

تخمین حالت مقاوم سیستم‌های توزیع در حضور منابع تجدیدپذیر و با در نظر گرفتن وزن‌های متغیر اندازه‌گیرها

میلاذ گودرزدهقانی^۱، کارشناسی ارشد؛ مهدی احمدی جیردهی^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده انرژی - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - milad.gouadarz@smail.kut.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده انرژی - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - m.ahmadi@kut.ac.ir

چکیده: با حرکت به سمت هوشمند نمودن سیستم‌های قدرت الکتریکی و استفاده از منابع تجدیدپذیر، روزه‌روز بر پیچیدگی این سیستم‌ها افزوده می‌شود. از طرفی، به منظور انجام موفقیت‌آمیز وظایف کنترلی و مدیریتی، دقت مقادیر الکتریکی تخمین زده شده مسئله‌ای مهم و اساسی خواهد بود. تخمین حالت از این دیدگاه نقش مهمی را ایفا کرده و به عنوان حلقه نهایی زنجیره اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. اثرگذاری خطاهای دستگاه‌های اندازه‌گیری به گونه‌ای می‌باشد که مستقیماً بر دقت نتایج تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین، ارائه روش‌هایی جهت مقاوم نمودن الگوریتم‌های تخمین حالت نسبت به خطاهای اتفاق افتاده بر ورودی‌های این مسئله لازم و ضروری است. در این مقاله، روشی جهت مقاوم سازی الگوریتم تخمین حالت سیستم‌های توزیع ارائه می‌شود که دستیابی به تحلیل‌هایی واقعی و دقیق از شرایط بهره‌برداری یک سیستم توزیع را میسر می‌سازد. بدین ترتیب، با استفاده از تابع نمایی برای تنظیم وزن دستگاه‌های اندازه‌گیری سیستم و مدل سازی ترکیب گوسی به صورت هم‌زمان به ارائه الگوریتمی در قالب پوشش خطای اندازه‌گیرهای نصب شده در حضور نیروگاه‌های بادی و بارهایی با توزیع احتمالی غیرگوسی پرداخته می‌شود. به منظور بررسی الگوریتم پیشنهادی، مطالعه بر روی دو سیستم تست ۳۳ و ۵۰ شینه انجام شده و نتایج به دست آمده بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه هوشمند، عدم قطعیت غیرگوسی، تخمین حالت مقاوم، وزن‌های متغیر، انرژی‌های تجدیدپذیر.

Distribution Systems Robust State Estimation in the Presence of Renewable Resources and Considering the Variable Weights of Measurements

M. Goodarzhdeghani¹, MSc; M. Ahmadi Jirdehi², Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: m.gouadarz@smail.kut.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: m.ahmadi@kut.ac.ir

Abstract: The complexity of power systems increases with the advent of intelligent electrical power systems and the use of renewable resources. In order to successfully carry out control and management tasks, the accuracy of the estimated electrical quantities will be an important issue. State estimation plays an important role in this view and is considered as the final loop of the measurement chain. The effect of the errors of measuring devices is such that it directly affects the accuracy of the results, so providing methods to improve robustness of the estimation algorithm is necessary in relation to the errors in the inputs of this problem. In this paper, a method is proposed to improve the distribution system state estimation (DSSE) algorithm, which provides real and accurate analyzes of the operating conditions of an active distribution system. Thus, in this paper is presented an algorithm using exponential function for weighting tuning of measurement sets of the power system in the form of measurement errors in the presence of wind power plants and loads by non-Gaussian uncertainties and probability functions. For analysis of proposed algorithm, simulations results are carried on IEEE 33-bus and 50-bus distribution systems and demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Smart grid, non-gaussian uncertainty, robust state estimation, variable weights, renewable energy.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۲، ۱۳۹۷/۱۱/۱۶ و ۱۳۹۸/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲

نام نویسنده مسئول: مهدی احمدی جیردهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمانشاه - بزرگراه امام خمینی - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

در طی سال‌های اخیر، تغییرات متعددی بر سیستم‌های قدرت صورت گرفته است که می‌بایست در راستای بررسی و تحلیل این تغییرات به درک درستی از رفتار سیستم رسید. در این میان، مفهومی به نام شبکه هوشمند^۱ به‌منظور مطرح‌نمودن راه‌حل‌های هوشمندانه در مدیریت سیستم‌های الکتریکی مدرن مطرح شده است. به‌دلیل ورود فناوری‌های کم‌کربن و حرکت به‌سوی شبکه هوشمند، بخش‌هایی از سیستم قدرت و به‌ویژه بخش توزیع از حالت غیرفعال به سامانه‌ای فعال تبدیل گردیده که نیازمند ارائه توابع کنترلی جدید و تغییراتی در مدیریت آن شده است [۱]. شبکه‌های توزیع الکتریکی سنتی جهت شارش توان از پست‌ها به سمت مصرف‌کننده‌ها می‌باشد که با افزایش نفوذ تولیدات پراکنده از قبیل نیروگاه‌های خورشیدی و بادی و منابع پراکنده همانند باتری‌ها و خودروهای الکتریکی امکان دوطرفه‌شدن شارش توان وجود خواهد داشت. این امر منجر به نگرانی‌های جدی پیرامون امنیت سیستم شده است [۲]. باین وجود، اپراتور شبکه توزیع نمی‌تواند اقدامات کنترلی را بدون داشتن اطلاعات دقیق در مورد وضعیت شبکه انجام دهد. در واقع، تمام برنامه‌های کنترلی و مدیریتی بر پایه تصویری از شرایط بهره‌برداری و دانشی از مقادیر خاص شبکه که توسط تخمین حالت (SE)^۲ به‌دست می‌آید، قابل انجام است [۳، ۴].

در مبحث تخمین حالت سیستم‌های انتقال به موضوعات متنوعی در مقالات اشاره شده است. از محل‌یابی خطا در خطوط انتقال با هدف افزایش دقت با روشی مبتنی بر حداقل اندازه‌گیری جریان [۵] گرفته تا تخمین حالت در مرکز دیسپاچینگ شمال غرب کشور [۶]. در تخمین حالت شمال غرب کشور، فازور ولتاژ برای تمامی پست‌های ۱۳۲، ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت تخمین زده شده است. همچنین در [۷] از واحدهای اندازه‌گیری فازوری برای مکان‌یابی خطا در شبکه‌های قدرت استفاده شده است که با در نظر گرفتن شین‌های تزریق صفر و خروج تکی خطوط بررسی شده است.

