باشد. در روش ارائه شده نیز مسئله پخش‌بار به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. روابط پخش‌بار به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P_i^{cal}=V_i\sum_{j=1}^{N_b}Y_{ij}V_j\cos(\theta_{ij}-\delta_i+\delta_j) \quad (۷)$$

$$Q_i^{cal}=-V_i\sum_{j=1}^{N_b}Y_{ij}V_j\sin(\theta_{ij}-\delta_i+\delta_j) \quad (۸)$$

که، P_i^{cal} و Q_i^{cal} توان‌های اکتیو و راکتیو محاسباتی در باس i، θ_{ij} زاویه فاز ماتریس ادمیتانس بین شین i و j و N_b تعداد باس‌ها است.

توان‌های حقیقی و راکتیو برنامه‌ریزی شده در هر باس که به‌صورت خالص یا به‌عبارتی تفاضل توان تولیدی و مصرفی در هرباس است، بصورت زیر هستند:

$$P_i^{sch}=P_{ig}-P_{id} \quad (۹)$$

$$Q_i^{sch}=Q_{ig}-Q_{id} \quad (۱۰)$$

P_i^{cal} و Q_i^{cal} توان‌های اکتیو و راکتیو برنامه‌ریزی شده، P_{ig} و Q_{ig} میزان توان‌های حقیقی و غیرحقیقی تولیدی در باس i و P_{id} و Q_{id} میزان توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی در باس i هستند.

در روش‌های کلاسیک هرچقدر تفاضل توان‌های محاسبه شده و برنامه‌ریزی شده به عدد صفر نزدیک می‌شد، همگرایی روش بالاتر رفته و به جواب نهایی و دقیق نزدیک‌تر می‌شدیم. در حل مسئله با روش ارائه شده، الگوریتم‌های بهینه‌سازی این کار را انجام می‌دهند. تفاضل توان‌های محاسبه‌شده و برنامه‌ریزی شده حقیقی و راکتیو را به‌ترتیب با F_P و F_Q نشان می‌دهیم:

$$F_p=\sum_{\substack{i\in PV,PQ\\ buses}}^{Nb}\left|P_i^{cal}-P_i^{sch}\right| \quad (۱۱)$$

$$F_Q=\sum_{\substack{i\in PQ\\ buses}}^{Nb}\left|Q_i^{cal}-Q_i^{sch}\right| \quad (۱۲)$$

حال برای بهینه‌سازی مسئله پخش‌بار تابع هدف را به‌صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

$$\text{Minimize}:\{f(v,\delta)=F_P^2+F_Q^2\} \quad (۱۳)$$

تابع هدف بایستی در حضور برخی قیدهای نامساوی بهینه شود. این قیدها برای دامنه ولتاژ و زاویه فاز ولتاژ در هر گره و توان راکتیو تولیدی در باس‌های PV در نظر گرفته می‌شوند.

$$\left|V_{i,min}^{PQ}\right|<\left|V_i^{PQ}\right|<\left|V_{i,max}^{PQ}\right| \quad (۱۴)$$

$$\delta_{i,min}^{PV,PQ}<\delta_i^{PV,PQ}<\delta_{i,max}^{PV,PQ} \quad (۱۵)$$

$$Q_{i,min}^{G-PV}<Q_i^{G-PV}<Q_{i,max}^{G-PV} \quad (۱۶)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

از آنجاکه داده‌های ورودی در این مقاله دارای رفتار احتمالی هستند، خروجی‌های مسئله نیز با عدم قطعیت همراه خواهد بودکه در واقع می‌توان مسئله پخش‌بار احتمالی را بصورت زیر بیان کرد.

$$Y = h(X) \qquad (۱۷)$$

در مسئله پخش‌بار احتمالی ورودی‌های مسئله با X نشان داده می‌شوند و شامل توان‌های مصرفی در باس‌های PQ ($P_{l\text{-}PQ}$ و $Q_{l\text{-}PQ}$)، توان اکتیو مصرفی در باسبارهای PV ($P_{l\text{-}PV}$)، میزان دامنه ولتاژ در باس‌های PV و اسلک ($|V_{slack}|$ و $|V_{PV}|$) و میزان زاویه فاز ولتاژ در باس اسلک (δ_{slack}) است:

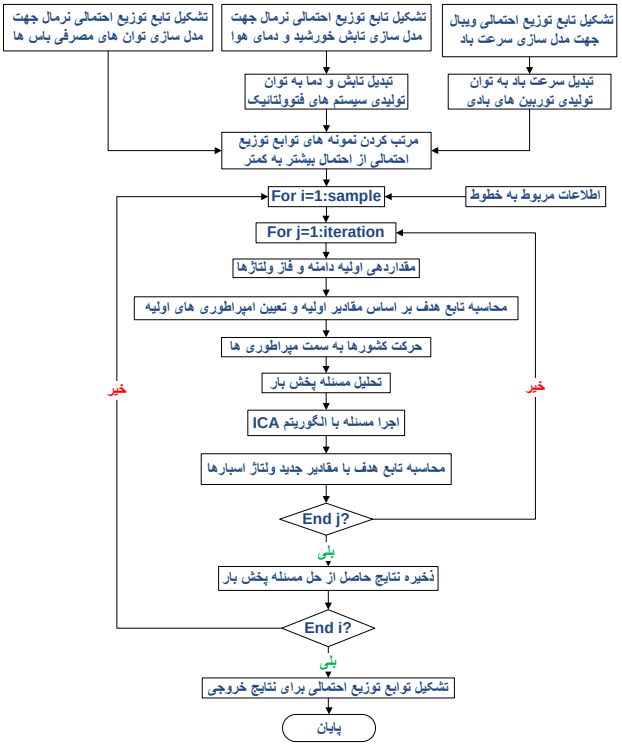
$$X=[P_{l\text{-}PQ}, Q_{l\text{-}PQ}, |V_{slack}|, |V_{PV}|, P_{l\text{-}PV}, \delta_{slack}] \qquad (۱۸)$$

نتایج خروجی با Y نشان داده شده و شامل توان‌های تولیدی باس اسلک ($P_{G\text{-}slack}$ و $Q_{G\text{-}slack}$)، توان راکتیو تولیدی باس‌های PV ($Q_{G\text{-}PV}$)، دامنه ولتاژ باس‌های PQ ($|V_{PQ}|$) و زاویه فاز ولتاژ باس‌های PV و PQ (δ_{PQ} و δ_{PV}) است.

$$Y=[P_{G\text{-}slack}, Q_{G\text{-}slack}, Q_{G\text{-}PV}, |V_{slack}|, |V_{PQ}|, \delta_{PQ}, \delta_{PV}] \qquad (۱۹)$$

۲-۵- الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

در این مقاله، الگوریتم مطرح شده برای بهینه‌سازی، که از مدل‌سازی ریاضی رقابت امپریالیستی الهام گرفته شده است، معرفی شده واجزای مختلف آن توضیح داده می‌شود .با داشتن تابع f(X) در بهینه سازی می‌خواهیم آرگومان x را به گونه ای بیابیم که هزینه متناظر آن بهینه باشد [۲۳].



شکل (۱): فلوچارت اجرای مسئله با روش ICA

الگوریتم رقابت استعماری، همانند سایر روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، با تعدادی جمعیت اولیه شروع می‌شود. در این الگوریتم، هر عنصر جمعیت، یک کشور نامیده می‌شود. کشورها به دو دسته مستعمره و استعمارگر تقسیم می‌شوند. هر استعمارگر، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود درآورده و آن‌ها را کنترل می‌کند. سیاست جذب و رقابت استعماری، هسته اصلی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند. در ارائه این الگوریتم، این سیاست با حرکت دادن مستعمرات یک امپراطوری، مطابق یک رابطه خاص صورت می‌پذیرد. با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراطوری‌ای که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری، حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب، و به سیطره در آوردن آن‌ها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگتر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات، از لحاظ قدرت به امپراطوری‌ها نزدیک‌تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا داشته باشیم، با مستمراتی که از لحاظ موقعیت، به خود کشور امپریالیست، خیلی نزدیک هستند. در شکل (۱)، فلوچارت مربوط به اجرای مسئله پخشبار احتمالی با روش ارائه شده نشان داده شده است.

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش یک شبکه توزیع شعاعی-حلقوی ۳۳-باسه با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده بررسی می‌شود. در این شبکه از دو توربین بادی هرکدام به ظرفیت نامی ۱۵۰ KW و دو سیستم خورشیدی با ظرفیت نامی ۱۰۰ KW استفاده شده است. البته قابل ذکر است که این ظرفیت‌ها حداکثر مقدار توان قابل تولید توسط همین واحدها هستند. شکل (۷-۴) که شبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد، ۵ خط به شبکه اضافه شده‌اند. خطوط ۹-۱۵، ۱۸-۳۳، ۲۱-۸، ۲۲-۱۲ و ۲۵-۲۹ که با خط چین مشخص شده‌اند، باعث تبدیل شبکه شعاعی به شبکه حلقوی ضعیف شده‌اند. از طرفی منابع انرژی تجدیدپذیر نیز در شبکه مشاهده می‌شوند که توربین‌های بادی به باس‌های ۱۶ و ۳۰ و سیستم‌های فتوولتائیک به باس‌های ۲۲و ۲۴ متصل هستند.

