

پردازش همزمان خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری در تخمین حالت دینامیکی

مهدی احمدی جیرده^۱، دانشجوی دکتری، مهندس طرفدار حق^۱، استاد، کاظم زارع^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

m-ahmadi@tabrizu.ac.ir, tarafdar@tabrizu.ac.ir, kazem.zare@tabrizu.ac.ir

چکیده: اجرای دقیق تخمین حالت (SE) در سیستم‌های قدرت بستگی به مقادیر درست و رو دیها شامل اندازه‌گیریها و پارامترهای خطوط دارد. از طرفی دیگر، بروز خطاهای در مقادیر اندازه‌گیریها و پارامترهای خطوط دور از انتظار نیست که در صورت عدم شناسایی و اصلاح درست این نوع خطاهای تخمین نادرستی از متغیرهای حالت به دست می‌آید. در این مقاله، روشی کارا و مفید در تخمین حالت دینامیکی (DSE) برپایه فیلتر کالمون (KF) پیشنهاد شده است که قادر به شناسایی و اصلاح همزمان خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری خطوط در سیستم‌های قدرت می‌باشد. در روش پیشنهادی، پس از شناسایی خطاهای توسط بردارهای باقیمانده نرمالیزه و ضرایب لاغرانژ نرمالیزه، مقادیر درست اندازه‌گیریها و پارامترهای خطوط خطدادار با معادلات پیشنهادی جایگزین مقادیر نادرست می‌شود. در نهایت، روش پیشنهادی بر روی سیستم تست ۱۴ باسه IEEE در سناریوهای مختلف بروز خطاهای اعمال شده است و شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی معرفی شده است. نتایج شبیه‌سازی در این سناریوها، نشان‌دهنده کارآیی و دقّت بسیار بالای الگوریتم پیشنهادی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: تخمین حالت دینامیکی، فیلتر کالمون، شناسایی و اصلاح خطاهای، خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری خطوط

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۱۱/۳

نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی احمدی جیرده

نشانی نویسنده‌ی مسئول : آذربایجان شرقی، تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، اتاق ۳۵۰

۱- مقدمه

بایستی الگوریتم‌های موجود تاحد امکان نتایج درستی از تخمین حالت را ارائه دهند و این کار نیازمند روش‌هایی است که بتواند خطاهای موجود اعم از خطاهای اندازه‌گیری و خطاهای پارامتری خطوط را شناسایی کرده و آنها را اصلاح نماید [9].

اکثر تخمین‌گرهای حالت فقط طوری طراحی شده‌اند که شامل خطاهای اندازه‌گیری باشند و سایر خطاهای را نادیده می‌گیرند. خطاهای اندازه‌گیری عموماً توسط تست بزرگترین باقیمانده نرم‌افزار شناسایی می‌شوند و عموماً پس از شناسایی از مجموعه اندازه‌گیری حذف می‌گردند [10]. در یک سیستم شامل چندین خطای اندازه‌گیری، اگر خطاهای شناسایی و حذف شوند، ممکن است تعداد اندازه‌گیریها از تعداد متغیرهای حالت کمتر شود و باعث نامشاهده‌پذیری سیستم شود. لذا باید دنبال الگوریتمی بود که اندازه‌گیریها نادرست را از مجموعه اندازه‌گیری حذف نکند بلکه آنها را اصلاح نماید.

در این مقاله، روشی جدید برپایه فیلتر کالمون در تخمین حالت دینامیکی پیشنهاد شده است که قادر است در هر بازه زمانی که خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری خطوط اتفاق می‌افتد، حتی اگر به‌طور همزمان نیز باشند، این خطاهای را شناسایی کرده و سپس آنها را اصلاح نماید. روش پیشنهادی برای تخمین یا اصلاح خطاهای پارامتری برپایه استفاده از ضرایب لاگرانژ است. می‌توان گفت که روش پیشنهادی از سه مرحله تشکیل شده‌است. در مرحله اول پس از اجرای تخمین حالت، بردارهای باقیمانده نرم‌افزار برای مجموعه اندازه‌گیری و ضرایب لاگرانژ نرم‌افزار برای پارامترهای خطوط محاسبه می‌شوند. در مرحله دو، خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری خطوط شناسایی می‌شوند و در مرحله سوم، اندازه‌گیریها و پارامترهای شناسایی شده با معادلات پیشنهادی اصلاح می‌شوند و جایگزین مقادیر نادرست می‌شوند. در نهایت، الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم تست ۱۴ باسه IEEE در سناریوهای مختلفی نظیر حالت با خطای اندازه‌گیری، حالت با خطای پارامتری و حالتی که همزمان این دو نوع خطا رخ می‌دهد، پیاده‌سازی شده و شاخص‌های مختلفی نیز برای ارزیابی این الگوریتم معرفی شده است. نتایج شبیه‌سازی برای این حالت‌ها و مقایسه شاخص‌ها نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی از دقت و کارآیی بسیار بالایی در شناسایی و اصلاح خطاهای برخوردار است و در نتیجه متغیرهای حالت نیز به درستی تخمین زده شده‌اند. حتی مقایسه بین دو حالت بدون اصلاح و با اصلاح به روش پیشنهادی نیز ناجام شده است تا بتوان راحت‌تر به کارآیی روش پیشنهادی پی برد.

این مقاله به‌صورت زیر بخش بندی شده است: در بخش ۲، خلاصه‌ای از تخمین حالت دینامیکی برپایه فیلتر کالمون شامل تمامی مراحل آورده شده است. بخش ۳، به معرفی روش پیشنهادی برای شناسایی و اصلاح خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری خطوط می‌پردازد. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در سیستم تست ۱۴ باسه IEEE مشاهده می‌شود و در نهایت، در بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

سیستم‌های قدرت با توجه به گستردگی و پیچیدگی خاص خود، در معرض گستره وسیعی از اغتشاشات کوچک و بزرگ قرار می‌گیرند و در نتیجه اطلاعات دقیق و بهنگام از وضعیت سیستم در کنترل و تأمین امنیت آن از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از توابع اساسی در سیستم مدیریت انرژی (EMS) و تحلیل امنیت سیستم قدرت، تخمین‌گرهای حالت می‌باشد که قادر به تخمین اندازه‌ولتاژ و زوایای فاز تمامی باس‌ها با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیریها شامل اندازه‌ولتاژها، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به باس‌ها و توان‌های اکتیو و راکتیو جاری بین خطوط و ساختار شبکه است [1].

مفهوم تخمین حالت در سیستم‌های قدرت توسط Schweppе در سال ۱۹۷۰ معرفی شد [2-4] در طول این سالها روش‌های جدیدی برای حل این مسئله بهینه‌سازی غیرخطی پیشنهاد شده است که روش حداقل مربعات وزن دار (WLS) به‌خاطر مزایای بسیار زیاد آن نسبت به سایر روش‌ها کاربرد بیشتری دارد [5]. اگر بردار حالت در یک لحظه از زمان از مجموعه اندازه‌گیری در همان لحظه از زمان بدست آید، تخمین حالت استاتیکی نامیده می‌شود که به‌طور وسیعی در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود.