سیستم‌های توزیع نسبت به سیستم‌های انتقال دارای تفاوت‌هایی می‌باشند که این امر بر عملکرد الگوریتم تخمین حالت سیستم‌های توزیع (DSSE)^۲ اثرگذار خواهد بود. برای مثال به‌علت بالابودن تعداد گره‌ها در سیستم توزیع و همچنین ملاحظات اقتصادی، وسایل اندازه‌گیری نصب‌شده بسیار کمتر از سیستم انتقال است. لذا، برای دستیابی به مشاهده‌پذیری شبکه می‌بایست از تمام اطلاعات ممکن از قبیل داده‌های آماری، تاریخی و یا داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط اپراتور استفاده نمود؛ چنین داده‌هایی را شبه اندازه‌گیری^۳ می‌نامند. به‌طور معمول، پروفیل‌های بارها و خروجی ژنراتورها می‌توانند به‌عنوان توان‌های تزریقی در گره‌ها در قالب شبه اندازه‌گیر استفاده شوند [۸، ۹]. باین حال، معمولاً مدل‌سازی این نوع از اندازه‌گیرها با عدم قطعیت بزرگ‌تری انجام می‌شود و این امر به‌شدت بر دقت نتایج تخمین تأثیرگذار است [۱۰]. اغلب تخمین‌گرهای حالت بر مبنای معیار حداقل مربعات وزن‌دار (WLS)^۴ کار می‌کنند که عمدتاً دامنه و زاویه ولتاژ شین‌ها یا به تعبیر دیگر فازور ولتاژ

را به‌عنوان متغیرهای حالت انتخاب می‌کنند. البته در برخی مطالعات با انتخاب دامنه و زوایای جریان شاخه‌ها در فرم قطبی و یا در قالب مختصات قائم به‌عنوان متغیرهای حالت، مسئله تخمین حالت حل شده است [۱۱، ۱۲]. علاوه بر تخمین به روش WLS، روش‌های تخمینی دیگری نیز وجود دارد. برای مثال در [۱۳] با ارائه روش مقاوم تخمین کمترین مربعات بازگشتی (RLS)^۵ از تخمین‌گر حالت کمترین مقدار قدرمطلق (LAV)^۶ برای تخمین متغیرهای حالت سیستم به انضمام تخمین پارامترهای UPFC^۷ در شبکه می‌پردازد. از سایر کاربردهای روش‌های مبتنی بر تخمین حالت، می‌توان به شناسایی و اصلاح خطاهای پارامتری خط اشاره کرد [۱۴، ۱۵]. در مرجع [۱۶] مطالعات جدیدی در زمینه نظارت بر سیستم‌های توزیع مطرح شده است که در آن تأثیرات آب و هوایی به‌صورت استفاده از داده‌های قبل از رخداد شرایط آب و هوایی، حین و پس از آن در DSSE انجام می‌گیرد. از دیگر مسائل پیش‌رو، نحوه مدل‌سازی صحیح عدم قطعیت اندازه‌گیرها است. در روش‌های معمول WLS، عدم قطعیت ورودی‌های مسئله با استفاده از توزیع گوسی انجام می‌شود؛ باین حال توزیع گوسی به‌طور کلی برای نشان دادن عدم قطعیت‌های ورودی مسئله مناسب نیست [۱۷]. در [۱۸، ۱۹] با استفاده از مدل‌های ترکیب گوسی (GMM)^۸ به مدل‌سازی عدم قطعیت‌هایی اشاره می‌شود که نمی‌توان آن‌ها را با استفاده از توزیع‌های احتمالی استاندارد تقریب زد. در [۲۰] با استفاده از روش بهینه‌سازی سعی بر کاهش مؤلفه‌های ترکیب گوسی و کم‌نمودن تکرارهای روش WLS شده است و در [۲۱] توسط شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۹ مؤلفه‌های GMM تشخیص داده می‌شود. همچنین یک الگوریتم DSSE بر اساس نظریه بیزی در [۱۰] ارائه شده است که قادر به تقریب شبه‌اندازه‌گیرها با توزیع‌های مختلف عدم قطعیتشان می‌باشد. از روش‌های مبتنی بر یادگیری می‌توان به الگوریتم‌های یادگیری ماشین اشاره نمود که در حل مسائل شبه‌اندازه‌گیرها و ارزیابی عدم قطعیت‌ها توسط الگوریتم‌های خوشه‌بندی^{۱۱} در [۲۲] استفاده شده است. مقالات اندکی در مقایسه با نفوذ بالای تولیدات پراکنده به تجزیه و تحلیل DSSE پرداخته‌اند در صورتی که یک چالش اصلی در این زمینه عدم قطعیت خروجی این منابع می‌باشد [۲۳]. روش‌های احتمالی جزو گروه اصلی در مدل‌سازی تأثیرات عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر برای مسئله SE به حساب می‌آیند. برای مثال در [۲۴] یک سازوکار بر مبنای پیش‌بینی همبستگی میان DGها و بارها با استفاده از یک نوع رگرسیون خطی پیشنهاد شده است.

وزن اندازه‌گیرها، سهم هر اندازه‌گیر را در دقت تخمین حالت به روش WLS تعیین می‌کنند. به‌طور معمول این وزن‌ها با استفاده از واریانس خطای دستگاه اندازه‌گیر در الگوریتم WLS به‌صورت ثابت استفاده می‌شود. به‌دلیل شرایط ناخواسته از قبیل خرابی دستگاه اندازه‌گیر، خطا در مخابره اطلاعات و... دقت آن دستخوش تغییر شده و باعث تنظیم نادرست وزن‌های ثابت شده و در نهایت بر دقت کلی نتایج تخمین تأثیرات نامناسبی به‌جا می‌گذارد [۲۵]. موضوعاتی پیرامون فرمول‌بندی

اندازه‌گیری با توزیع گوسی $R \in \mathbb{R}^{M \times M}$ و $\mathcal{N} \sim (0_{M \times 1}, R)$ است. بنابراین:

$$\begin{aligned} \text{cov}(n) &= E[n \cdot n^T] = R \\ &= \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_i^2, \dots, \sigma_M^2\} \end{aligned} \quad (2)$$

که σ_i انحراف معیار اندازه‌گیری نام می‌باشد. در این مقاله، اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها به‌عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است. بردار حالت به شکل $x = [\theta^T, V^T]^T$ است که V و θ به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ در هر شین می‌باشد و از طرفی تعداد متغیرهای سیستم به‌جز شین مرجع $2N + 1$ است.

در روش WLS با استفاده از حداقل‌ساختن تابع هدف (۳) عمل تخمین حالت انجام می‌پذیرد.

$$\min_x J(x) = \sum_{i=1}^n \frac{[z_i - h_i(x)]^2}{\sigma_i^2} \quad (3)$$

با خطی‌سازی تابع $h(x)$ با استفاده از روش تکراری نیوتن روابط زیر حاصل می‌گردد:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (4)$$

$$\Delta z = H \cdot \Delta x + n \quad (5)$$

که $H \in \mathbb{R}^{M \times N}$ ، بنابراین، حالت سیستم با استفاده از رابطه (۶) و (۷) به‌دست می‌آید.

$$x_{k+1} = x_k - \Delta x_k \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_k &= [H^T(x_k) \cdot R^{-1} \cdot H(x_k)]^{-1} \\ &\cdot H^T(x_k) \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x_k)] \end{aligned} \quad (7)$$

۲-۲- مقاومت‌سازی DSSE

یکی از مباحث دشوار در DSSE، تنظیم وزن اندازه‌گیری‌ها می‌باشد [۲۸]. به‌منظور تنظیم وزن‌ها و گنجاندن تابع نمایی در این مقاله از رابطه (۸) استفاده می‌شود [۲۹].

$$R_r = R \cdot \exp(-|Z - h(x)|) \quad (8)$$

که R_r مقادیر تنظیم‌شده وزن اندازه‌گیرهاست. با لحاظ نمودن این تابع در الگوریتم DSSE هنگامی که اندازه‌گیرها با خطاهایی مواجه شوند، مقدار باقی‌مانده اضافه شده و از طرفی با وارونگی آن در ماتریس وزن های اندازه‌گیرها وزن کمتری به اندازه‌گیر مربوطه اختصاص پیدا کرده که این امر مانع تأثیر بر عملکرد الگوریتم تخمین حالت گردیده و آن را نسبت به خطاهای پیش‌آمده مقاوم می‌سازد. علاوه‌براین، زمانی که دستگاه اندازه‌گیر دارای خطا نیست، بردار باقی‌مانده به شکل قابل توجهی کوچک است و خروجی نمایی در بسیاری از موارد نزدیک به مقدار ۱ است که این امر منجر به عدم تغییر وزن دستگاه اندازه‌گیر مربوطه می‌شود.

