

ترکیب دستگاه‌های اندازه‌گیری متداول و PMU به منظور افزایش کارایی تخمین‌گر حالت سیستم قدرت همراه با پردازش داده‌های بد

سید امیر موسوی پیرنعمی^۱، سید محمد تقی بطحائی^۲

^۱دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق، a.mousavi@ee.kntu.ac.ir

^۲دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق، bathaee@kntu.ac.ir

چکیده - تخمین‌گر حالت یک تابع کلیدی برای کنترل، تحلیل و پایش آنلاین سیستم قدرت می‌باشد. با افزایش استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU) در سیستم قدرت، چگونگی بهره‌برداری از اندازه‌گیری‌های فازور برای بهبود دقت تخمین‌گر حالت یک امر ضروری می‌باشد. از آنجایی که اکثریت اندازه‌گیری‌ها در تخمین‌گرهای موجود از نوع متداول می‌باشند لذا جایگزینی کامل آنها توسط PMU در آینده نزدیک کار دشواری است از اینرو بهترین راه، توسعه تخمین‌گرهای ترکیبی می‌باشد. در این مقاله، الگوریتم حداقل مربعات وزندار (WLS) برای تخمین‌گر حالت ترکیبی شامل هر دو اندازه‌گیری متداول و فازوری ارائه شده و از فازور جریان در مختصات دکارتی استفاده شده است. همچنین چگونگی محاسبه کوواریانس خطای اندازه‌گیری‌ها و موضوع انتقال خطا مطرح شده و از آزمون مربعات کای و روش مانده نرمالیزه‌شده برای تشخیص و شناسایی داده‌های بد در اندازه‌گیری‌های فازوری و متداول استفاده شده است. سپس روش ارائه شده بر روی شبکه تست IEEE ۱۴-Bus مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

کلید واژه - انتقال خطا؛ تخمین‌گر حالت ترکیبی؛ PMU؛ پردازش داده‌های بد

۱- مقدمه

از مختصات دکارتی برای اندازه‌گیری‌های فازور و متغیرهای حالت استفاده شود، در آن صورت ارتباط بین متغیرهای حالت و اندازه‌گیری‌های فازور خطی بوده و حالت‌های سیستم را می‌توان توسط یک الگوریتم غیر تکرار خطی بدست آورد [۶]. اما از آنجایی که اکثریت اندازه‌گیری‌ها در تخمین‌گرهای موجود از نوع متداول می‌باشند، لذا جایگزینی کامل آنها توسط PMU‌ها در آینده نزدیک کار دشواری می‌باشد و در نتیجه، تخمین‌گرهای حالت شامل هر دو اندازه‌گیری متداول و فازوری (ترکیبی) ضروری می‌باشند.

در [۷] یک الگوریتم دو مرحله ای ارائه شده است که شامل اندازه‌گیری‌های فازور و نتایج حاصل از تخمین حالت سنتی در تخمین‌گر خطی می‌باشد و نتایج یکسانی را همانند الگوریتم غیر خطی فراهم می‌کند. سه روش متفاوت از مدلسازی اندازه‌گیری‌های جریان توسط PMU در [۸-۹] مورد بررسی قرار گرفته‌اند و کارایی آنها در دقت و همگرایی تخمین حالت مقایسه شده است. در [۱۰] یک تخمین‌گر حالت ترکیبی دارای قید پیشنهاد شده است، که اندازه‌گیری‌های سنتی و سینکروفازور را ترکیب می‌کند و از تبدیل بی‌بو برای تقریب انتشار عدم قطعیت استفاده می‌کند. در [۱۱] یک تخمین‌گر حالت چند ناحیه‌ای پیشنهاد شده است که در آن یک هماهنگ‌کننده مرکزی نتایج حاصل از تخمین‌گرهای حالت هر منطقه و همچنین