از طرفی دیگر، سیستم قدرت یک سیستم دینامیکی می‌باشد که به‌کندی ولی به‌صورت پایدار با زمان تعییر می‌کند. این تعییرات در سیستم قدرت ناشی از تعییرات بار و در نتیجه تعییرات تولید است. بنابراین برای داشتن یک مونیتورینگ پیوسته از سیستم قدرت، تخمین حالت بایستی در بازه‌های زمانی کوچک اجرا شود. اما با توجه به رشد و گستردگی سیستم قدرت، اجرای تخمین حالت استاتیکی در بازه‌های زمانی کوچک از لحاظ محاسباتی سنتگین می‌باشد. ازین‌رو، تخمین حالت استاتیکی نمی‌تواند بدسترسی رفتار دینامیکی سیستم قدرت را دنبال کند. این منجر به الگوریتمی دیگر به‌نام تخمین حالت دینامیکی می‌شود که از مدل فیزیکی متغیر با زمان سیستم قدرت استفاده می‌کند. این الگوریتم دارای این مزیت است که قادر به پیش‌بینی متغیرهای حالت در زمان بعدی می‌باشد و در نتیجه اپراتور سیستم زمان بیشتری در اختیار خواهد داشت تا بتواند عملیات کنترلی را به‌خصوص در شرایط اضطراری انجام دهد [6]. روش‌های تخمین حالت دینامیکی عموماً از فیلتر کالمون استفاده می‌کنند که توسط Debs در سال ۱۹۷۴ ارائه گردید [7-8].

در هر حال، وجود خطاهایی نظیر خطاهای اندازه‌گیری در مجموعه اندازه‌گیری و پارامتری خطوط دور از انتظار نیست و نتایج تخمین حالت را نیز تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. تخمین حالت با فرض دانستن پارامترهای درست شبکه انجام می‌گیرد که در سیستم‌های عملی این فرض درست نمی‌باشد. اگر این خطاهای تداوم داشته باشند و شناسایی نشوند، عملیات کنترلی هم با خطای انجام خواهد شد و ممکن است اثرات جبران ناپذیری داشته باشند. به‌حال،

بنابراین، با داشتن \tilde{x}_{k+1} و M_{k+1} ، بردار اندازه‌گیری پیش‌بینی شده (\tilde{z}_{k+1}) و ماتریس کوواریانس خطای آن (T_{k+1}) می‌تواند به دست آید:

$$\begin{aligned}\tilde{z}_{k+1} &= h_{k+1}(\tilde{x}_{k+1}) \\ T_{k+1} &= H_{k+1}M_{k+1}H_{k+1}^T\end{aligned}\quad (3)$$

که در آن $H_{k+1} = \frac{\partial h_{k+1}}{\partial x} \Big|_{x=\tilde{x}_{k+1}}$ ماتریس ژاکوبین اندازه‌گیری می‌باشد. کیفیت تأمین اندازه‌گیری پیش‌بینی شده (i) \tilde{z}_{k+1} با انحراف معیار استاندارد خطای خود یعنی $\sigma_T(i) = \sqrt{T_{k+1}(i, i)}$ بیان می‌شود.

۳-۲- تحلیل تغییر (Innovation Analysis)

این امکان وجود دارد که قبل از عمل فیلترکردن، خطاهای موجود در مجموعه اندازه‌گیریها تشخیص داده شود که توسط تحلیل تغییر انجام می‌شود. اگر v_{k+1} بردار تغییر در نمونه زمانی $k+1$ باشد، تأمین درایه این بردار به صورت اختلاف بین اندازه‌گیری (i) z_{k+1} دریافتی از SCADA و (i) \tilde{z}_{k+1} پیش‌بینی شده تعریف می‌شود:

$$v_{k+1}(i) = z_{k+1}(i) - \tilde{z}_{k+1}(i) \quad (4)$$

بردار v_{k+1} یک بردار گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس N_{k+1} می‌باشد که با رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$N_{k+1} = R_{k+1} + H_{k+1}M_{k+1}H_{k+1}^T = R_{k+1} + T_{k+1} \quad (5)$$

بردار تغییر v_{k+1} را می‌توان به صورت زیر نرماییزه نمود:

$$v_i^N = \frac{|v_i|}{\sqrt{N(i, i)}} \quad (6)$$

که در آن $\sigma_N(i) = \sqrt{N(i, i)}$ انحراف معیار تأمین تغییر می‌باشد که برای سادگی شاخص زمانی حذف شده است. اگر تحلیل تغییر نرماییزه بزرگتر از یک مقدار آستانه باشد، بیانگر وجود خطای در سیستم می‌باشد و بایستی شناسایی گردد.

۴- فیلترکردن (Filtering)

ممکن است تخمین حالت دینامیکی به عنوان یک مسئله WLS فرموله می‌شود. در فرایند فیلتر کردن، عموماً از بردار حالت پیش‌بینی شده به عنوان نقطه شروع و اجرای تخمین حالت WLS استفاده می‌شود. این عمل منجر به معادله (۷) می‌شود:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k+1} &= \tilde{x}_{k+1} + K_{k+1}v_{k+1} \\ K_{k+1} &= P_{k+1}H_{k+1}^TR_{k+1}^{-1}; P_{k+1} = \left[H_{k+1}^TR_{k+1}^{-1}H_{k+1} \right]^{-1} \\ v_{k+1} &= [z_{k+1} - h_{k+1}(\tilde{x}_{k+1})]\end{aligned}\quad (7)$$

۲- تخمین حالت دینامیکی برپایه فیلتر کالم

همان‌طوری که قبلاً اشاره شد، در شرایط تغییرات بار و رفتار دینامیکی سیستم قدرت بایستی از تخمین حالت دینامیکی برپایه فیلتر کالم استفاده نمود. در استفاده از الگوریتم تخمین حالت دینامیکی، مراحل زیر بایستی طی شود [11-12]:

۱-۲- مدل کردن (Modeling)

اکثر مدل‌های استفاده شده برای تخمین حالت دینامیکی در مدل فضای حالت پیشنهاد شده‌اند. برپایه دانش قبلی از رفتار سیستم، بیان فضای حالت برای سیستم‌های گسسته متغیر با زمان معمولاً در شکل کلی زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= F_k x_k + g_k + w_k \\ z_k &= h_k(x_k) + v_k\end{aligned}\quad (1)$$

که در آن:

x_k : شاخص زمانی

F_k : بردار متغیرهای حالت ($n \times 1$)

v_k : ماتریس گذرای بین حالت‌ها

g_k : بردار بیانگر رفتار خطی حالت‌ها

w_k : بردار عدم قطعیت مدل که یک نویز گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس Q_k می‌باشد.

z_k : بردار توابع غیرخطی ارتباطی بین اندازه‌گیریها و متغیرهای حالت

v_k : بردار خطای اندازه‌گیری، گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس R_k

فرض شده‌است که بردارهای w و v به هم وابسته نباشند.

اجزای بردار حالت، اندازه ولتاژ و زوایای تمامی بس‌ها می‌باشند و توان‌های جاری بین خطوط و توان‌های توزیعی به بس‌ها به همراه اندازه ولتاژ بس‌ها اجزای تشکیل‌دهنده بردار اندازه‌گیری می‌باشند. در مدل ذکر شده در فوق، پارامترهای F_k و g_k به صورت آنلاین [13] و ذکر شده در فوق، پارامترهای Q_k به صورت آفلاین [14] تخمین زده می‌شوند.