۲-۳- مدل‌سازی عدم قطعیت‌های غیر گوسی

خطای اندازه‌گیری‌ها با توزیع گوسی مستقل که با n در رابطه (۱) نشان داده شده است، به‌عنوان شاخصی برای مدل‌سازی عدم قطعیت دستگاه

مسئله، نحوه تولید شبه‌اندازه‌گیرها، ساختار شبکه، منابع تجدیدپذیر، جایابی اندازه‌گیرها و امنیت سایبری از جنبه‌های مهم و در دست مطالعه برای مسئله DSSE به‌شمار می‌آید [۲۶].

دستیابی به یک سیستم اندازه‌گیری مناسب و تخصیص وزن‌های درست اندازه‌گیرها در DSSE جهت حفظ کیفیت نتایج تخمین، نیاز اصلی در رسیدن به نتایج تخمینی دقیق در این زمینه است. به‌طور کلی می‌توان دستاوردهای اصلی و نوآوری‌های مقاله را به صورت زیر خلاصه نمود:

- هدف از تنظیم وزن‌ها و گنجاندن تابع نمایی در این مطالعه، محدود نمودن باقی‌مانده و به‌دست‌آوردن شاخص عملکرد مطلوب به‌منظور حذف موانع و ارتقاء کیفیت الگوریتم در راستای تحلیل‌های واقعی و کاربردی می‌باشد.
- استفاده هم‌زمان از تابع نمایی به‌منظور تنظیم وزن‌های الگوریتم
- استفاده از تابع چگالی احتمال (PDF) غیر گوسی به‌منظور نزدیک‌تر نمودن الگوریتم به ماهیت واقعی بارهایی که در عمل توزیع‌شان غیر گوسی می‌باشد.
- هماهنگی استفاده از ورودی‌های غیر گوسی در مسئله تخمین حالت استاتیکی با وجود تنظیم وزن اندازه‌گیری‌ها
- حرکت به سمت هوشمندسازی و دستیابی به تحلیل‌هایی واقعی و دقیق از شرایط بهره‌برداری یک سیستم توزیع فعال با وجود عدم قطعیت‌های غیر گوسی
- دستیابی به روشی کارآمد در راستای حذف مقادیر خطا از ورودی‌های الگوریتم تخمین در مسائل تصادفی و واقعی

ساختار این مقاله در ادامه بدین شرح است که در بخش دوم به بیان فرمول‌بندی مسئله، تشریح روش مقاومت‌سازی الگوریتم و مدل‌سازی عدم قطعیت‌های غیر گوسی مرتبط با DG ها و بارها پرداخته می‌شود. در بخش سوم، توصیف شبکه‌های تحت مطالعه و جزئیات شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. در نهایت، در بخش آخر نتایج و شبیه‌سازی به توضیح سناریوهای طراحی شده و بیان نتایج به‌دست‌آمده اشاره می‌شود.

۲- فرمول‌بندی مسئله

۲-۱- تخمین حالت در سیستم‌های توزیع

با فرض سیستم توزیعی با $N + 1$ گره و L شاخه، بردار اندازه‌گیری $Z \in \mathbb{R}^M$ شامل اندازه‌گیرهای واقعی سیستم از جمله دامنه ولتاژ شین، توان های اکتیو و راکتیو جاری در شاخه‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی شین و دامنه جریان شاخه است و $X \in \mathbb{R}^N$ بردار حالت می‌باشد که $M \geq N$ است. اندازه‌گیرها را می‌توان با تعریف ریاضیاتی زیر توصیف کرد [۲۷]:

$$z = h(x) + n \quad (1)$$

که $h(x)$ تابعی غیر خطی است و نشان‌دهنده ارتباط بین اندازه‌گیری‌ها با حالت سیستم X می‌باشد. بردار n معرف خطاهای موجود در

که $0 < \omega < 1$ است. همان گونه که گفته شد، هر مؤلفه از این توزیع دارای توزیعی گوسی است که به صورت (۱۴) نشان داده می‌شود [۳۶].

$$\sum_{i=1}^L f_{N(\mu_i, \sigma_i^2)}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{-\frac{(y-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (14)$$

در DSSE متغیرهای تصادفی که با GMM تقریب زده می‌شوند (چه خروجی DGها و چه بارها) به‌عنوان شبه‌اندازه‌گیرها استفاده می‌شوند. به منظور اعمال عدم قطعیت شبه‌اندازه‌گیرهایی که توزیع احتمالی غیر گوسی دارند، در هر شبه‌سازی مونت کارلو، شبه‌اندازه‌گیر مربوطه مطابق رابطه (۱۵) می‌باشد.

$$\mu = \sum_{i=1}^L \omega_i \cdot \text{normrnd}(\mu_y, \sigma_y^2) \quad (15)$$

پارامترهای GMM را می‌توان توسط الگوریتم EM به دست آورد [۱۸] و بر اساس آن‌ها، واریانس و انحراف معیار بیان شده در رابطه (۱۵) مطابق زیر به دست می‌آید:

$$\mu_y = \sum_{i=1}^L \omega_i \mu_i \quad (16)$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^L \omega_i (\sigma_i^2 + (\mu_i - \mu_y)^2) \quad (17)$$

زمانی که ضریب قدرت ثابت فرض می‌شود، میانگین و انحراف معیار مؤلفه گوسی توان‌های راکتیو بار را می‌توان از معادلات (۱۸) و (۱۹) به دست آورد [۲۰].

$$\mu_Q = \mu_P \tan(\varphi) \quad (18)$$

$$\sigma_Q = \sigma_P \tan(\varphi) \quad (19)$$

به‌منظور تحلیلی جامع و بررسی دقت تمامی تخمین‌ها، از معیار مجذور میانگین مربعات خطا^{۱۳} استفاده می‌شود. این معیار میزان خطای بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند و مطابق رابطه (۲۰) تعریف می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (20)$$

که در آن، N تعداد تکرارهای مونت کارلو بوده و x_i و \hat{x}_i به ترتیب مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی می‌باشد.

به‌طور کلی، می‌توان فلوجارت حل مسئله در تخمین حالت پیشنهادی در این مقاله را به‌صورت شکل ۱ خلاصه نمود.