در دهه‌های اخیر، به علت فرآیند تجدید ساختار، صنعت برق در حال متحمل شدن تغییرات متعددی می‌باشد. امروزه بازارهای برق رقابتی، تولید انرژی با بهره‌وری بالا، نوآوری‌های فنی و در نهایت قیمت‌های خرده‌فروشی پایین‌تر را فراهم می‌کنند. در این محیط، بهره‌برداری ایمن از یک سیستم قدرت نیازمند پایش دقیق وضعیت‌های عملیاتی (کاری) آن می‌باشد. این امر به‌طور سنتی توسط تخمین‌گرهای حالت انجام می‌شود که حالت‌های بهینه‌ای از فازور ولتاژ شین‌ها را فراهم می‌کنند و مبتنی بر اندازه‌گیری‌های افزونه فراهم شده توسط سیستم کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده (SCADA) می‌باشند که این اندازه‌گیری‌ها شامل توان‌های اکتیو و راکتیو جاری شده در خطوط، تزریقی به شین‌ها و اندازه ولتاژ شین‌ها می‌باشند [۱-۴]. در سال‌های اخیر، با افزایش استفاده از PMU‌ها دقت و قابلیت اطمینان تخمین حالت بهبود یافته است. بر خلاف سیستم‌های متداول SCADA، PMU قادر به اندازه‌گیری فازور ولتاژ شین نصب شده در آن، و همچنین فازورهای جریان تمام خطوط متصل شده به آن شین می‌باشد [۵]. اگر در یک سیستمی که به‌طور کامل تنها توسط PMU مشاهده پذیر باشد و

اندازه‌گیری‌های مناطق مرزی را دریافت می‌کند و راه حلی برای کل سیستم را محاسبه می‌نماید.

در این مقاله جهت تخمین حالت سیستم قدرت از یک روش غیرخطی استفاده شده است که در آن اندازه‌گیری‌های متداول و PMU در ابتدا با هم ادغام می‌شوند و پس از همگرا شدن الگوریتم، برای تشخیص حضور داده‌های بد از آزمون مربعات کای و برای شناسایی آنها، آزمایش مانده نرمالیزه شده بکارگیری شده است. این مقاله شامل پنج بخش است، در بخش دوم فرمول‌بندی مسئله در دو قسمت، روش WLS متداول و ادغام اندازه‌گیری‌های PMU در تخمین گر حالت WLS تشریح می‌شود. در بخش سوم تشخیص و شناسایی داده‌های بد به کمک آزمون مربعات کای و آزمون بزرگترین مانده نرمالیزه شده مطرح شده است. در بخش چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی روی شبکه IEEE ۱۴-Bus ارائه شده، و در خاتمه بخش پنجم نیز به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

۲-۱- روش WLS متداول

در این روش هدف، حداقل کردن مجموع مربعات اختلاف مقادیر اندازه‌گیری با مقادیر واقعی می‌باشد. در یک شبکه قدرت مقادیر پارامترهایی را که دستگاه‌های اندازه‌گیری اندازه می‌گیرند، انحراف کمی از مقدار واقعی دارد. مطابق [۱۴-۱۳]، مدل اندازه‌گیری تخمین حالت در (۱) ارائه شده است:

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

که در آن z بردار اندازه‌گیری، x بردار حالت سیستم، e بردار خطای اندازه‌گیری و $h(x)$ تابعی غیر خطی است که نشان‌دهنده ارتباط بین اندازه‌گیری‌ها با متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. فرض می‌شود که خطاها به صورت مستقل و ناهمبسته‌اند و دارای توزیع نرمال با میانگین صفر $E(e) = 0$ و کوواریانس $R = \text{cov}(e) = E(ee^T)$ می‌باشند. ماتریس کوواریانس خطاها (R)، یک ماتریس قطری می‌باشد که هر قطر آن معادل σ_i^2 است که σ_i انحراف استاندارد اندازه‌گیری i ام می‌باشد. در تخمین گر WLS متداول، مطابق (۲) بردار اندازه‌گیری z شامل اندازه ولتاژ شین‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شین‌ها و توان‌های اکتیو و راکتیو جاری شده در خطوط می‌باشد.

$$Z = [P_{inj}^T, Q_{inj}^T, P_{flow}^T, Q_{flow}^T, |V|^T] \quad (2)$$

برای دستیابی به تخمین حالت بهینه، تابع هدف زیر باید

مینیمم شود:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x))^2 / R_{ii} \quad (3)$$

$$= [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)]$$

بدین منظور برای کمینه شدن از تابع هدف مشتق گرفته و مساوی صفر قرار داده می‌شود:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (4)$$