اطلاعات مربوط به خطوط و باسها در [۲۴] بیان شده است. مقادیر مربوط به توانهای مصرفی در این مرجع به عنوان مقادیر میانگین در این مقاله مورد استفاده قرار می گیرد. شکل (۲) دیاگرام تکخطی شبکه مورد مطالعه را که از استانداردهای IEEE است، نشان می دهد. تعداد نمونه‌هایی که در مدل‌سازی بارهای مصرفی و منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است، برابر ۵۰۰۰ نمونه است. در مدل‌سازی تمامی این نمونه‌ها مورد ارزیابی قرارمی‌گیرند. این نمونه ها

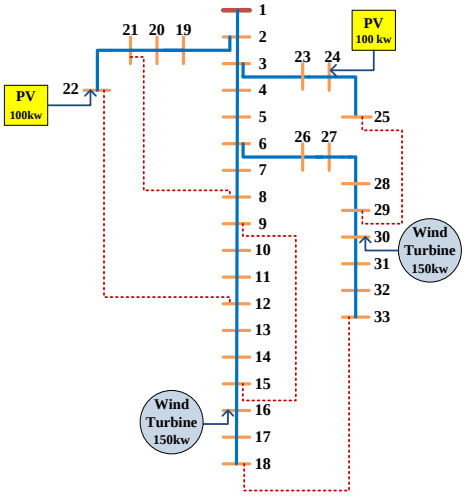
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

در بازه زمانی مشخصی نمونه برداری مـی شـوند. مقـادیر پارامترهـای مربوط به الگوریتم ICA به‌صورت جدول زیر در نظر گرفته می‌شود:

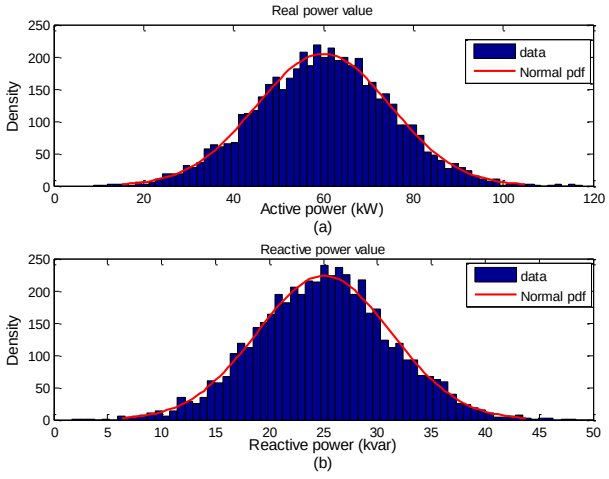
جدول (۱): مقادیر پارامترهای ICA

تعداد تکرار یا دهه	تعداد کشورهای اولیه	تعداد امپراطوری‌های اولیه	تعداد مستعمرات
۱۰۰	۸۰	۱۰	۷۰

در شکل (۳) تابع توزیع احتمالی توان‌های حقیقی و راکتیو در باس ۲۷ نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور عمودی تعـداد تکرارهـا یـا density هر حالت احتمالی از توان مربوطه در باس موردنظر را بیـان می‌کند.



شکل (۲): دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه



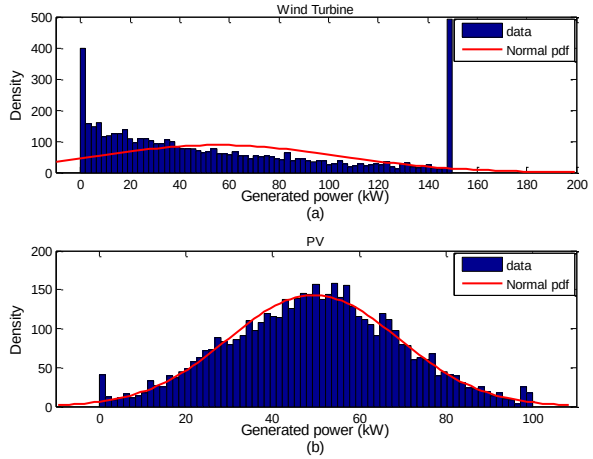
شکل (۳): تابع توزیع احتمالی توان‌های مصرفی در باس ۲۷

(a):توان اکتیو مصرفی باس ۲۷. (b): توان راکتیو مصرفی باس ۲۷.

مقادیر مربوط به پارامترهای توربین های بادی و سلول های خورشیدی در جدول (2) بیان شده اند:

جدول (2): مقادیر پارامترهای مربوط به توربین بادی و سیستم خورشیدی

WT	V_{ci}=2m/s	V_r=14m/s	V_{co}=25m/s	h=2
PV	P_{STC}=100kw	K_α=0.001		c=9



شکل (۴): تابع توزیع احتمالی توان‌های تولیدی

(a):توان تولیدی توربین بادی. (b):توان تولیدی سیستم خورشیدی.