۲-۲- پیش‌بینی (forecasting)

در این مرحله، بردار حالت نمونه زمانی بعد (\tilde{x}_{k+1}) با استفاده از اطلاعات رفتاری سیستم در نمونه زمانی k (تخمین \hat{x}_k) پیش‌بینی می‌شود. بردار حالت پیش‌بینی در نمونه زمانی بعد (\tilde{x}_{k+1}) و ماتریس کوواریانس خطای آن (M_{k+1}) از رابطه (۲) به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{k+1} &= F_k \hat{x}_k + g_k \\ M_{k+1} &= F_k P_k F_k^T + Q_k\end{aligned}\quad (2)$$

که در آن $r = z - h(x, p)$ بردار باقیمانده اندازه‌گیری نامیده می‌شود. با تحلیل ضریب لاغرانژ،تابع هدف مذکور می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$L(x, p, \lambda) = r^T \cdot R^{-1} \cdot r - \lambda^T p \quad (13)$$

این تابع می‌تواند با استفاده از شرایط کوهن-تاکر (KKT) حل شود:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = H^T R^{-1} r = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p} = H_p^T R^{-1} r + \lambda = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = p = 0 \quad (16)$$

$$\text{که در آن } H_p = \frac{\partial h(x, p)}{\partial p} \text{ و } H = \frac{\partial h(x, p)}{\partial x} \text{ به ترتیب}$$

ماتریس ژاکوبین اندازه‌گیری، ماتریس ژاکوبین پارامتر و بردار ضرایب لاغرانژ برای خطاهای پارامتری می‌باشد. ارتباط بردار λ با بردار r را می‌توان از معادله (15) بدست اورد:

$$\lambda = S_p \cdot r = -[H_p^T \cdot R^{-1}] \cdot r \quad (17)$$

حال بردار حالت x را می‌توان با حل مسئله WLS از رابطه زیر بدست آورد:

$$\Delta x = G^{-1} \cdot H^T \cdot R^{-1} \cdot (z - h(x, 0)) \quad (18)$$

که در آن $G = H^T \cdot R^{-1}$ ماتریس گین نامیده می‌شود. ضرایب لاغرانژ نیز دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس غیرصفر Λ می‌باشند که از معادله (19) بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \text{cov}(\lambda) = S_p \cdot \text{cov}(r) \cdot S_p^T = S_p \cdot \Omega \cdot S_p^T \\ \Omega &= \left\{ I - H \left(H^T R^{-1} H \right)^{-1} H^T R^{-1} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

ضرایب لاغرانژ را می‌توان با استفاده از المانهای قطری ماتریس کوواریانس Λ و با استفاده از رابطه (۲۰) نرمالیزه کرد:

$$\lambda_i^N = \frac{\lambda_i}{\sqrt{\Lambda(i, i)}} \quad i = 1, \dots, n_p \quad (20)$$

که در آن n_p تعداد کل پارامترهای شبکه و $\sigma_{\lambda}(i) = \sqrt{\Lambda(i, i)}$ انحراف معیار نامین درایه بردار ضرایب لاغرانژ می‌باشد. اگر پارامتری دارای ضریب لاغرانژ نرمالیزه بزرگتر از یک مقدار آستانه باشد، به عنوان پارامتر مشکوک شناسایی شده و باستی اصلاح گردد که این عمل توسط معادله پیشنهادی که در ادامه خواهد آمد، انجام می‌پذیرد. باستی به این نکته توجه کرد که منظور از پارامتر خطوط در این مقاله شامل پارامترهای مدار معادل π خطوط

$$\text{که در آن } H_{k+1} = \frac{\partial h_{k+1}}{\partial x} \Big|_{x=\tilde{x}_{k+1}} \text{ می‌باشد.}$$

۲-۵- تحلیل باقیمانده (Residual Analysis)

بردار باقیمانده r_{k+1} به صورت اختلاف بین بردار اندازه‌گیری دریافتی z و بردار فیلترشده و تخمینی \hat{z}_{k+1} تعریف می‌شود:

$$r_{k+1} = z_{k+1} - \hat{z}_{k+1} = z_{k+1} - h_{k+1}(\hat{x}_{k+1}) \quad (8)$$

بردار r_{k+1} یک بردار گوسی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس Ω_{k+1} می‌باشد که از رابطه (۹) بدست می‌آید:

$$\Omega_{k+1} = R_{k+1} - H_{k+1} P_{k+1} H_{k+1}^T = R_{k+1} - S_{k+1} \quad (9)$$

در نتیجه بردار باقیمانده را می‌توان به صورت زیر نرمالیزه نمود:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega(i, i)}} \quad (10)$$

که در آن $\sigma_{\Omega}(i) = \sqrt{\Omega(i, i)}$ انحراف معیار نامین درایه بردار باقیمانده می‌باشد. اگر باقیمانده نرمالیزه بزرگتر از یک مقدار آستانه باشد، بیانگر وجود خطأ در مجموعه اندازه‌گیری می‌باشد و باستی شناسایی و اصلاح شود.

هر پنج مرحله مذکور باستی در هر تخمین حالت دینامیکی اجرا شود تا بردار حالت تخمین زده شود.

۳- روش پیشنهادی در شناسایی و اصلاح خطاهای همزمان اندازه‌گیری و پارامتری خطوط

در روابط زیر برای راحتی کار شاخص زمانی k حذف شده و در انتهای الگوریتم کلی روش پیشنهادی برای این شاخص شرح داده می‌شود. مدل ریاضی ارتباطی بین اندازه‌گیریها با متغیرهای حالت و پارامترهای خطوط به صورت زیر می‌باشد:

$$z = h(x, p) + v \quad (12)$$

که در آن z بردار اندازه‌گیری و x بردار حالت سیستم می‌باشد.

تابع غیرخطی $h(x, p)$ ارتباط بین اندازه‌گیریها و پارامترهای خطوط را نشان می‌دهد. p بردار خطاهای پارامتری خطوط می‌باشد و v بردار خطاهای اندازه‌گیری می‌باشد که یک متغیر گوسی تصادفی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس $\delta_{z1}^2, \delta_{z2}^2, \dots, \delta_{zm}^2$ می‌باشد. $R = \text{diag}\{\delta_{z1}^2, \delta_{z2}^2, \dots, \delta_{zm}^2\}$ اندازه‌گیری می‌باشد. اگر هیچ خطایی در پارامترها موجود نباشد، بردار p صفر خواهد بود. درنتیجه، روش تخمین حالت WLS در حضور خطاهای پارامتری می‌تواند به صورت (۱۲) فرمول بندی شود:

$$\text{Minimize } J(x) = r^T R^{-1} r \quad (12)$$

$$\text{Subject to } p = 0$$

بنابراین باستی راه حلی ارائه نمود که داده بد در مجموعه اندازه‌گیری را حذف نکند، بلکه مقدار درست را جایگزین مقدار خطدار نماید. با بکاربردن روشی مشابه اصلاح خطای پارامتری در معادله (۲۷)، می‌توان مقادیر خطدار اندازه‌گیریها را توسط معادله (۲۸) اصلاح نمود:

$$z_i^{correct} = z_i^{bad} - \frac{R(i,i)}{\Omega(i,i)} \cdot r_i^{bad} \quad (28)$$

$$r_i^{bad} = z_i^{bad} - h(\hat{x}_i^{bad})$$

فرمولاسیون گفته شده در این بخش می‌تواند برای شناسایی و اصلاح خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری خطوط به کار رود. فرآیند کلی روشن پیشنهادی در هر نمونه زمانی k را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. اجرای تخمین حالت و محاسبه بردار باقیمانده نرم‌الیزه اندازه‌گیری (r_k^N) و بردار ضرایب لاغرانژ نرم‌الیزه