که در آن H ماتریس ژاکوبین نام دارد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$H(x) = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right] \quad (5)$$

بسط سری تیلور تابع غیرخطی $g(x)$ حول بردار حالت x^k و صرف نظر کردن از مرتبه‌های بالاتر، منجر به طرح یک راه حل تکراری شده که با عنوان روش نیوتن-رافسون به صورت (۶) مطرح می‌شود و برای حل (۳) مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} \cdot g(x^k) \quad (6)$$

که در آن، k شاخص تکرار و x^k بردار حالت در تکرار k و $G(x)$ ماتریس بهره نامیده می‌شود و به صورت (۷) بیان می‌شود:

$$G(x^k) = H^T(x^k) R^{-1} H(x^k) \quad (7)$$

$$g(x^k) = -H^T(x^k) R^{-1} (z - h(x^k)) \quad (8)$$

تکرار تا زمانی ادامه می‌یابد که تغییرات متغیرهای حالت $(\Delta x^{k+1} = x^{k+1} - x^k)$ کمتر از یک رنج قابل قبول باشد:

$$\text{Max} |\Delta x^k| < \varepsilon \quad (9)$$

که در آن ε یک مقدار خیلی کوچکی است و معمولاً 10^{-4} در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- ترکیب اندازه‌گیری‌های PMU در تخمین گر

حالت WLS

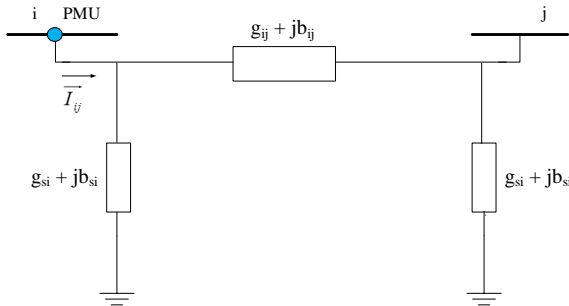
یکی از روش‌های ترکیب اندازه‌گیری‌های فازور با اندازه‌گیری‌های متداول در شکل ۱ نشان داده شده است. در این روش اندازه‌گیری‌های متداول و اندازه‌گیری‌های فازوری در یک تخمین گر حالت ترکیب ادغام می‌شوند.

در این روش، هر دو اندازه‌گیری‌های فازور ولتاژ و جریان در تخمین گر حالت WLS متداول گنجانده شده‌اند. نکته حائز اهمیت این است که، در سیستم اندازه‌گیری SCADA برای

(۱۰)

$$Z = [P_{inj}^T, Q_{inj}^T, P_{flow}^T, Q_{flow}^T, |V|^T, \delta^T, I_{ij,r}^T, I_{ij,i}^T]$$

برای ایجاد مدل ریاضی مسئله تخمین حالت، مدل π یک خط متصل به دو شین i و j در نظر گرفته شده است که مطابق با شکل ۳ یک PMU در شین i نصب شده است. که در آن $y_{si} = g_{si} + jb_{si}$ سری خط و $y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ ادمیتانس موازی بین شین i و زمین، $\vec{V}_i = V_i \angle \delta_i$ و $\vec{V}_j = V_j \angle \delta_j$ به ترتیب فازور ولتاژ شین i و j می باشد.



شکل ۳: مدل π از دو شین شبکه به همراه PMU نصب شده در شین i در [۱۴] توان های اکتیو و راکتیو جاری شده بین دو شین i و j ، و توان های اکتیو و راکتیو تزریقی در شین i ، به عنوان تابعی از \vec{V}_i و \vec{V}_j و پارامترهای خط بیان شده است. با استفاده از قانون کیرشهف، جریان بین شین ها (\vec{I}_{ij}) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\vec{I}_{ij} = \vec{V}_i y_{si} + (\vec{V}_i - \vec{V}_j) y_{ij} = \vec{V}_i (y_{si} + y_{ij}) - \vec{V}_j y_{ij} \quad (11)$$

جریان جاری شده در بین شین ها را می توان در مختصات دکارتی مطابق رابطه (۱۲) بیان کرد:

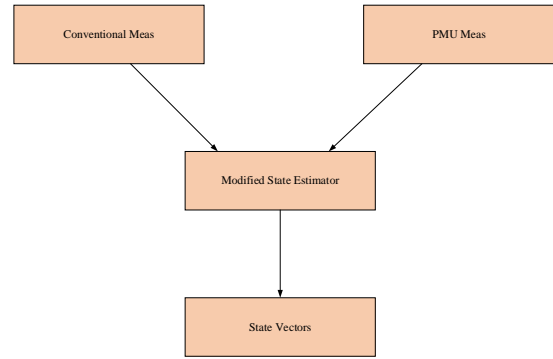
$$\vec{I}_{ij} = I_{ij,r} + jI_{ij,i} \quad (12)$$

که در آن زیر نویس r و i به ترتیب بیانگر قسمت حقیقی و موهومی فازور جریان می باشند که مطابق با (۱۳) و (۱۴) بیان می شوند:

$$I_{ij,r} = V_i [(g_{ij} + g_{si}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{si}) \sin \delta_i] - V_j [g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j] \quad (13)$$

$$I_{ij,i} = V_i [(b_{ij} + b_{si}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{si}) \sin \delta_i] - V_j [b_{ij} \cos \delta_j - g_{ij} \sin \delta_j] \quad (14)$$

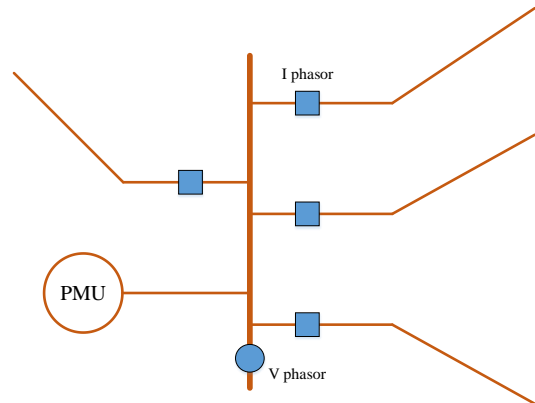
ماتریس ژاکوبین ارتباط بین مقادیر اندازه گیری شده و متغیرهای حالت را بیان می کند. که درایه های آن بیانگر مشتق توابع اندازه گیری بر حسب متغیرهای حالت می باشند. با افزودن اندازه گیری های فازور به علت استفاده از PMU، بردار اندازه گیری



شکل ۱: تخمین گر حالت ترکیبی

محاسبه زاویه فازوری نسبی همه شین های سیستم، بایستی یک شین (معمولاً شین اسلک در اغلب موارد) به عنوان شین مرجع در نظر گرفته شود. همانطور که گفته شد زاویای فازور ولتاژ بدست آمده توسط تخمین حالت نسبت به این زاویه مرجع سنجیده می شوند. اندازه گیری های فازوری همزمان ممکن است مرجع متفاوت داشته باشند. در صورتی که هماهنگی لازم جهت تعیین مرجع یکسان انجام نشود، خطای آشکاری در نتایج بدست آمده مشاهده خواهد شد. راه حل معرفی شده برای برطرف کردن این مشکل، اندازه گیری زاویه فاز شین اسلک (مرجع در نظر گرفته شده در سیستم SCADA) توسط قرار دادن یک PMU در آن شین و در نظر گرفتن آن به عنوان یک مرجع مشترک می باشد [۱۵-۱۶].

شکل ۲ یک واحد اندازه گیری فازوری نصب شده در یک شین نمونه را نشان می دهد. PMU ها قادرند مقدار فازور ولتاژ شین نصب شده در آن و فازور جریان خطوطی که از آن شین به دیگر شین ها متصل می باشند را به صورت داده های اندازه گیری شده در اختیار تخمین گر حالت قرار دهند.