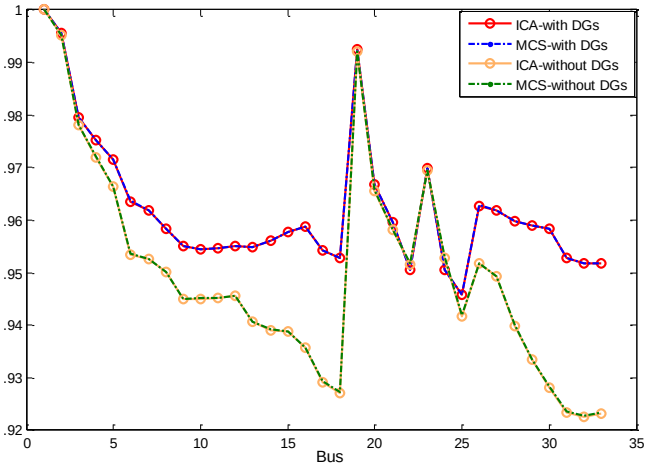
جدول (3): اندازه دامنه ولتاژ باس ها براساس مقدار میانگین و انحراف معیار در حضور منابع تجدیدپذیر

باس	دامنه ولتاژ باس‌ها در حضور منابع تولید پراکنده				
	مقدار میانگین			مقدار انحراف معیار	
	ICA	MCS		ICA	MCS
1	1.0000	1.0000		0.0000	0.0000
2	0.9955	0.9955		0.0002	0.0002
3	0.9795	0.9795		0.0009	0.0009
4	0.9753	0.9753		0.0012	0.0012
5	0.9714	0.9715		0.0016	0.0016
6	0.9636	0.9636		0.0027	0.0027
7	0.9619	0.9619		0.0026	0.0026
8	0.9584	0.9584		0.0024	0.0025
9	0.9550	0.9551		0.0028	0.0028
10	0.9545	0.9545		0.0027	0.0027
11	0.9546	0.9547		0.0027	0.0027
12	0.9551	0.9551		0.0027	0.0027
13	0.9549	0.9549		0.0036	0.0036
14	0.9560	0.9560		0.0041	0.0041
15	0.9578	0.9578		0.0046	0.0045
16	0.9588	0.9588		0.0055	0.0055
17	0.9543	0.9543		0.0060	0.0060
18	0.9527	0.9528		0.0061	0.0061
19	0.9924	0.9924		0.0003	0.0003
20	0.9669	0.9669		0.0015	0.0015
21	0.9596	0.9596		0.0018	0.0019
22	0.9505	0.9505		0.0026	0.0027
23	0.9698	0.9698		0.0014	0.0015
24	0.9505	0.9505		0.0028	0.0028
25	0.9457	0.9457		0.0029	0.0029
26	0.9628	0.9628		0.0029	0.0029
27	0.9618	0.9619		0.0032	0.0032
28	0.9598	0.9598		0.0049	0.0048
29	0.9589	0.9589		0.0062	0.0061
30	0.9584	0.9584		0.0072	0.0072
31	0.9529	0.9529		0.0071	0.0070
32	0.9517	0.9518		0.0070	0.0070
33	0.9517	0.9517		0.0069	0.0068

درجدول (3) نتایج حاصل از روش ارائه شده مبتنی بر الگوریتم ICA با روش شبیه سازی مونت کارلو (MCS) مقایسه شده است. پروفیل ولتاژ

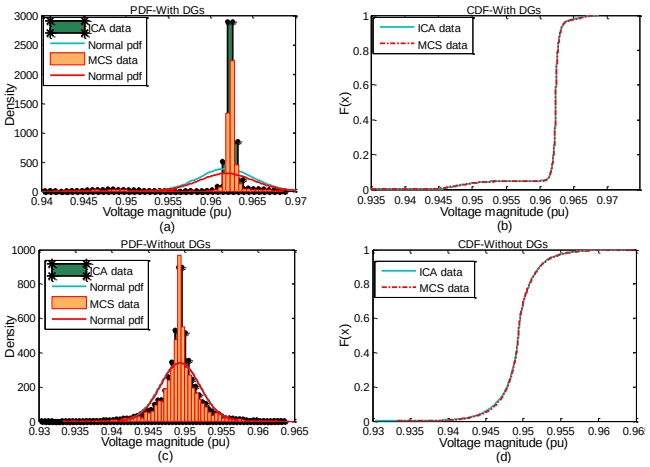
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]

را می توان برای دو سناریو مختلف با دو روش در شکل (۵) برحسب مقدار میانگین نشان داد:



شکل (۵): مقایسه پروفیل ولتاژ شبکه بر حسب مقادیر میانگین

تا بحال تمام نتایج به‌دست آمده براساس مقادیر میانگین بیان شده‌اند. حال می‌خواهیم تعدادی از نتایج به‌دست را براساس تابع توزیع احتمالی (PDF) و تابع توزیع تجمعی (CDF) نشان دهیم. در تابع توزیع احتمالی، تمام حالات ممکن برای پارامتر مورد استفاده برحسب میزان احتمال وقوع آن حالت یا براساس تعداد تکرار و یا چگالی آن بیان می‌شود. در شکل (۶) PDF و CDF دامنه ولتاژ باس ۲۷ در دو سناریو نمایش داده شده است.



شکل (۶): توابع توزیع احتمالی و تجمعی دامنه ولتاژ باس ۲۷ در دو سناریو

(a):تابع توزیع احتمالی دامنه ولتاژ باس ۲۷درحضور تولیدات پراکنده.

(b): تابع توزیع تجمعی دامنه ولتاژ باس ۲۷درحضور تولیدات پراکنده.

(c):تابع توزیع احتمالی دامنه ولتاژ باس ۲۷ بدون تولیدات پراکنده.

(d): تابع توزیع تجمعی دامنه ولتاژ باس ۲۷ بدون تولیدات پراکنده.

همانطور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، مقدار میانگین دامنه ولتاژ در حضور تولیدات پراکنده بیشتر از حالت بدون حضور منابع تولید پراکنده است که دلیل این امر تزریق توان اکتیو به شبکه می‌باشد. در این شکل تابع توزیع تجمعی در هر حالت نشان داده شده است.

مجموع احتمالات تمام حالات ممکنه برای دامنه ولتاژ در تک‌تک باس‌ها بایستی برابر عدد ۱ بشود.

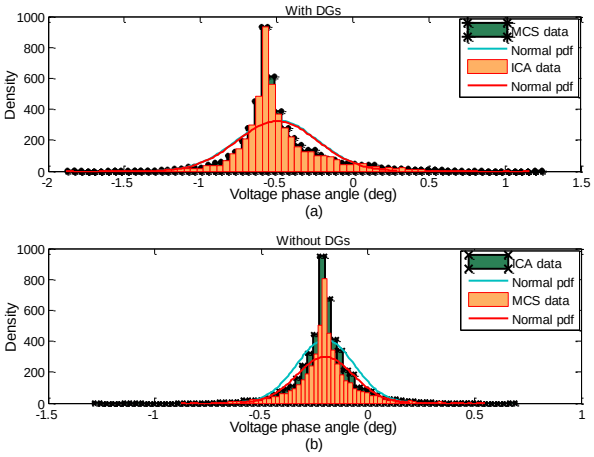
تابع توزیع احتمالی برای زاویه فاز ولتاژ باس ۲۷ را برای هردو سناریو می توان به صورت شکل (۷) نشان داد. براساس نتایج بدست آمده از حل مسئله پخش‌بار احتمالی که تمام نتایج ازجمله دامنه ولتاژ و زاویه فاز ولتاژ دارای تابع توزیع احتمالی هستند, شارش توان‌ها در خطوط نیز دارای رفتار احتمالی بوده و بایستی در فرم PDF بیان شوند. برای نمونه شارش توان ها در خطوط شبکه براساس مقدار میانگین درحضور منابع DG در جدول (4) بیان شده اند.

جدول (4): شارش توان در خطوط براساس مقدار میانگین در حضور منابع تجدیدپذیر

From bus	To bus	Power flow through lines with DGs (kW/kvar)			
		of real power μ (kW)		of reactive μ power (kvar)	
		ICA	MCS	ICA	MCS
1	2	3690.00	3690.12	2310.00	2310.06
2	3	2510.00	2510.21	1410.00	1410.04
2	19	1060.00	1060.09	840.00	840.07
3	4	1040.00	1040.16	210.00	210.41
3	23	1340.00	1340.14	1130.00	1130.12
4	5	910.00	910.42	130.00	130.14
5	6	850.00	850.31	100.00	100.45
6	7	350.00	350.12	160.00	160.12
6	26	430.00	430.23	-90.00	-90.12
7	8	150.00	150.11	60.00	60.31
8	9	300.00	300.03	20.00	20.14
9	10	-350.00	-350.40	-60.00	-60.45
9	15	-40.00	-40.13	130.00	130.13
10	11	280.00	280.24	-130.00	-130.21
11	12	-100.00	-100.19	110.00	110.14
12	13	-150.00	-150.36	80.00	80.09
12	22	160.00	160.10	-180.00	-180.14
13	14	-360.00	-360.09	220.00	220.14
14	15	100.00	100.17	-220.00	-220.34
15	16	-20.00	-20.26	-300.00	-300.43
16	17	200.00	200.31	-440.00	-440.51
17	18	190.00	190.11	110.00	110.19
18	33	130.00	130.13	90.00	90.13
19	20	40.00	40.14	50.00	50.10
20	21	970.00	970.43	790.00	790.24
21	8	860.00	860.20	730.00	730.36
21	22	410.00	410.06	630.00	630.45
23	24	1230.00	1230.54	1070.00	1070.46
24	25	840.00	840.12	-410.00	-410.31
25	29	410.00	410.16	-620.00	-620.10
26	27	370.00	370.20	-110.00	-110.13
27	28	310.00	310.34	-140.00	-140.24
28	29	250.00	250.12	-160.00	-160.16
29	30	530.00	540.11	-860.00	-870.34
30	31	380.00	390.08	160.00	160.18
31	32	230.00	230.12	90.00	90.11
32	33	20.00	20.01	-10.00	-10.01