پارامترهای خطوط (λ_k^N)

$$r_k^N(i) = \frac{|r_k(i)|}{\sqrt{\Omega_k(i,i)}} \quad i=1, \dots, m \quad (29)$$

$$\lambda_k^N(i) = \frac{\lambda_k(i)}{\sqrt{\Lambda_k(i,i)}} \quad i=1, \dots, n_p$$

۲. تست کردن شرط زیر:

$$\max(\lambda_k^N) > \max(r_k^N) \quad (30)$$

۳. اگر شرط بالا برقرار باشد، تست کردن شرط زیر:

$$\max(\lambda_k^N) > threshold \quad (31)$$

۴. اگر شرط (۳۱) برقرار نباشد، هیچ خطای پارامتری در

سیستم موجود نمی‌باشد و نتایج باستی چاپ شود.

۵. اگر شرط (۳۱) برقرار باشد، خطای پارامتری خط، متناظر

با بزرگترین ضریب لاغرانژ نرم‌الیزه به عنوان خطای پارامتری

شناസایی شده است. در این صورت پارامتر خط طبق رابطه

زیر اصلاح می‌شود:

$$p_k^{correct}(i) = p_k^{bad}(i) - \frac{R_{pk}(i,i)}{\Lambda_k(i,i)} \cdot \lambda_k^{bad}(i) \quad (32)$$

۶. پارامترهای خطوط موجود در پایگاه داده باید به روزرسانی

گردد و الگوریتم به مرحله ۱ برمه‌گردید.

۷. اگر شرط (۳۰) برقرار نباشد، تست کردن شرط زیر:

$$\max(r_k^N) > threshold \quad (33)$$

۸. اگر شرط (۳۳) برقرار نباشد، خطای اندازه‌گیری در مجموعه

اندازه‌گیری موجود نمی‌باشد و نتایج باستی چاپ شود.

۹. اگر شرط (۳۳) برقرار باشد، خطای اندازه‌گیری، متناظر با

بزرگترین باقیمانده نرم‌الیزه به عنوان خطای اندازه‌گیری

انتقال شامل کنداکتانس سری j $g_{i,j}$ ، سوسپیتانس سری $b_{i,j}$ و نصف

سوسپیتانس موازی $bc_{i,j}^{shunt}$ می‌باشد.

معادله (۱۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$z = h(x, p_0) + [h(x, p) - h(x, p_0)] + v \quad (23)$$

که در آن p و p_0 به ترتیب مقادیر درست و نادرست پارامترهای خطوط می‌باشد. عبارت داخل کروشه را می‌توان به صورت زیر خطی‌سازی نمود:

$$[h(x, p) - h(x, p_0)] \square \left[\frac{\partial h(x, p)}{\partial p} \right] \cdot e_p = H_p \cdot e_p \quad (22)$$

که در آن e_p بردار خطاهای پارامتری می‌باشد که یک متغیر گوسی تصادفی با میانگین صفر و ماتریس کوواریانس R_p می‌باشد. با ترکیب روابط (۲۱) و (۲۲) می‌توان به ارتباط بین بردار باقیمانده اندازه‌گیری r و بردار خطای پارامتری e_p پی بردن:

$$r = z - h(\hat{x}, p_0) \square H_p \cdot e_p \quad (23)$$

با استفاده از دو معادله (۲۳) و (۱۷) بردار خطای پارامتری را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$e_p = \frac{\lambda}{S_p \cdot H_p} = \frac{\lambda}{SH_p} \quad (24)$$

درنتیجه، ماتریس کوواریانس λ معادله (۱۹) را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{cov}(\lambda) = \text{cov}[(SH_p \cdot e_p)(SH_p \cdot e_p)^T] \\ &= SH_p \cdot \text{cov}[e_p \cdot e_p^T] = SH_p \cdot R_p \cdot SH_p^T = SH_p \cdot R_p \end{aligned} \quad (25)$$

بنابراین، خطای پارامتری تأمین پارامتر را می‌توان از معادله (۲۶) محاسبه کرد:

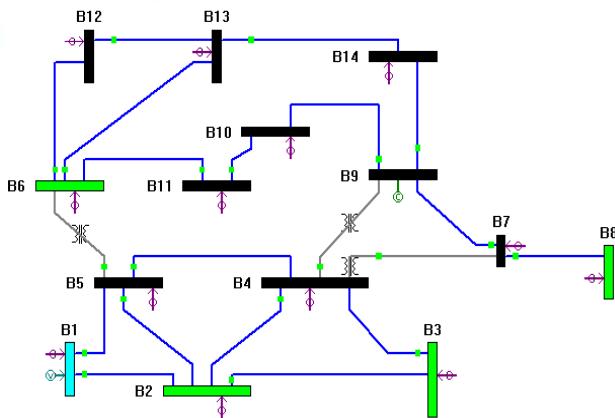
$$e_p(i) = \frac{\lambda^{bad}(i)}{SH_p(i,i)} = \frac{R_p(i,i)}{\Lambda(i,i)} \cdot \lambda^{bad}(i) \quad (26)$$

در نهایت، مقدار واقعی پارامتر شاخه را می‌توان از رابطه زیر تخمین زد و اصلاح نمود:

$$p_i^{correct} = p_i^{bad} - \frac{R_p(i,i)}{\Lambda(i,i)} \cdot \lambda^{bad}(i) \quad (27)$$

که در آن p_i^{bad} و $p_i^{correct}$ به ترتیب مقادیر درست و خطدار پارامتر شاخه شناسایی شده می‌باشند. هم‌چنین، $R_p(i,i)$ تأمین درایه ماتریس کوواریانس خطای پارامتری R_p می‌باشد.

از طرف دیگر، اگر سیستمی شامل خطاهای اندازه‌گیری متعدد باشد، روش‌های شناسایی خطاهای اندازه‌گیری اندازه‌گیری‌های خطدار را از مجموعه اندازه‌گیری حذف می‌کنند که این عمل باعث کاهش تعداد اندازه‌گیری‌ها و در نتیجه دقیق‌تر نتایج تخمینی می‌شود.



شکل (۱): سیستم تست ۱۴ باسه IEEE با ساختار اندازه‌گیریها

پارامترهای این سیستم تست را می‌توان از [۱۶] دانلود کرد. شبیه‌سازیها، برای ۴۰ نمونه زمانی ($k=40$) انجام شده است که برای نشان دادن رفتار دینامیکی سیستم، بارهای سیستم به صورت خطی با شبیه ۱٪ تغییر می‌یابند.

سناریوهای مختلفی در سیستم تست ۱۴ باسه IEEE به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

سناریوی ۱: حالت با یک خطی اندازه‌گیری

سناریوی ۲: حالت با یک خطی پارامتری خطوط

سناریوی ۳: حالت با خطاهای همزمان اندازه‌گیری و پارامتری خطوط به دلیل کمبود فضای از سناریوهای دیگری نظری حالت با خطاهای اندازه‌گیری چندگانه یا حالت با خطاهای پارامتری چندگانه و یا حضور همزمان این خطاهای چندگانه اندازه‌گیری و پارامتری صرف نظر شده است، با ذکر این مطلب که الگوریتم پیشنهادی قادر به شناسایی و اصلاح این گونه از خطاهای نیز می‌باشد.