شکل ۲: اندازه گیری های فازور توسط PMU نصب شده در یک شین

هنگامی که PMU ها در سیستم قدرت بکار گرفته شوند، در آن صورت بردار اندازه گیری مطابق (۱۰) تقویت شده و ترکیبی از اندازه گیری های متداول فراهم شده توسط SCADA و اندازه گیری های فازور فراهم شده توسط PMU می باشد:

۳- تشخیص و شناسایی داده‌های بد

تشخیص و شناسایی داده‌های بد نه تنها در اندازه‌گیری‌های معمولی بلکه در اندازه‌گیری‌های فازوری هم از اهمیت بالایی برخوردار است، چون که این خطاها تاثیر قابل توجهی روی حالت‌های تخمین‌زده شده خواهند داشت [۱۲]. در این مقاله، آزمون مربعات کای و آزمون بزرگترین مانده نرمالیزه شده به ترتیب برای تشخیص و شناسایی داده‌های بد مورد استفاده قرار می‌گیرند که در ادامه به صورت مختصر تشریح خواهند شد:

۳-۱- آزمون مربعات کای

همانطور که قبلاً بیان شد، در روش WLS تابع هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$J(x) = r^T R^{-1} r \quad (28)$$

که در آن $r = z - h(x)$ بردار مانده تخمین‌زده شده نام دارد. از آنجایی که خطاهای اندازه‌گیری دارای توزیع نرمال با میانگین صفر هستند لذا مجموع مربعات آن $J(x)$ دارای توزیع مربعات کای با n درجه آزادی می‌باشد $(J(x) \sim \chi_{m-n}^2)$. m و n به ترتیب بیان‌کننده تعداد اندازه‌گیری‌ها و متغیرهای حالت می‌باشند. بنابراین هنگامی که رابطه زیر صدق کند آنگاه می‌توان به حضور داده بد مشکوک شد در غیر این صورت اندازه‌گیری‌ها فاقد داده‌های بد می‌باشند:

$$J(x) \geq \chi_{m-n,p}^2 \quad (29)$$

که در آن p ضریب اطمینان تشخیص نام دارد.

۳-۲- آزمون بزرگترین مانده نرمالیزه شده

برای شناسایی داده‌های بد از تجزیه و تحلیل بردار مانده‌های نرمالیزه‌شده استفاده شده است. بردار مانده‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{r} = z - h(x) \quad (30)$$

برای نرمالیزه کردن مانده‌ها، محاسبه ماتریس کوواریانس مانده‌ها ضروری می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{cov}(r) = R - H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (31)$$

بنابراین مانده‌های نرمالیزه‌شده به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\hat{r}_N = \left| \hat{r} \right| \cdot [\text{diag}(\text{cov}(r))]^{-1/2} \quad (32)$$

در صورت عدم وجود داده‌های بد یا خطای پارامتر، \hat{r}_N یک متغیر تصادفی با میانگین صفر و واریانس واحد می‌باشد.

تقویت می‌شود، لذا در ماتریس ژاکوبین تغییراتی نسبت به حالت متداول ایجاد خواهد شد. ساختار ماتریس ژاکوبین در حالت ترکیبی در رابطه (۱۵) نشان داده شده است.

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} & \frac{\partial P_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_i}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V} \end{pmatrix} \quad (15)$$

مشتقات جزئی توان‌های اکتیو و راکتیو جاری شده بین شین‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی و اندازه ولتاژ شین‌ها نسبت به متغیرهای حالت در [۱۴] مطرح شده است. مشتقات جزئی اندازه‌گیری‌های اضافه شده به بردار اندازه‌گیری (قسمت حقیقی و موهومی فازور جریان خطوط و زاویه فاز ولتاژ شین‌ها) نسبت به متغیرهای حالت مطابق با روابط زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_i} = -V_i \left[(b_{ij} + b_{si}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{si}) \sin \delta_i \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_j} = V_j \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_i} = (g_{ij} + g_{si}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{si}) \sin \delta_i \quad (18)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_j} = -g_{ij} \cos \delta_j + b_{ij} \sin \delta_j \quad (19)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_i} = V_i \left[(g_{ij} + g_{si}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{si}) \sin \delta_i \right] \quad (20)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_j} = -V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right] \quad (21)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_i} = (b_{ij} + b_{si}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{si}) \sin \delta_i \quad (22)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_j} = -b_{ij} \cos \delta_j - g_{ij} \sin \delta_j \quad (23)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_i} = 1, \quad \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_j} = 0 \quad (24), (25)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial V_i} = 0, \quad \frac{\partial \delta_i}{\partial V_j} = 0 \quad (26), (27)$$

(۱۴) محاسبه مانده نرمالیزه شده مطابق زیر :

$$\hat{r}_N = |\hat{r}| \cdot [\text{diag}(\text{cov}(r))]^{-1/2} \quad (35)$$

(۱۵) ℓ طوری پیدا شود که r_ℓ^N ، بزرگترین مقدار در r_i^N برای $i = 1, 2, \dots, m$ باشد.