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

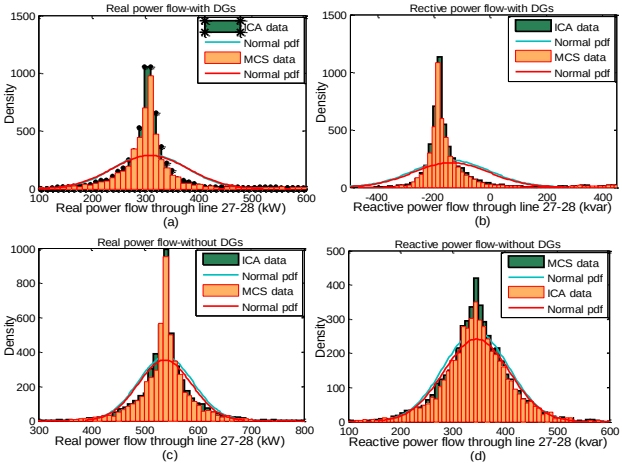
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016



شکل (۷): تابع توزیع احتمالی زایه فاز ولتاژ باس ۲۷ در دو سناریو (a):زاویه فاز ولتاژ باس ۲۷ در حضور تولیدات پراکنده. (b): زاویه فاز ولتاژ باس ۲۷ بدون تولیدات پراکنده

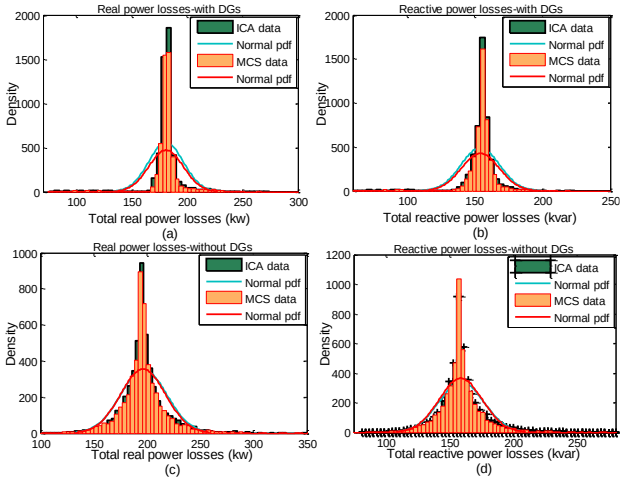
در شکل (۷) مشاهده می‌شود که زاویه فاز ولتاژی باس مربوطـه دارای تابع توزیع نرمال است. مقایسه PDF حاصل از روش ارائه شده با روش مونت کارلو دقت محاسبات الگوریتم ICA را نشان می‌دهد.

در شکل (۸) تابع توزیع احتمالی توان های عبوری از باس ۲۷ به بـاس ۲۸ در دو سناریو در فرم PDF نشان داده شده است. همچنـین میـزان کل تلفات شبکه برای توان های اکتیو و راکتیو به صـورت تـابع توزیـع احتمالی در شکل (۹) مشاهده می شود.



شکل (۸): تابع توزیع احتمالی شارش توان ها ازباس ۲۷ به باس ۲۸ (a):شارش توان اکتیودرحضور تولیدات پراکنده. (b): شارش توان راکتیودرحضور تولیدات پراکنده. (c): شارش توان اکتیوبدون تولیدات پراکنده. (d): شارش توان راکتیو بدون تولیدات پراکنده.