در تمامی سناریوهای زیر مقدار آستانه (threshold) تعريف شده برای شناسایی خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری برابر ۴ در نظر گرفته شده است. در نهایت، درایه‌های ماتریس Q برابر 10^{-6} در نظر گرفته شده است و تا پایان شبیه‌سازی ثابت باقی می‌ماند. از طرفی، درایه‌های ماتریس F_k و بردار g_k با استفاده از روش هموارسازی نمایی خطی به صورت آنلاین با مقادیر مفروض $\alpha_k = 0.8$ و $\beta_k = 0.5$ به روزرسانی می‌شوند [۱۷].

برای ارزیابی الگوریتم، شاخص‌های زیر فرض شده‌اند که ارتباط بین مقادیر تخمینی و پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری را نشان می‌دهد

:[۱۸]

$$predict\ index_k = \left| \frac{\tilde{x}_k - x_k^{true}}{x_k^{true}} \right| \times 100\% \quad (۳۳)$$

$$estimate\ index_k = \left| \frac{\hat{x}_k - x_k^{true}}{x_k^{true}} \right| \times 100\% \quad (۳۴)$$

شناسایی شده است. در این صورت اندازه‌گیری خطادار باقیستی طبق رابطه زیر اصلاح شود:

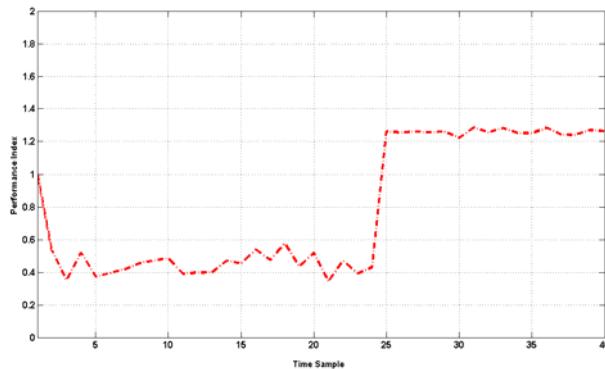
$$z_k^{correct}(i) = z_k^{bad}(i) - \frac{R_k(i,i)}{\Omega_k(i,i)} \cdot r_k^{bad}(i) \quad (۳۲)$$

- اندازه‌گیریها موجود در پایگاه داده باید به روزرسانی گردد و الگوریتم به مرحله ۱ برمی‌گردد.
- ۵. این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که هیچ داده بدی در مجموعه اندازه‌گیری و هیچ خطای پارامتری شاخه موجود نباشد. بعد از این مرحله درایه‌های هر دو بردار ضرایب لاغرانژ نرمالیزه و با قیمانده نرمالیزه اندازه‌گیری کوچکتر از مقدار آستانه مفروض می‌باشد.

البته باقیستی به این نکته توجه نمود که در تخمین حالت دینامیکی و در فرمولاسیون بالا، بردار تغییر نرمالیزه نیز محاسبه می‌شود و بردار حالت در بازه زمانی بعد پیش‌بینی نیز می‌شود و می‌توان نتایج تخمینی بعد از اصلاح خطاهای را با نتایج پیش‌بینی مقایسه کرد و به تفاوت‌های آنها پی‌برد. هم‌چنین، نتایج تخمینی متغیرهای حالت از نتایج پیش‌بینی شده متغیرهای حالت به دست می‌آیند. توضیح این نکته ضروری است که عملاً اگر پیش‌بینی بردار حالت موجود باشد، از تحلیل تغییر و در غیر این صورت از تحلیل باقیمانده اندازه‌گیری استفاده می‌شود.

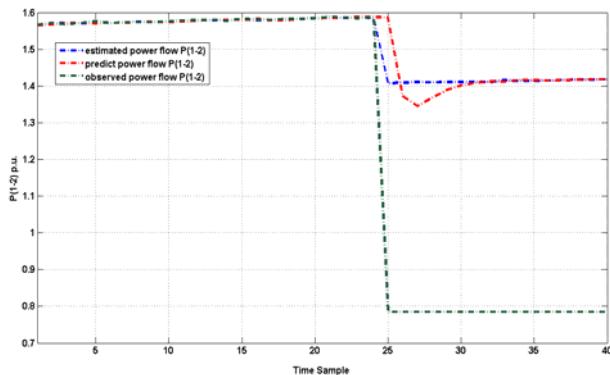
۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، برای اثبات کارآیی الگوریتم پیشنهادی در تشخیص، شناسایی و اصلاح خطاهای سیستم تست ۱۴ باسه IEEE با سناریوهای مختلفی در نظر گرفته شده است. در شکل (۱)، ساختار سیستم تست ۱۴ باسه IEEE به همراه اندازه‌گیریها موجود نشان داده شده است. اندازه‌گیریها طوری انتخاب شده‌اند که در تمامی بس‌ها، اندازه‌گیر توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی و در تمامی خطوط در یک سمت، اندازه‌گیری توان‌های اکتیو و راکتیو جاری موجود می‌باشد. فقط از یک اندازه‌گیر اندازه ولتاژ در بس مرجع استفاده شده است. توجه به این نکته ضروری است که مقادیر درست اندازه‌گیری‌ها را می‌توان از پخش بار به دست آورد و برای تولید مقادیر اندازه‌گیریها، نویز تصادفی با میانگین صفر و با واریانس معلوم به اندازه‌گیریها افزوده می‌شوند. در این مقاله، انحراف معیار ۰/۲٪ برای توان‌ها و ۰/۱٪ برای ولتاژ در نظر گرفته شده است [۱۵].



شکل (۳): شاخص اجرا در سناریوی ۱ بدون اعمال الگوریتم پیشنهادی

در نهایت، در شکل (۴) مقادیر تخمینی (آبی)، پیش‌بینی‌شده (قرمز) و اندازه‌گیری شده (سبز) برای توان اکتیو جاری از باس ۱ به باس ۲ (P_{1-2}) بدون الگوریتم اصلاحی نشان داده شده است. کاملاً مشهود می‌باشد که بعد از نمونه زمانی ۲۵ که شروع خطا می‌باشد، مقادیر پیش‌بینی و تخمینی اختلاف بسیار زیادی با مقادیر اندازه‌گیری شده P_{1-2} دارد و در نتیجه مقادیر متغیرهای حالت از دقت پیش‌بینی برخوردار می‌باشد.



شکل (۴): مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده برای P_{1-2} در سناریوی ۱ بدون اعمال الگوریتم پیشنهادی

حال با الگوریتم اصلاحی پیشنهادی، دوباره شکل‌های (۵-۷) مشابه شکل‌های (۲-۴) رسم شده است. کاملاً از شکل‌ها پیداست که الگوریتم پیشنهادی توانسته است مقادیر تخمینی را به مقادیر اندازه‌گیری نزدیک نماید و بهنحوی خطاها را حذف نماید. از شکل (۷) می‌توان دریافت که در بازه زمانی ۲۵ تا ۴۰ که خطا رخ داده است، مقدار پیش‌بینی شده، تخمینی و اندازه‌گیری برای P_{1-2} با دقت بالای با همدیگر برابر می‌باشند و این نشان‌دهنده صحت بالای الگوریتم پیشنهادی می‌باشد.