(۱۶) اندازه گیری ℓ به عنوان داده بد شناخته می شود.

(۱۷) حذف اندازه گیری ℓ ام از مجموعه اندازه گیری ها و بازگشت به مرحله ۳.

۴- نتایج شبیه سازی

در این بخش، الگوریتم ارائه شده برای شبکه IEEE ۱۴-Bus در متلب پیاده سازی شده است. شکل ۴ ساختار سیستم نامبرده به همراه محل قرار گرفتن دستگاه های اندازه گیری را نشان می دهد. الگوریتم WLS در دو حالت : ۱- تنها با دستگاه های اندازه گیری متداول و ۲- ترکیبی از دستگاه های اندازه گیری متداول و PMU اجرا شده و نتایج تخمین گر حالت با هم مقایسه می شوند و نشان داده خواهد شد که ورود PMU ها در تخمین گر حالت چه تاثیری بر نتایج آن خواهد داشت و در انتها کارایی آزمون مربعات کای و بزرگترین مانده نرمالیزه شده برای تشخیص و شناسایی داده های بد نشان داده می شود.

در این شبکه تست، شین ۱ به عنوان شین اسلک در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی توزیع نرمال خطا در اندازه گیر i ام، رابطه زیر استفاده می شود:

$$z_i^{\text{meas}} = z_i^{\text{true}} + \sigma_i \times r \quad (36)$$

که در آن z_i^{meas} مقادیر اندازه گیری شده، z_i^{true} مقادیر واقعی حاصل از برنامه پخش بار، σ_i انحراف معیار دستگاه های اندازه گیری و r متغیر تصادفی بین -۱ و +۱ می باشد. مطابق [۱۷]، انحراف معیار دستگاه های اندازه گیری متداول به این صورت است که برای اندازه ولتاژ ۰.۰۸ پریونیت، توان های جاری شده ۰.۰۰۸ پریونیت و توان های تزریقی ۰.۰۱ پریونیت در نظر گرفته شده است.

در سیستم های اندازه گیری فازوری اگر اندازه گیری در مختصات قطبی صورت گیرد به آن اندازه گیری مستقیم و اگر در مختصات دکارتی انجام شود به آن اندازه گیری غیر مستقیم می گویند. در این مقاله از اندازه گیری فازور ولتاژ در مختصات قطبی و اندازه گیری فازور جریان در مختصات دکارتی استفاده شده است. واریانس اندازه گیری ها معمولاً بر اساس واریانس اندازه و زاویه داده می شوند. با توجه به [۱۸]، انحراف معیار خطاهای ولتاژ اندازه گیری شده فازوری مقدار ۰.۰۰۲ پریونیت (برای اندازه

هنگامی که حضور داده های بد در مجموعه اندازه گیری ها به کمک آزمون مربعات کای تشخیص داده شود در آن صورت بزرگترین مانده نرمالیزه شده به داده بد تعلق دارد که قبل از تخمین حالت مجدد از مجموعه اندازه گیری ها حذف خواهند شد. این کار تا زمانی که تمام داده های بد حذف شوند، تکرار می شود. الگوریتم پیشنهادی برای تخمین حالت همراه با پردازش داده های بد در گام های زیر اجرا می شود:

(۱) شروع

(۲) خواندن مقادیر اندازه گیری شده.

(۳) حدسی از مقادیر اولیه، معمولاً برای اندازه ولتاژها مقدار ۱ پریونیت و برای زاویه فازها مقدار صفر درجه در نظر گرفته می شود.