۳- مباحث و نتایج

در این بخش، کارآمدی الگوریتم پیشنهادی بر روی دو سیستم تست ۳۳ شینه IEEE و ۵۰ شینه روستایی [۳۷] مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تمام بارها با ضریب توان ثابت فرض شده و به‌جز دو شین که دارای توزیع احتمالی غیرگوسی است، تمام بارها به‌صورت متغیرهای تصادفی گوسی با مقادیر پارامترهای سیستم به‌عنوان میانگین و با ضریب تغییرات (CV)^{۱۴} در نظر گرفته می‌شوند. رابطه ضریب تغییرات با مقادیر میانگین و انحراف از معیار برابر است با:

های اندازه‌گیر در نظر گرفته می‌شوند. جهت اعمال عدم قطعیت‌ها بر DSSE از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو استفاده می‌شود، بنابراین پس از اجرای تعداد زیاد این شبیه‌سازی‌ها متوسط \bar{N}_{sys} برابر خواهد شد با [۳۰]:

$$\bar{N}_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{M_c} N_{sys,i}}{M_c} \quad (9)$$

که M_c تعداد شبیه‌سازی‌های مونت کارلو و $N_{sys,i}$ واریانس تخمین حالت کل سیستم در i -امین شبیه‌سازی مونت کارلو است.

برای مدل‌سازی اندازه‌گیرها، می‌توان هرکدام از مقادیر صحیح را توسط معادلات (۱۰) و (۱۱) خطادار نموده و به مقادیر واقعی در مسئله DSSE اضافه نمود [۳۲، ۳۱].

$$\sigma_i = \frac{z_i^{true} \times error_{i,max} \%}{3} \quad (10)$$

$$z_i = z_i^{true} + \text{normrnd}(0, \sigma_i) \quad (11)$$

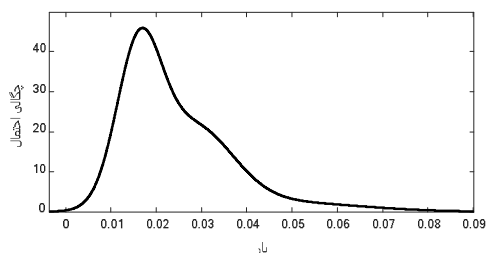
که $error_{i,max} \%$ ماکزیمم درصد خطای اندازه‌گیر، $\text{Normrnd}(0, \sigma_i)$ عددی تصادفی با توزیع نرمال گوسی و با میانگین صفر و انحراف معیار σ_i ، Z_i آمین اندازه‌گیری و Z_i^{true} مقدار صحیح (میانگین) است. به‌طور معمول، اندازه‌گیرهای توان جاری با بیشینه درصد خطای ۲٪، اندازه‌گیرهای جریان با بیشینه درصد خطای ۲٪ و همچنین اندازه‌گیرهای ولتاژ با بیشینه درصد خطای ۱٪ فرض شده است [۳۳، ۳۴]. از طرفی به جهت عدم کافی بودن اندازه‌گیرهای واقعی و در نتیجه کمک به عملی شدن الگوریتم تخمین حالت، توان‌های بار به‌عنوان شبه اندازه‌گیرها با ضریب خطای ۲۵٪ در نظر گرفته می‌شود، همچنین خروجی نیروگاه‌های بادی نیز به‌صورت شبه‌اندازه‌گیرها در نظر گرفته شده و به‌عنوان ورودی مسئله به حساب می‌آید [۳۰].

خروجی DGها غالباً غیرقابل پیش‌بینی و تصادفی بوده و از توزیع احتمالی خاصی پیروی نمی‌کند. از طرفی، اندازه‌گیرهای به‌هنگام جهت مانیتور کردن DGها کافی نبوده و اطلاعات به‌هنگام DGها ممکن است در دسترس نباشد که این امر منجر به افزایش عدم قطعیت سیستم‌های توزیع فعال می‌شود. در این مقاله، خروجی DGها و برخی از بارها با استفاده از GMM مدل‌سازی شده است. GMM قبلاً نیز برای توصیف خروجی DGها و بارها مورد استفاده قرار گرفته است [۳۰، ۲۱]. GMM دارای L مؤلفه است که توزیع هرکدام گوسی می‌باشد. برای متغیر تصادفی y تابع چگالی احتمال $f_y(y)$ به‌صورت (۱۲) تعریف می‌شود [۳۵، ۲۰، ۱۸]:

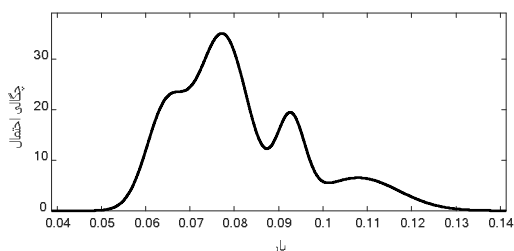
$$f_y(y) = \sum_{i=1}^L \omega_i f_{N(\mu_i, \sigma_i^2)}(y) \quad (12)$$

که در آن ω_i و μ_i و σ_i^2 نسبت (وزن)، میانگین و واریانس i -امین مؤلفه از ترکیب گوسی است. به‌منظور حفظ ویژگی‌های توزیع‌های احتمالی، وزن به‌صورت رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\sum_{i=1}^L \omega_i = 1 \quad (13)$$



شکل ۲: تابع چگالی احتمال غیرگوسی برای بار L_1 (در شین ۹)

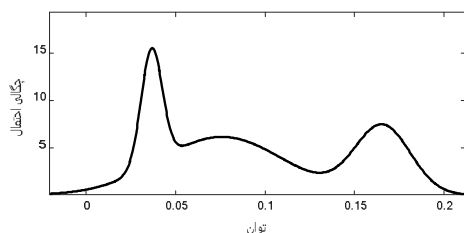


شکل ۳: تابع چگالی احتمال غیرگوسی برای بار L_2 (در شین ۳)

دو نیروگاه بادی در شین‌های ۱۲ و ۲۷ در نظر گرفته شده که توان های اکتیو خروجی این نیروگاه‌ها به صورت توابع چگالی احتمال غیرگوسی مطابق شکل‌های ۴ و ۵ می‌باشد. از طرفی، مولفه‌های GMM برای این توابع در جدول ۲ مدل شده و همانند مدل‌سازی مرجع [۳۸]، [۳۹] این نیروگاه‌ها به عنوان شین PQ با ضریب توان ۰/۹۵ پیش فاز در نظر گرفته می‌شود.

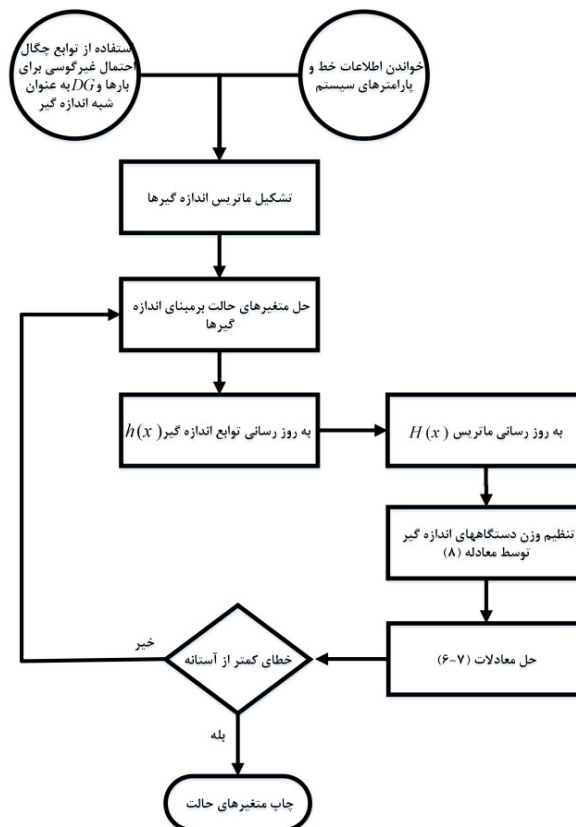
جدول ۲: مولفه‌های GMM برای نیروگاه‌های بادی