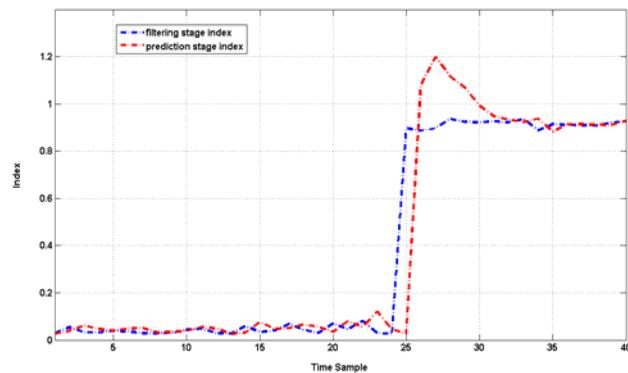
$$\text{performance index}_k = \frac{\sum_{i=1}^m |\hat{z}_k^i - z_k^{true i}|}{\sum_{i=1}^m |z_k^i - z_k^{true i}|} \quad (35)$$

در روابط بالا کمیت‌های با اندیس $true$ نتایج بدست‌آمده از پخش بار می‌باشند (\hat{z}^{true} ، مقادیر واقعی اندازه‌گیری بدون نویز و x^{true} ، مقادیر واقعی متغیرهای حالت). بردار \hat{z} با افودن نویز گوسی با میانگین صفر و با واریانس معالمون به \hat{z}^{true} بهدست می‌آید. هم‌چنین، \hat{x} مقدار پیش‌بینی شده و \hat{x} مقدار تخمینی متغیرهای حالت می‌باشد.

۱-۱- سناریوی ۱: حالت با خطای اندازه‌گیری

در این سناریو، یک خطای اندازه‌گیری به مقدار ۵٪ در توان اکتیو جاری از باس ۱ به باس ۲ (P_{1-2}) درنظر گرفته شده است که در نمونه زمانی ۲۵ رخ می‌دهد و تا پایان نمونه زمانی ۴۰ در سیستم باقی می‌ماند (به طور میانگین از ۱/۵۷ پریونیت به ۰/۷۹ پریونیت).

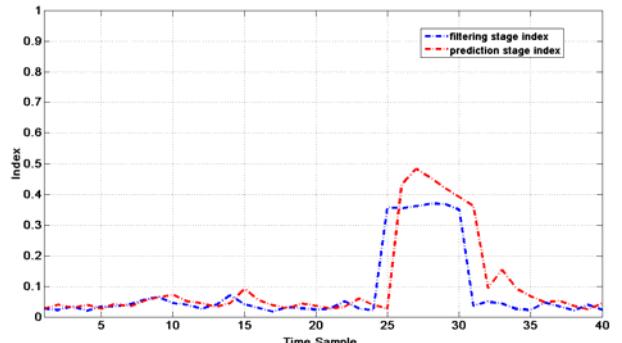
در ابتدا، حالت را بررسی می‌کنیم که الگوریتم اصلاحی پیشنهادی به کار نرفته است (شکل‌های (۲-۴)). شکل (۲) شاخص پیش‌بینی (نمودار قرمز) و شاخص تخمینی (نمودار آبی) تعریف شده در رابطه (۳۳) و (۳۴) در ۴۰ نمونه زمانی را برای این حالت نشان می‌دهد. از شکل مشهود است که از نمونه زمانی ۲۵ که شروع خطا می‌باشد تا پایان اجرا در نمونه زمانی ۴۰ هر دو شاخص افزایش یافته‌اند که نشان‌گر وجود اختلاف بین مقادیر تخمینی و پیش‌بینی شده و واقعی متغیرهای حالت می‌باشد.



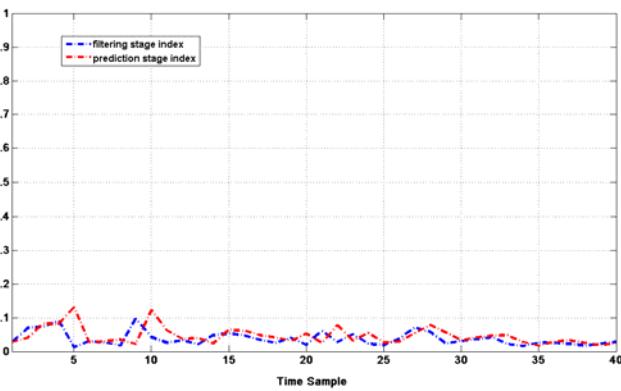
شکل (۲): شاخص پیش‌بینی و تخمینی در سناریوی ۱ بدون اعمال الگوریتم پیشنهادی

شکل (۳)، شاخص اجرای تعریف شده در رابطه (۳۵) را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده وجود اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری‌ها می‌باشد.

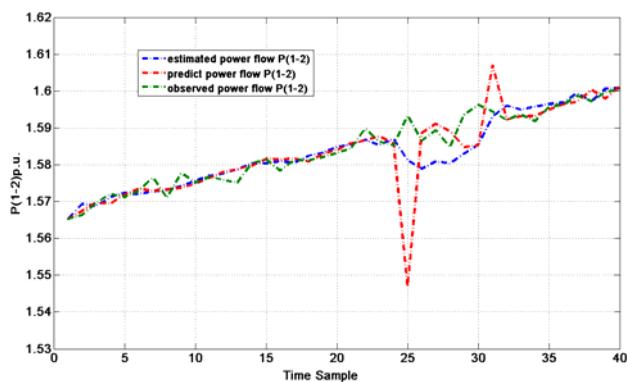
تخمینی در سناریوی ۲ را نشان می‌دهد و شکل (۹) بیانگر مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده P_{1-2} بدون روش پیشنهادی می‌باشد.



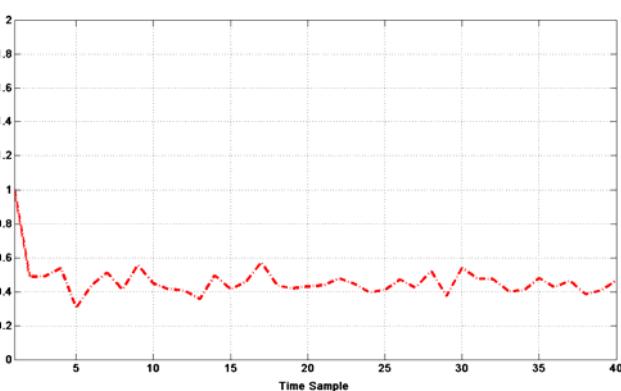
شکل (۸): شاخص پیش‌بینی و تخمینی در سناریوی ۲ بدون اعمال الگوریتم پیشنهادی



شکل (۵): شاخص پیش‌بینی و تخمینی در سناریوی ۱ با اعمال الگوریتم پیشنهادی

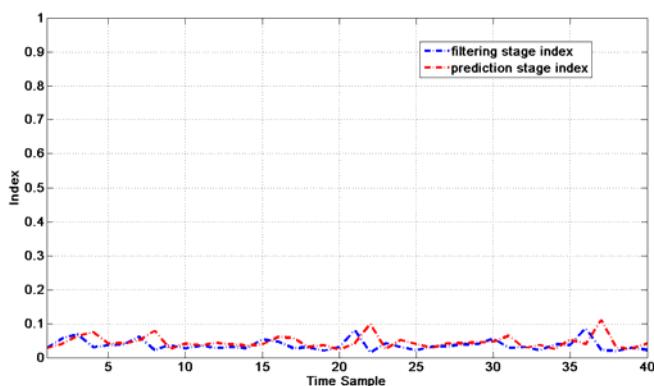


شکل (۹): مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده برای P_{1-2} در سناریوی ۲ بدون اعمال الگوریتم پیشنهادی