باتوجه به شکل (۸) با نفوذ منبابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، مقدار شارش توان در خط ۲۷ به ۲۸ کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که شبکه مورد مطالعه در این مقاله یک شبکه فعال در نظر گرفته شده است، یعنی در برخی از باس‌های شبکه علاوه بر مصرف توان، شاهد تولید توان نیز هستیم. پس در اینگونه شبکه‌ها علاوه بر شبکه بالادستی، منابع تولید پراکنده نیز در تامین توان مصرفی سایر باس‌ها نقش دارند. در نتیجه یک ارتباط دوطرفه در خطوط شبکه توزیع ایجاد خواهد شد. بنابراین مقادیر منفی که در توان راکتیو عبوری از خط موردنظر در حضور منابع تجدیدپذیر وجود دارد، بیانگر ارتباط دوطرفه در شبکه فعال مورد مطالعه است. یکی از مزایای این شبکه‌ها کاهش تلفات شبکه نسبت به حالت بدون حضور منابع تولید پراکنده است که در شکل (۹) دیده می‌شود.



شکل (۹): تابع توزیع احتمالی تلفات کل شبکه در دو سناریو (a):تلفات توان اکتیوشبکه درحضور تولیدات پراکنده. (b): تلفات توان راکتیو شبکه درحضور تولیدات پراکنده. (c): تلفات توان اکتیو شبمه بدون تولیدات پراکنده. (d): تلفات توان راکتیو شبکه بدون تولیدات پراکنده

برتری‌ها و مزیت‌های روش ارائه شده نسبت به روش مونت کارلو را می‌توان در ۳ مورد بیان نمود:

- در روش ارائه شده، در هر تکرار مسئله پخش‌بار با الگوریتم‌های هوشمند حل می‌شود و مسئله به‌صورت یک تابع بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شودکه هدف کمینه‌سازی تفاضل توان‌های محاسبه شده و برنامه‌ریزی شده می‌باشد. بنابراین فرمول بندی مسئله با استفاده از روش ارائه شده در مقاله بسیار ساده و بدون پیچیدگی ولی با دقت اجرای بسیار بالا است. در این روش نیازی به محاسبات پیچیده ماتریس ژاکوبین نیست.
- با توجه به نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر به چرخه تولید توان و با توجه به بالا رفتن نرخ R/X در شبکه‌های قدرت، استفاده از روش‌های کلاسیک دچار مشکل واگرایی می‌شوند. به‌عنوان مثال روش نیوتن-رافسون در شبکه‌های حلقوی کاربرد دارد و در شبکه‌های شعاعی-حلقوی یا شعاعی به مشکل برمی‌خورد. روش جاروب پسرو و پیشرو نیز در شبکه‌های شعاعی کاربرد دارد. ولی روش مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند قادر به حل مسئله در تمامی شبکه‌های قدرت اعم از شعاعی و شعاعی-حلقوی می‌باشد.
- زمان اجرای مسئله با ICA تفاوت چشمگیری با روش مونت کارلو دارد. دلیل این امر را می‌توان به سادگی برنامه‌نویسی مسئله با الگوریتم‌های هوشمند اشاره کرد. در روش مونت کارلو برای رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر نیاز به

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]

نمونه‌های بیشتر است که با بالا رفتن نمونه‌ها زمان اجرا نیز بیشتر می‌شود. جدول (۵) زمان اجرای هردو روش را باهم مقایسه می‌نماید:

جدول (۴): مقایسه زمان اجرای مسئله پخش‌بار احتمالی در دو روش

روش حل مسئله	روش ارائه شده	روش مونت کارلو
زمان اجرا (ثانیه)	۳۶۱	۳۶۸۹

۷- نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین مطالعات در سیستم‌های قدرت برای شناساندن رفتار سیستم، مطالعات پخش‌بار می‌باشد. با توجه به رشد روزافزون منابع تولید پراکنده از یک‌طرف و مفهوم شبکه‌های هوشمند که شبکه‌های نسل آینده برق محسوب می‌شوند، از طرف دیگر باعث تغییر نگرش در حل این مسئله بسیار مهم و اساسی در محیط قطعی و بدون در نظر گرفتن رفتارهای احتمالی پارامترهای شبکه شده است. رفتارهای احتمالی تولید توان توسط منابع DG و همچنین با توجه به عدم قطعیت در مصرف توان در سمت مشتریان، مسئله پخش‌بار معمولی دیگر نمی‌تواند جواب گوی نیازهای اساسی شبکه باشد.

در این مقاله از الگوریتم ICA برای حل مسئله استفاده شده است. مسئله پخش‌بار احتمالی علاوه بر روش ارائه شده با روش مونت کارلو نیز حل شده است. علت این امر مقایسه نتایج هر دو روش می‌باشد. روش مونت کارلو که یک روش جامع و دقیق برای حل مسائل احتمالاتی است، در بسیاری از تحقیقات برای حل مسئله به‌کار رفته است. بامقایسه نتایج حاصل از روش MCS با روش ICA دقت و صحت روش ارائه شده مشاهده می‌شود.