میانگین				
μ_4	μ_3	μ_2	μ_1	
-	۰/۱۶۵۶	۰/۰۷۵۸	۰/۰۳۶۶	نیروگاه بادی DG_1
-	۰/۱۸	۰/۰۱۱	۰/۰۷	نیروگاه بادی DG_2
واریانس				
σ_4^2	σ_3^2	σ_2^2	σ_1^2	
-	۰/۰۱۵۵	۰/۰۳۴۹	۰/۰۰۵۹	نیروگاه بادی DG_1
-	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	نیروگاه بادی DG_2
وزن‌ها				
ω_4	ω_3	ω_2	ω_1	
-	۰/۲۸۱۵	۰/۵۳۷۳	۰/۱۸۱۲	نیروگاه بادی DG_1
-	۰/۳	۰/۴	۰/۳	نیروگاه بادی DG_2



شکل ۴: تابع چگالی توان خروجی نیروگاه بادی DG_1 (واقع در شین ۱۲)

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (21)$$



شکل ۱: فلوچارت حل مسئله در تخمین حالت پیشنهادی

مطابق رابطه (۲۱)، با فرض لحاظ نمودن ضریب تغییرات ۰/۲۵ و استفاده از مقادیر پارامترهای سیستم به عنوان میانگین، مقادیر انحراف معیار به دست خواهد آمد. توان‌های اکتیو دو بار با تابع چگالی احتمال غیرگوسی توسط GMM همانند مرجع [۲۰] مدل شده‌اند که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود. همچنین، مولفه‌های GMM برای این توابع در جدول ۱ بر مبنای پریونیت (p.u) داده شده است.

جدول ۱: مولفه‌های GMM برای بارها

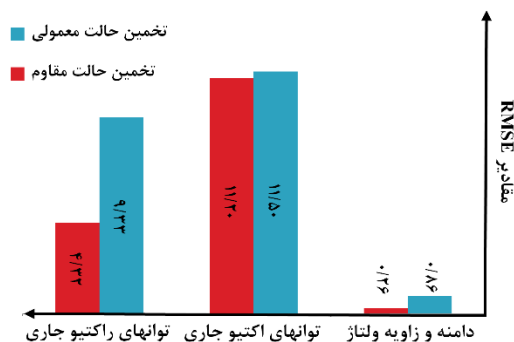
میانگین				
μ_4	μ_3	μ_2	μ_1	
-	۰/۰۲۸۰	۰/۰۴۶۸	۰/۰۱۶۱	بار L_1
۰/۱۰۷۹	۰/۰۹۲۷	۰/۰۷۷۴	۰/۰۶۴۶	بار L_2
واریانس				
σ_4^2	σ_3^2	σ_2^2	σ_1^2	
-	۰/۰۰۸۸	۰/۰۱۷۵	۰/۰۰۴۹	بار L_1
۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۴۵	بار L_2
وزن‌ها				
ω_4	ω_3	ω_2	ω_1	
-	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۵۷	۰/۴۵۲	بار L_1
۰/۱۵۰	۰/۱۳۵	۰/۴۹۵	۰/۲۲۰	بار L_2

۳-۱-۱- سناریو ۱

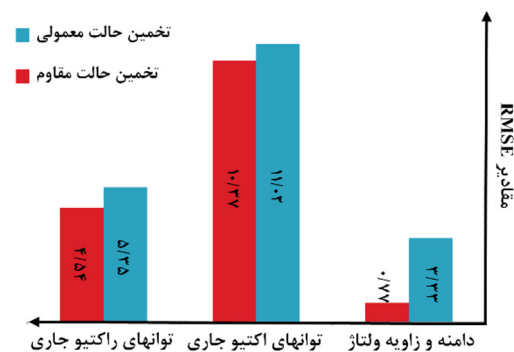
در این سناریو، با فرض اینکه اندازه‌گیرهای ولتاژ واقع در شین‌های ۱۷ و ۳۲ از ضریب خطای ۱٪ به مقدار ۲۵٪ افزایش یافته و بار دیگر به ۵۰٪ می‌رسد، دقت SE معمولی و تخمین مقاوم شده با تابع وزنی نمایی ارزیابی می‌شود. تأثیر دقت تخمین‌ها به شکل خاص بر روی اندازه‌گیر ولتاژ با خطاهای مختلف انجام شده است. شکل‌های ۶ و ۷ مقادیر RMSE با و بدون استفاده از تابع وزن نمایی (دو حالت تخمین حالت معمولی و تخمین حالت مقاوم) با ضریب خطای ۲۵٪ و ۵۰٪ اندازه‌گیرهای ولتاژ را نشان می‌دهد.

۳-۱-۲- سناریو ۲

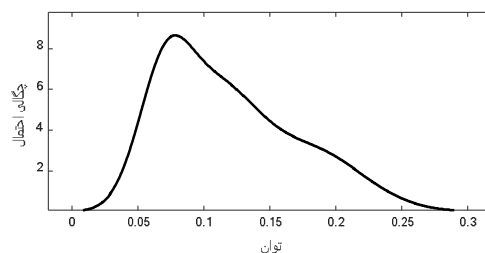
برای بررسی اندازه‌گیرهای توان‌های جاری سیستم و به‌طور خاص تأثیر ناشی از خطای این نوع از اندازه‌گیرها بر الگوریتم پیشنهادی، فرض می‌شود اندازه‌گیرهای توان‌های جاری خط با خطایی معادل با ضریب خطای ۲۵٪ و ۵۰٪ مواجه شده است. تأثیر دقت تخمین‌ها به شکل خاص بر روی اندازه‌گیرهای توان‌های جاری با خطاهای مختلف انجام شده است و دقت SE معمولی و تخمین مقاوم شده با تابع وزن نمایی ارزیابی می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹ مقادیر RMSE با و بدون استفاده از تابع وزن نمایی در سناریو دوم را نشان می‌دهد.



شکل ۶: RMSE تخمین‌های سیستم ۳۳ شینه با وجود تابع نمایی با ضریب خطای ۲۵٪ اندازه‌گیرهای ولتاژ



شکل ۷: RMSE تخمین‌های سیستم ۳۳ شینه با وجود تابع نمایی با ضریب خطای ۵۰٪ اندازه‌گیرهای ولتاژ



شکل ۵: تابع چگالی توان خروجی نیروگاه بادی DG_2 (واقع در شین ۲۷)

به‌منظور نشان‌دادن تأثیر تابع وزن نمایی در DSSE پیشنهادی، با فرض اینکه اندازه‌گیرهای واقعی به دلایل مختلف (اعم از اشکالات ساختاری دستگاه، خطاهای ناشی از انتقال اطلاعات و...) دچار خطاهایی می‌شوند، به اجرای تخمین حالت پیشنهادی پرداخته و به همین منظور در ادامه با فرض سناریوهایی به تجزیه و تحلیل تأثیر استفاده از تابع وزن نمایی در مسئله DSSE و به‌اصطلاح مقاوم‌سازی الگوریتم در برابر خطاهای احتمالی پیش‌آمده برای انواع مختلف اندازه‌گیرهای نصب‌شده در سیستم پرداخته می‌شود. چهار سناریو در این مقاله برای رسیدن به این هدف در نظر گرفته شده است:

- سناریو ۱:** اندازه‌گیرهای ولتاژ با در نظر گرفتن ماکزیمم درصد خطای ۲۵٪ و ۵۰٪
- سناریو ۲:** اندازه‌گیرهای توان جاری بین خطوط با در نظر گرفتن ماکزیمم درصد خطای ۲۵٪ و ۵۰٪
- سناریو ۳:** اندازه‌گیرهای جریان با در نظر گرفتن ماکزیمم درصد خطای ۲۵٪ و ۵۰٪
- سناریو ۴:** تمام اندازه‌گیرهای واقعی نصب‌شده در شبکه با در نظر گرفتن ماکزیمم درصد خطای ۲۵٪ و ۵۰٪
- در تمامی سناریوها کاملاً مشهود می‌باشد که تخمین حالت مقاوم در مقایسه با تخمین حالت معمولی از مقدار RMSE پایین‌تری برخوردار می‌باشند.