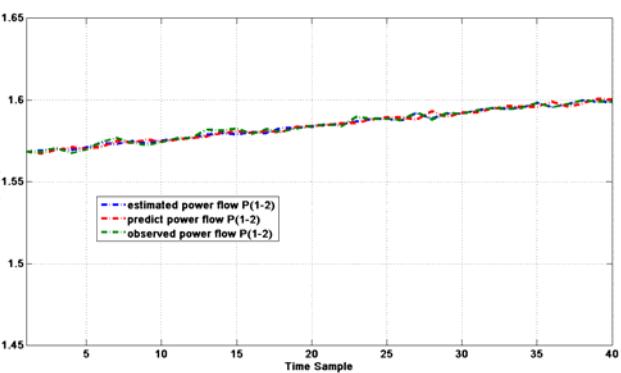


شکل (۶): شاخص اجرا در سناریوی ۱ با اعمال الگوریتم پیشنهادی

حال با اجرای روش پیشنهادی، می‌توان دو شکل قبلی را برای سناریوی ۲ در شکل‌های (۱۰-۱۱) خلاصه کرد که باز نشان‌دهنده کارآیی بالای الگوریتم می‌باشد. البته مقدار g_{1-2} با روش پیشنهادی در بازه زمانی ۲۵ تا ۳۰ به طور میانگین ۵ پریونیت تخمین زده شده است که به مقدار واقعی نزدیک می‌باشد.



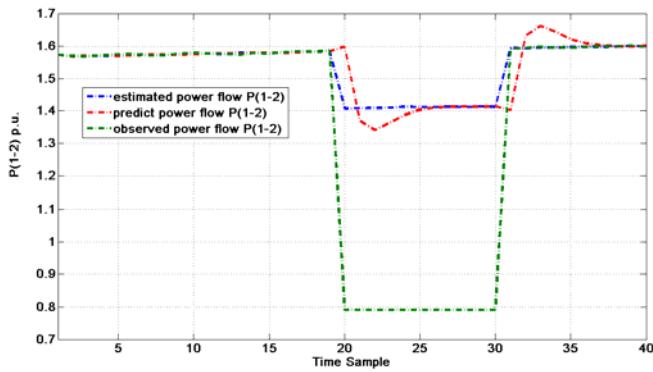
شکل (۱۰): شاخص پیش‌بینی و تخمینی در سناریوی ۲ با اعمال الگوریتم پیشنهادی



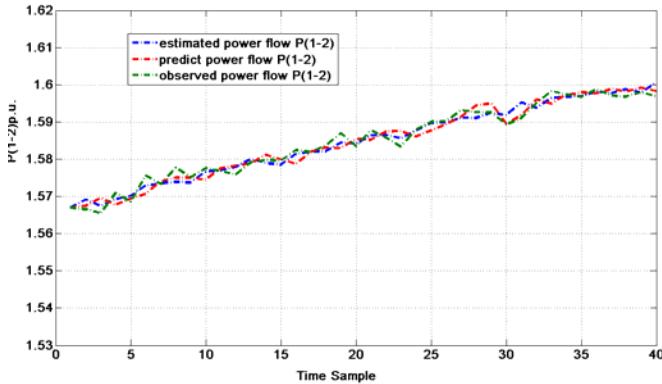
شکل (۷): مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده برای P_{1-2} در سناریوی ۱ با اعمال الگوریتم پیشنهادی

۴-۲-۲- سناریوی ۲: حالت با خطای پارامتری خطوط

در این حالت، فرض می‌شود که خطای پارامتری به مقدار ۵٪ در سوسپتانس سری شاخه ارتباطی باس ۱ به باس ۲ (g_{1-2}) در نمونه زمانی ۲۵ رخ داده و تا پایان نمونه زمانی ۳۰ این خطأ وجود دارد. مقدار واقعی این پارامتر $4/999$ پریونیت می‌باشد و مقدار خطدار آن ۲/۵ پریونیت درنظر گرفته شده است. شکل‌های (۸-۹) برای حالت بدون اعمال روش پیشنهادی می‌باشد. شکل (۸) شاخص پیش‌بینی و

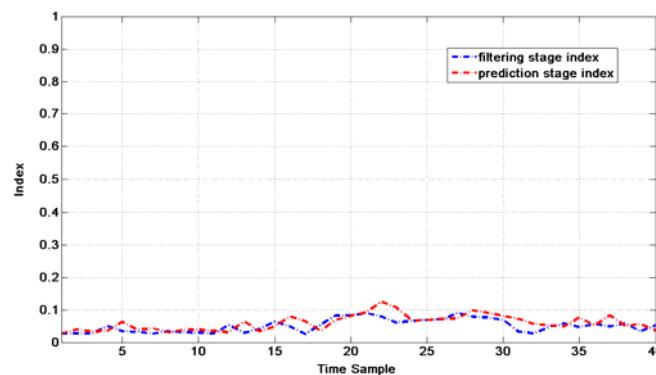


شکل (۱۳): مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده برای P_{1-2} در سناریوی ۳ بدون اعمال الگوریتم پیشنهادی

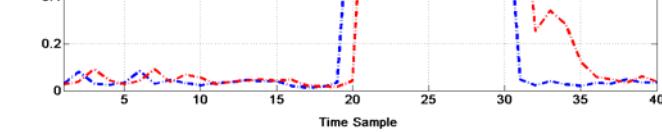


شکل (۱۱): مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده برای P_{1-2} در سناریوی ۲ با اعمال الگوریتم پیشنهادی

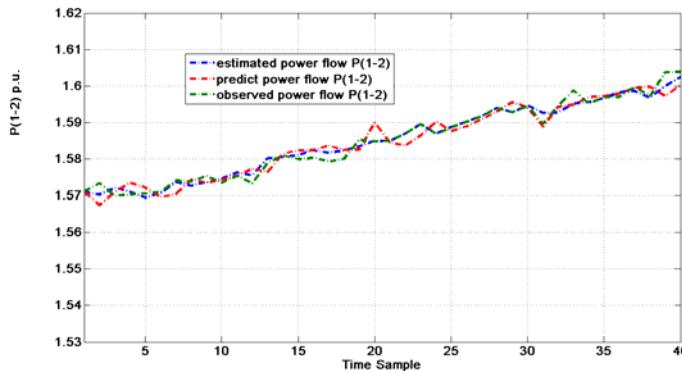
روش پیشنهادی برای این سناریو نیز به کار رفته و نتایج آن در شکل‌های (۱۴-۱۵) خلاصه شده است. شکل (۱۴)، شاخص‌های پیش‌بینی و تخمینی را نشان می‌دهد و شکل (۱۵) معرف مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده P_{1-2} می‌باشد. به عنوان یک نتیجه، از شکل‌های (۱۴-۱۵) می‌توان دریافت که روش پیشنهادی توانسته مقادیر اندازه‌گیری و پارامترها را به درستی تخمین بزند به نحوی که متغیرهای حالت در هر سه حالت پیش‌بینی، تخمینی و واقعی به هم نزدیک می‌باشند. در این حالت کمترین مقدار تخمینی پارامتر g_{1-2} برابر $4/989$ و بیشترین مقدار برابر $5/01$ می‌باشد.