مراجع

[1] Morales, JM., Baringo, L., Conejo, AJ., Minguez, R. "Probabilistic power flow with correlated wind sources", IET Generation Transmission Distribution, Vol. 4,pp. 641-51, 2010.

[2] Borkowska, B. "Probabilistic load flow", IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-93, pp. 752–759, 1974.

[3] Allan, RN., Al-Shakarchi, MRG. "Linear dependence between nodal powers in probabilistic a.c. load flow", Proc IEE, Vol. 124, No, 6, pp. 529–34, 1977.

[4] Ruiz-Rodríguez, FJ., Jurado, F., Kamel, S. "Application of probabilistic three-phase load flow for electrical distribution systems with photovoltaic generators", Przeglad Elektrotechniczny, Vol. 88, No. 7, pp. 38–42, 2012.

[5] Hatziargyriou, ND., Karakatsanis, TS., Lorentzou, MI. "Voltage control settings to increase wind power based on probabilistic load flow", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 27, pp. 656-61, 2005.

[6] Su, C. L. "Distribution probabilistic load flow solution considering network reconfiguration and voltage control devices," 15th Power Systems Computation Conference, Liege, Aug. 2005.

[7] Verbic, G., Schellenberg, A., Rosehart ,W., Canizares, C. A., "Probabilistic optimal power flow applications to electricity markets", International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS: 1-6, 2006.

[8] Gupta, N., Pant, V., & Das, B. "Probabilistic load flow incorporating generator reactive power limit violations with spline based reconstruction method", Electric Power Systems Research, Vol. 106, pp. 203–213, 2014.

[9] Mohammadi, M., Shayegani, A., Adaminejad, H. "A new approach of point estimate method for probabilistic load flow", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 51, pp. 54–60, 2013.

[10] Villanueva, D., Feijóo, AE., Pazos, JL. "An analytical method to solve the probabilistic load flow considering load demand correlation using the DC load flow", Electric Power Systems Research, Vol. 110, pp.1-8, 2014.

[11] Xiao, Q. " Comparing three methods for solving probabilistic optimal power flow", Electric Power Systems Research, Vol. 124, pp.92-99, 2015.

[12] Aien, M., Fotuhi-Firuzabad, M., Rashidinejad, M. "Probabilistic optimal power flow in correlated hybrid wind–photovoltaic power systems", IEEE Trans. Smart Grids, Vol. 5, No. 1, pp. 130-138, 2014.

[13] Cai, D., Shi, D., Chen, J. " Probabilistic load flow with correlated input random variables using uniform design sampling", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 63, pp. 105–112, 2014.

[14] Pourahmadi-Nakhli, M., Seifi, A., Taghavi, R. " A nonlinear-hybrid fuzzy/probabilistic load flow for radial distribution systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 47, pp. 69–77, 2013.

[15] Alizadeh, S. Saeedmanesh, M. Rahimi-Kian, A. Jalalabadi, E. "Real-Time Frequency and Voltage Control of an Islanded Mode Microgrid", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.12, No.3, pp. 13-18, 2015.

[16] Golizadeh, R. Najafi-Ravadanegh, S. "On DC-Segmentation of Interconnected Power Systems", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.12, No.3, pp. 47-54, 2015.

[17] Nikmehr, N. Najafi-Ravadanegh, S. "Optimal Power Dispatch of Multi-Microgrids at Future Smart Distribution Grids," IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 6, No. 4, pp. 1648 - 1657, 2015.

[18] Nikmehr, N. Najafi-Ravadanegh, S. "Reliability evaluation of multi-microgrids considering optimal operation of small scale energy zones under load-generation uncertainties," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 78, pp. 80-87, 2016.

[19] Seppala A. Load research and load estimation in electricity distribution, Ph.D. Thesis, Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland; November 1996.

[20] Billinton, R. Huang, D., "Effects of load forecast uncertainty on bulk electric system reliability evaluation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, pp. 418-425, 2008.

[21] Nikmehr, N. Najafi-Ravadanegh, S. "Heuristic probabilistic power flow algorithm for microgrids operation and planning," IET Gener. Transm. Distrib, Vol. 9, No. 11, pp. 985 - 995, 2015.

[22] Slootweg, J.G., de Haan, S.W.H., Polinder, H., Kling, W.L. "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 144-151, 2003.

[23] Atashpaz, E., Lucas, C. "Imperialist Competitive Algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition': Proc. IEEE. Congress on

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.3- Fall 2016

Evolutionary Computation, Singapore, pp. 4661-4667, 2007.

[24] Venkatesh, B., Ranjan, R., Gooi, H.B. 'optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability", IEEE Trans. Power syst, Vol. 19, No. 1,pp. 260-266, 2004.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.3.4.2]