۳-۱-۳- شبیه‌سازی سیستم ۳۳ شینه

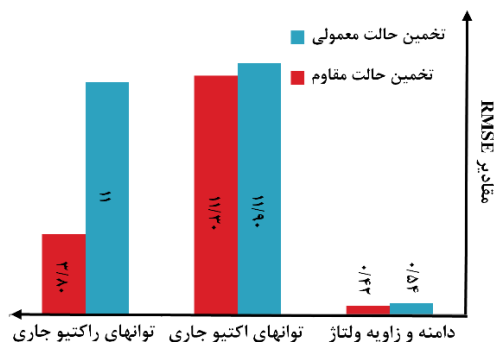
دو بار L_1 و L_2 به ترتیب در شین‌های ۹ و ۳ و همچنین نیروگاه‌های بادی DG_1 و DG_2 به ترتیب در شین‌های ۱۲ و ۲۷ قرار دارند. مطابق جدول ۳ اندازه‌گیرهای واقعی به تعداد سه اندازه‌گیر توان جاری در شاخه‌هایی بین شین‌های ۰-۱، ۱-۲، ۲-۳ و ۴-۵ قرار دارد. دو اندازه‌گیر جریان در شاخه‌هایی بین شین‌های ۲-۱۶ و ۳-۲۲ قرار گرفته و همچنین اندازه‌گیرهای ولتاژ در شین‌های ۱۷ و ۳۲ فرض شده است.

جدول ۳: محل قرارگیری اندازه‌گیرهای واقعی در سیستم ۳۳ شینه

اندازه‌گیرهای ولتاژ	اندازه‌گیرهای توان جاری	اندازه‌گیرهای جریان
۱۷ و ۳۲	۰ به ۱ و ۱ به ۲ و ۴ به ۵	۱ به ۱۸ و ۲ به ۲۲

۳-۱-۳- سناریو ۳

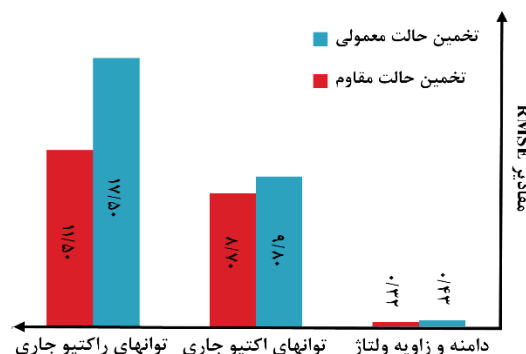
در این سناریو، به منظور بررسی نوع و میزان خطای دستگاه‌های اندازه گیر، الگوریتم DSSE با تابع وزن نمایی این بار برای اندازه‌گیری‌های جریان با ضرایب خطای ۰.۲۵٪ و ۰.۵۰٪ اجرا شده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقادیر RMSE حاصل را نشان می‌دهد. در این حالت، مقادیر RMSE برای تخمین با وزن‌های تنظیم‌شده توسط تابع وزنی پیشنهادی کمتر از تخمین بدون در نظر گرفتن تابع‌نمایی برای وزن‌ها است که نشان از بهبود دقت الگوریتم تخمین تحت شرایط اندازه‌گیری‌های خطادار می‌باشد.



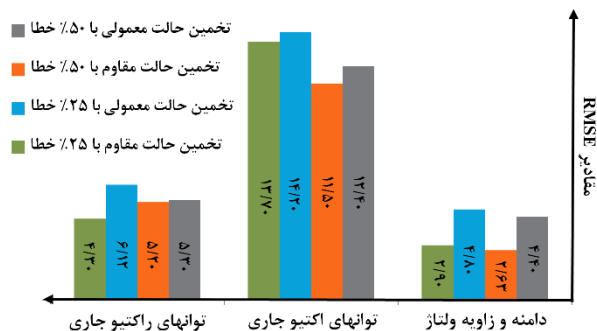
شکل ۱۱: RMSE تخمین‌های سیستم ۳۳ شینه با وجود تابع‌نمایی با ضریب خطای ۰.۵۰٪ اندازه‌گیری‌های جریان

۴-۱-۳- سناریو ۴

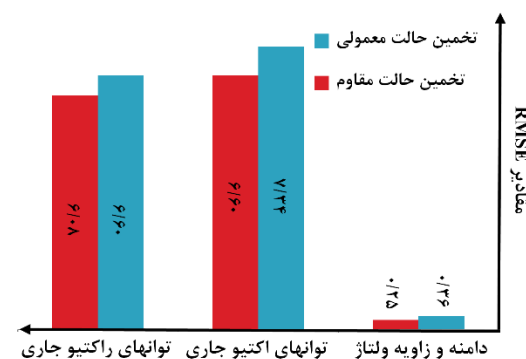
به جهت تحلیل کلی و کارایی استفاده از تابع‌نمایی در مقاوم‌سازی الگوریتم DSSE، فرض می‌شود که تمام اندازه‌گیری‌های واقعی اعم از اندازه‌گیری‌های ولتاژ، توان‌های جاری و اندازه‌گیری‌های جریان دچار خطاهایی به صورت هم‌زمان با ضرایبی برابر با ۰.۲۵٪ و ۰.۵۰٪ شده‌اند. در این حالت، نتایج اجرای الگوریتم با تابع وزن نمایی در مقایسه با SE بدون تنظیم وزن‌ها در شکل ۱۲ با استفاده از معیار RMSE آمده است.



شکل ۸: RMSE تخمین‌های سیستم ۳۳ شینه با وجود تابع‌نمایی با ضریب خطای ۰.۲۵٪ اندازه‌گیری‌های توان جاری



شکل ۱۲: RMSE تخمین‌های سیستم ۳۳ شینه با وجود تابع‌نمایی با ضریب خطای ۰.۲۵٪ و ۰.۵۰٪ برای تمام اندازه‌گیری‌های واقعی

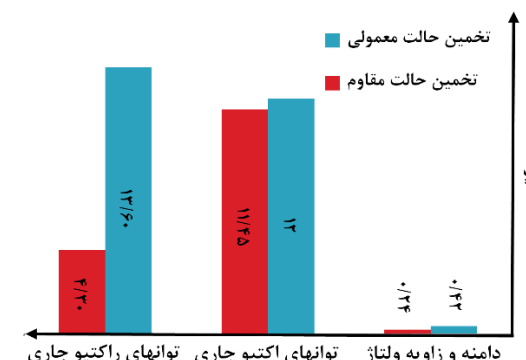


شکل ۹: RMSE تخمین‌های سیستم ۳۳ شینه با وجود تابع‌نمایی با ضریب خطای ۰.۵۰٪ اندازه‌گیری‌های توان جاری

همان‌طور که از نتایج شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، نتایج برای SE تنظیم‌شده با تابع‌نمایی در شرایط خطادار بودن دستگاه‌های اندازه‌گیری، دارای خطایی کمتر نسبت به زمانی است که SE به شکل کلاسیک خود اجرا می‌شود.