شکل (۱۴): شاخص پیش‌بینی و تخمینی در سناریوی ۳ با اعمال الگوریتم پیشنهادی



شکل (۱۲): شاخص پیش‌بینی و تخمینی در سناریوی ۳ بدون اعمال الگوریتم پیشنهادی

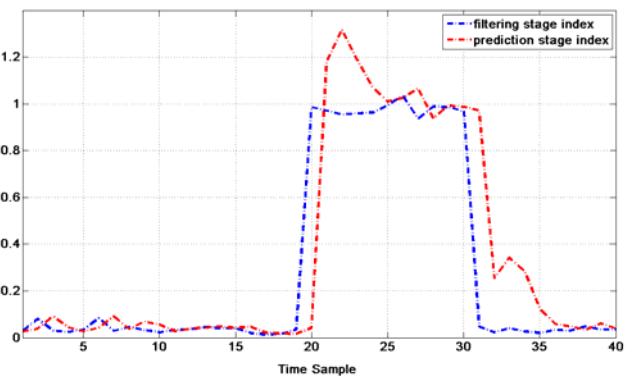


شکل (۱۵): مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده برای P_{1-2} در سناریوی ۳ با اعمال الگوریتم پیشنهادی

۴-۳-۴- سناریوی ۳: حالت با خطای همزمان اندازه‌گیری و پارامتری خطوط

این سناریو، حالتی را درنظر می‌گیرد که هر دو خطای ذکر شده در سناریوی‌های ۱ و ۲ در سیستم رخ می‌دهد که از نمونه زمانی ۲۰ تا ۳۰ ادامه می‌یابد، یعنی یک خطای اندازه‌گیری 5.0% در اندازه‌گیری P_{1-2} و یک خطای پارامتری 5.0% در پارامتر g_{1-2} در این بازه زمانی رخ می‌دهد.

شکل‌های (۱۲-۱۳) بیانگر حالت بدون به کارگیری روش پیشنهادی می‌باشد که شکل (۱۲) شاخص پیش‌بینی و تخمینی در سناریوی ۳ را نشان می‌دهد. شکل (۱۳) نیز مقادیر پیش‌بینی، تخمینی و اندازه‌گیری شده P_{1-2} را مشخص می‌کند.



شکل (۱۰): شاخص پیش‌بینی و تخمینی در سناریوی ۳ بدون اعمال الگوریتم پیشنهادی

- [8] Debs, A. S., Larson, R. E., "A Dynamic Estimator for Tracking the State of a Power System," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 7, pp. 1670-1678, September/October 1970.
- [9] Zarco, P., Exposito, A. G., "Power System Parameter Estimation: A Survey," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 216-222, February 2000.
- [10] Monticelli, A., Garcia, A., "Reliable Bad Data Processing for Real-time State Estimation," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 3, pp. 1126-1139, May 1983.
- [11] Filho, M. B. C., Souza, J. C. S., "Forecasting-aided State Estimation-Part I: Panorama," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 24, No. 4, pp. 1667-1677, November 2009.
- [12] Filho, M. B. C., Souza, J. C. S., "Forecasting-aided State Estimation-Part II: Implementation," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 24, No. 4, pp. 1678-1685, November 2009.
- [13] Makridakis, S. G., Wheelwright, S. C., Hyndman, R. J., "Forecasting: Methods and Applications," 6th edition, New York: Wiley, 1998.
- [14] Filho, M. B. C., Silva, A. M. L., Cantera, M. C., Silva, R. A., "Information Debugging for Real-Time Power Systems Monitoring," Proceeding on Inst. Electrical Engineering Conference, Vol. 136, No. 3, pp. 145-152, May 1989.
- [15] Valverde, G., Terzija, V., "Unscented Kalman Filter for Power System Dynamic State Estimation," IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 5, No. 1, pp. 29-37, 2011.
- [16] Power System Test Case Achieve: University of Washington,
<http://www.ee.washington.edu/research/pstca>.
- [17] Silva, L. D., Filho, M. B. C., Cantera, J., "State Forecasting in Electric Power Systems," IEE Proceeding on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 130, No. 5, pp. 237-244, June 1983.
- [18] Shih, K. R., Huang, S. J., "Application of a Robust Algorithm for Dynamic State Estimation of a Power System," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 141-147, February 2002.

توجه به این نکته ضروری است که سناریوهای مختلفی مانند خطای اندازه‌گیریها یا پارامترهای دیگر یا خطای همزمان چند اندازه‌گیری یا پارامتر در یک نمونه زمانی و ... با روش پیشنهادی اجرا شده است و همگی با دقیق بسیار بالایی به جواب رسیده‌اند. ولی در اینجا به دلیل کمبود فضا فقط سه سناریو را که تا حدی بتواند ماهیت روش پیشنهادی را خلاصه کند، توضیح داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برپایه فیلتر کالمون در تخمین حالت دینامیکی سیستم‌های قدرت پیشنهاد شد که قادر خواهد بود در شرایط مختلف بروز خطاهای اندازه‌گیری و پارامتری حتی زمانی که به طور همزمان رخ می‌دهند، این خطاهای را شناسایی و سپس اصلاح نماید. روش پیشنهادی از سه مرحله محاسبه بردارهای نرم‌الایزه، شناسایی خطاهای اصلاح و تخمین مقادیر نادرست اندازه‌گیریها و پارامترهای خطوط تشکیل شده است. روش پیشنهادی در صورت بروز خطای اندازه‌گیریها، آنها را از مجموعه اندازه‌گیری حذف نمی‌نماید، بلکه آنها را اصلاح می‌کند. درنهایت، برای اثبات کارآیی روش پیشنهادی، سناریوهای مختلفی با درنظر گرفتن خطاهای بر روی سیستم تست ۱۴ با سه IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارآیی و دقیق بسیار بالای الگوریتم پیشنهادی در شناسایی و اصلاح خطاهای در حالت‌های مختلف می‌باشد.

مراجع

- [1] Abur, A., Exposito, A. G., "Power System State Estimation: Theory and Implementation", Marcel & Dekker Publisher, New York, 2004.
- [2] Schievepe, F. C., Wildes, J., "Power System Static State Estimation, Part I: Exact Model," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 2, pp. 120-125, January 1970.
- [3] Schievepe, F. C., Rom, D. B., "Power System Static State Estimation, Part II: Approximation Model," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 2, pp. 125-130, January 1970.
- [4] Schievepe, F. C., "Power System Static State Estimation, Part III: Implementation," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 2, pp. 130-135, January 1970.
- [5] Exposito, A. G., Jaen, A. V., "Two-Level State Estimation with Local Measurement Pre-Processing," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 676-684, May 2009.
- [6] Shih, K. R., Huang, S. J., "Application of a Robust Algorithm for Dynamic State Estimation of a Power System," IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 141-147, February 2002.
- [7] Debs, A., "Estimation of Steady-state Power System Model Parameters," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 5, pp. 1260-1268, 1974.