۳-۲- تخمین حالت مقاوم در سیستم ۵۰ شینه

سیستم توزیع ۵۰ شینه از مرجع [۳۷] گرفته شده است. همانند سیستم ۳۳ شینه تمام بارها با ضریب توان ثابت فرض شده‌اند، بارها در تمام شین‌ها به‌جز بارهای واقع در شین‌های ۱۴ و ۳۶ به‌صورت متغیرهای تصادفی گوسی با مقادیر میانگین پارامترهای سیستم و با ضریب تغییرات معادل ۰.۲۵٪ در نظر گرفته شده‌اند. توان‌های اکتیو بار در شین‌های ۳۶ و ۱۴ به ترتیب بارهای L_1 و L_2 فرض شده است.



شکل ۱۰: RMSE تخمین‌های سیستم ۳۳ شینه با وجود تابع‌نمایی با ضریب خطای ۰.۲۵٪ اندازه‌گیری‌های جریان

جدول ۵: خلاصه نتایج سناریوهای مختلف تخمین حالت مقاوم برای سیستم ۵۰ شینه

نوع دستگاه اندازه‌گیر دارای خطا	ضریب خطا	RMSE توان اکتیو	
		دامنه و زاویه ولتاژ	جاری
تخمین حالت معمولی		۴/۸۰۲۵	۳/۶۳۲۱
تخمین حالت مقاوم	اندازه‌گیر ولتاژ	۳/۲۴۲۱	۱/۸۸۶۹
تخمین حالت معمولی		۵/۲۴۳۳	۳/۶۴۴۳
تخمین حالت مقاوم	اندازه‌گیر ولتاژ	۴/۴۴۲۹	۱/۸۵۴۲
تخمین حالت معمولی		۰/۲۱۳۹۸	۵/۱۱۳۴
تخمین حالت مقاوم	اندازه‌گیر توان جاری	۰/۱۵۸۴	۳/۲۴۷۶
تخمین حالت معمولی		۰/۱۹۳۱۳	۶/۰۲۳۸
تخمین حالت مقاوم	اندازه‌گیر توان جاری	۰/۰۸۳۶۳۴	۲/۱۴۲۹
تخمین حالت معمولی		۰/۱۹۲۲۵	۳/۶۲۵۴
تخمین حالت مقاوم	اندازه‌گیر جریان	۰/۱۵۷۴۵	۱/۹۲۶
تخمین حالت معمولی		۰/۲۷۰۵	۳/۴۸
تخمین حالت مقاوم	اندازه‌گیر جریان	۰/۲۴۸۱۹	۱/۹۱۳۲
تخمین حالت معمولی		۴/۶۷۰۸	۴/۲۴۸۶
تخمین حالت مقاوم	تمام اندازه‌گیرهای واقعی	۰/۳۰۹۶۵	۰/۴۸۷۹
تخمین حالت معمولی		۸/۴۸۴۱	۵/۹۶۴
تخمین حالت مقاوم	تمام اندازه‌گیرهای واقعی	۶/۶۶۴۴	۳/۳۹۴۸

ساده به ماهیتی پیچیده از نقطه‌نظر مدیریتی رسیده است. به همین دلیل ضرورت به‌روزرسانی روش‌های نظارتی بیش از پیش مورد اهمیت قرار خواهد گرفت. در این مقاله، با در نظر گرفتن سیستمی با منابع انرژی‌های نو و بارهایی با توزیع احتمالی غیرگوسی به اجرای تخمین حالتی مقاوم در برابر خطاهای به‌وجود آمده در اندازه‌گیرهای نصب‌شده شبکه توزیع پرداخته شد. در این روش، سعی بر توصیف دقیقی از شرایط بهره‌برداری شبکه‌ای فعال و دارای عدم قطعیت، با استفاده از گنجاندن تابع وزن نمایی و استفاده از تابع ترکیب گوسی GMM می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که در صورت استفاده از این روش می‌توان به تخمین حالت مقاومی دست یافت که قادر به پوشش خطاهای به‌وجود آمده در سیستم اندازه‌گیری و به تنظیم وزن‌های آن‌ها در الگوریتم با توانایی تجزیه و تحلیل مسائل غیرقطعی پرداخت.

مراجع

- [1] M. McGranaghan, D. Houseman, L. Schmitt, F. Cleveland, and E. Lambert, "Enabling the integrated grid: leveraging data to integrate distributed resources and customers," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 14, no. 1, pp. 83-93, 2016.
- [2] M. Powalko et al., "System observability indices for optimal placement of PMU measurements," presented at the Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, 2012.
- [3] C. Hird, H. Leite, N. Jenkins, and H. Li, "Network voltage controller for distributed generation," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 151, no. 2, pp. 150-156, 2004.
- [4] J. Fan and S. Borlase, "The evolution of distribution," IEEE Power and Energy magazine, vol. 7, no. 2, pp. 63-68, 2009.

[۵] خلیل گرگانی فیروزجاه، «تخصیص بهینه واحدهای اندازه‌گیری جریان در شبکه قدرت با هدف افزایش دقت در محل‌یابی هوشمند خطا» مجله

نیروگاه‌های بادی واقع در شین‌های ۱۰ و ۳۲ به ترتیب DG_1 و DG_2 به عنوان شین‌های PQ با ضریب قدرت ۰/۹۵ پیش فاز در نظر گرفته شده است.

مطابق جدول ۴ اندازه‌گیرهای توان جاری در شاخه‌های بین شین‌های ۱-۰، ۲-۳ و ۳-۴، اندازه‌گیر جریان در شاخه‌های بین شین‌های ۲-۱۶ و ۳-۲۲ قرار گرفته و همچنین اندازه‌گیرهای ولتاژ در شین‌های ۳، ۵، ۲۱ و ۵۰ فرض شده است.

جدول ۴: اندازه‌گیرهای واقعی در سیستم ۵۰ شینه

اندازه‌گیرهای ولتاژ	اندازه‌گیرهای توان جاری	اندازه‌گیرهای جریان
۱۵، ۲۱، ۳۸، ۵۰	۰ به ۱، ۲، ۳، ۴	۲ به ۳، ۱۶ به ۲۲

سناریوهای یک تا چهار همانند سیستم ۳۳ شینه انجام و نتایج در جدول ۵ جهت نشان‌دادن تأثیر تابع وزن نمایی در DSSE نشان داده شده است. در صورت استفاده از الگوریتم پیشنهادی در مواقعی که اندازه‌گیرهای واقعی به دلایل مختلف دارای خطاهایی فاحش است، قابلیت بهبود نتایج تخمین میسر می‌شود. همان‌طور که مشخص است مقادیر خطای تخمین نسبت به تخمین حالت بدون لحاظ نمودن تابع وزن نمایی بهبود یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

امروزه، به‌منظور دستیابی به تحلیل دقیق از وضعیت سیستم‌های قدرت و به‌ویژه سیستم‌های توزیع که با وجود نفوذ روزافزون منابع تجدیدپذیر و بارهای مختلف و در راستای هوشمندسازی این سیستم از ساختاری

- approach for pseudo measurement modeling," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 4, pp. 1888-1896, 2012.
- [22] Y. R. Gahrooei, A. Khodabakhshian, and R.-A. Hooshmand, "A New Pseudo Load Profile Determination Approach in Low Voltage Distribution Networks," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 1, pp. 463-472, 2018.
- [23] M. Amini and M. Almalkhi, "Trading off robustness and performance in receding horizon control with uncertain energy resources," in 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), 2018, pp. 1-7: IEEE.
- [24] J. Zhao, G. Zhang, Z. Y. Dong, and M. La Scala, "Robust forecasting aided power system state estimation considering state correlations," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 2658-2666, 2018.
- [25] J.-W. Kang and D.-H. Choi, "Distributed multi-area WLS state estimation integrating measurements weight update," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 10, pp. 2552-2561, 2017.
- [26] K. Dehghanpour, Z. Wang, J. Wang, Y. Yuan, and F. Bu, "A survey on state estimation techniques and challenges in smart distribution systems," IEEE Transactions on Smart Grid, 2018.
- [27] A. Abur and A. G. Exposito, Power system state estimation: theory and implementation. CRC press, 2004.
- [28] A. R. Abbasi and A. R. Seifi, "A new coordinated approach to state estimation in integrated power systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 45, no. 1, pp. 152-158, 2013.
- [29] K.-R. Shih and S.-J. Huang, "Application of a robust algorithm for dynamic state estimation of a power system," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 1, pp. 141-147, 2002.
- [30] H. Wang, W. Zhang, and Y. Liu, "A Robust Measurement Placement Method for Active Distribution System State Estimation Considering Network Reconfiguration," IEEE Transactions on Smart Grid, 2016.
- [31] R. Singh, B. Pal, and R. Jabr, "Choice of estimator for distribution system state estimation," IET generation, transmission & distribution, vol. 3, no. 7, pp. 666-678, 2009.
- [32] R. Singh, B. C. Pal, and R. B. Vinter, "Measurement placement in distribution system state estimation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp. 668-675, 2009.
- [33] M. Pau, F. Ponci, A. Monti, S. Sulis, C. Muscas, and P. A. Pegoraro, "An efficient and accurate solution for distribution system state estimation with multiarea architecture," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 5, pp. 910-919, 2017.
- [34] A. P. Grilo, P. Gao, W. Xu, and M. C. de Almeida, "Load monitoring using distributed voltage sensors and current estimation algorithms," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1920-1928, 2014.
- [35] H. Sirisena and E. Brown, "Representation of non-Gaussian probability distributions in stochastic load-flow studies by the method of Gaussian sum approximations," in IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), 1983, vol. 130, no. 4, pp. 165-171: IET.
- [36] D. C. Montgomery and G. C. Runger, Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & Sons, 2010.
- [37] S. R. Gampa and D. Das, "Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 66, pp. 25-40, 2015.
- [38] Y. Xiang, P. F. Ribeiro, and J. F. Cobben, "Optimization of state-estimator-based operation framework including measurement placement for medium voltage distribution grid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 6, pp. 2929-2937, 2014.
- [39] A. E. Feijoo and J. Cidras, "Modeling of wind farms in the load flow analysis," IEEE transactions on power systems, vol. 15, no. 1, pp. 110-115, 2000.
- مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحات ۱۹۷-۲۰۸، ۱۳۹۵.
- [۶] مهرداد طرفدارحق، مهدی احمدی جیردهی، پدرام صالح‌پور، بابک اسدزاده و افشین روشن‌میلانی، «پایه سازی برنامه تخمین حالت در مرکز دیسپاچینگ شمال غرب کشور» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۱، صفحات ۵۱-۴۳، ۱۳۹۴.
- [۷] سهیل مرادی، رضا محمدی چینلو و نوید تقی‌زادگان کلانتری، «مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری برای مکان‌یابی خطا در شبکه قدرت با در نظر گرفتن باس‌های تزریق صفر و خروج تکی خطوط» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحات ۲۷۷-۲۶۷، ۱۳۹۵.
- [8] Y. Yao, X. Liu, and Z. Li, "Robust Measurement Placement for Distribution System State Estimation," IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017.
- [9] P. A. Pegoraro et al., "Bayesian Approach for Distribution System State Estimation With Non-Gaussian Uncertainty Models," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 11, pp. 2957-2966, 2017.
- [10] A. Angioni et al., "Bayesian distribution system state estimation in presence of non-Gaussian pseudo-measurements," in Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2016 IEEE International Workshop on, 2016, pp. 1-6: IEEE.
- [11] H. Wang and N. N. Schulz, "A revised branch current-based distribution system state estimation algorithm and meter placement impact," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 1, pp. 207-213, 2004.
- [12] M. E. Baran, J. Jung, and T. E. McDermott, "Including voltage measurements in branch current state estimation for distribution systems," in Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE, 2009, pp. 1-5: IEEE.
- [13] M. T. Hagh and M. A. Jirdehi, "A robust method for state estimation of power system with UPFC," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 18, no. 4, pp. 571-596, 2010.
- [14] M. A. Jirdehi and M. T. Hagh, "Identification and estimation of branch parameter errors: a new three stages method," in Electrical Engineering (ICEE), 2014 22nd Iranian Conference on, 2014, pp. 568-573: IEEE.
- [15] M. A. Jirdehi, M. T. Hagh, and K. Zare, "Simultaneous identification and correction of measurement and branch parameter errors," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 22, no. 4, pp. 858-873, 2014.
- [16] S. Ma, B. Chen, and Z. Wang, "Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 2, pp. 1442-1451, 2018.
- [17] A. K. Ghosh, D. L. Lubkeman, M. J. Downey, and R. H. Jones, "Distribution circuit state estimation using a probabilistic approach," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 1, pp. 45-51, 1997.
- [18] R. Singh, B. C. Pal, and R. A. Jabr, "Statistical representation of distribution system loads using Gaussian mixture model," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 1, pp. 29-37, 2010.
- [19] J. Liu, F. Ponci, A. Monti, C. Muscas, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, "Optimal meter placement for robust measurement systems in active distribution grids," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 5, pp. 1096-1105, 2014.
- [20] G. Valverde, A. T. Saric, and V. Terzija, "Stochastic monitoring of distribution networks including correlated input variables," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 1, pp. 246-255, 2013.
- [21] E. Manitsas, R. Singh, B. C. Pal, and G. Strbac, "Distribution system state estimation using an artificial neural network

⁹ Gaussian mixture model

¹⁰ Artificial Neural Network

¹¹ Clustering algorithms

¹² Probability Density Function (PDF)

¹³ Root-Mean-Square Error (RMSE)

¹⁴ Coefficient of Variation

¹ Smart Grid

² State Estimation (SE)

³ Distribution system state estimation (DSSE)

⁴ Pseudo-Measurements

⁵ Weighted Least Square Method (WLS)

⁶ Recursive Least Squares

⁷ Least Absolute Value

⁸ Unified Power Flow Controller