(۴) فرآیند تکرار با تعیین شمارنده تکرار $k=0$ و تعریف k_{limit} با مقدار مطلوب آغاز می شود. بنابراین هنگامی که فرآیند همگرا نشود در k_{limit} متوقف می شود.

(۵) اگر $k > k_{\text{limit}}$ است فرآیند تکرار متوقف شود، در غیر این صورت به ۶ رود.

(۶) تابع اندازه گیری $h(x^k)$ محاسبه شود.

(۷) ماتریس ژاکوبین اندازه گیری $H(x^k)$ محاسبه شود.

(۱۰) ماتریس بهره $G = [H^T R^{-1} H]$ و معکوس آن G^{-1} محاسبه شود.

(۸) معادله زیر به منظور دسترسی به بردار تصحیح حالت Δx^k برای متغیرهای حالت محاسبه شود:

$$[G(x^k)] \Delta x^{k+1} = H^T(x^k) R^{-1} [z - h(x^k)] \quad (33)$$

(۹) اگر $\text{Max}|\Delta x^k| < \varepsilon$ باشد فرآیند همگرایی کامل است در غیر این صورت شمارنده تکرار k و بردار حالت به روزرسانی شوند $(x^{k+1} = x^k + \Delta x^k, k = k+1)$ و به مرحله ۵ بازگردد.

(۱۰) به منظور پردازش داده های بد، تابع هدف مطابق زیر محاسبه شود:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x))^2 / \sigma_i^2 \quad (34)$$

(۱۱) با احتمال p و درجه آزادی $(m-n)$ ، مقدار χ^2 محاسبه شود.

(۱۲) اگر رابطه $J(x) < \chi_{(m-n),p}^2$ درست باشد آنگاه اندازه گیری ها فاقد داده های بد می باشند و برنامه متوقف شود اما اگر رابطه فوق نادرست باشد، در آن صورت به حضور داده بد می توان مشکوک شد و به مرحله ۱۳ رود.

(۱۳) عناصر بردار مانده های اندازه گیری $r_i = z_i - h(x^k), i = 1, 2, \dots, m$ محاسبه شوند.

حالت تنها با دستگاه‌های اندازه‌گیری متداول، مقدار تابع هدف برابر ۱۷,۱۰۹ می‌باشد و بیشینه خطای رخ داده در تخمین اندازه ولتاژها ۰,۰۰۶۷ پریونیت، که مربوط به شین شماره ۵ است و بیشینه خطای رخ داده در تخمین زاویه ولتاژها ۰,۲۷۹۹ درجه، که در شین شماره ۱۴ رخ داده است. اما در تخمین حالت با ترکیب دستگاه‌های اندازه‌گیری متداول و PMU، مقدار تابع هدف برابر ۱۴,۰۶۵ شده است و بیشینه خطای رخ داده در تخمین اندازه ولتاژها ۰,۰۰۰۹۶ پریونیت، که مربوط به شین شماره ۱۳ است و بیشینه خطای رخ داده در تخمین زاویه ولتاژها ۰,۰۵۹۷ درجه، که در شین شماره ۱۴ رخ داده است.

برای ارزیابی کارایی تخمین گر حالت، به یک مورد مرجع نیاز است تا نتایج بدست آمده از تخمین حالت با آن مقایسه شود. از این رو همانطور که قبلاً بیان شده بود نتایج حاصل از پخش بار به عنوان مقادیر واقعی در نظر گرفته می‌شوند و مقادیر تخمین زده شده با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نمودار میله‌ای شکل‌های ۵ و ۶ اختلاف بین متغیرهای حالت تخمین زده شده توسط تخمین حالت متداول و ترکیبی با مقادیر واقعی را نشان می‌دهند.

فازور) و ۰,۰۰۱۷ رادیان (برای زاویه فازور) در نظر گرفته می‌شود. برای بدست آوردن انحراف معیار فازور جریان در مختصات دکارتی، باید از تبدیل انحراف معیار اندازه‌گیری مستقیم (مختصات قطبی) استفاده شود. بر اساس نظریه انتشار خطا، انحراف معیار $\sigma_{I_{ij,r}}, \sigma_{I_{ij,i}}$ به علت انتقال اندازه‌گیری‌ها را می‌توان توسط فرمولاسیون زیر محاسبه کرد:

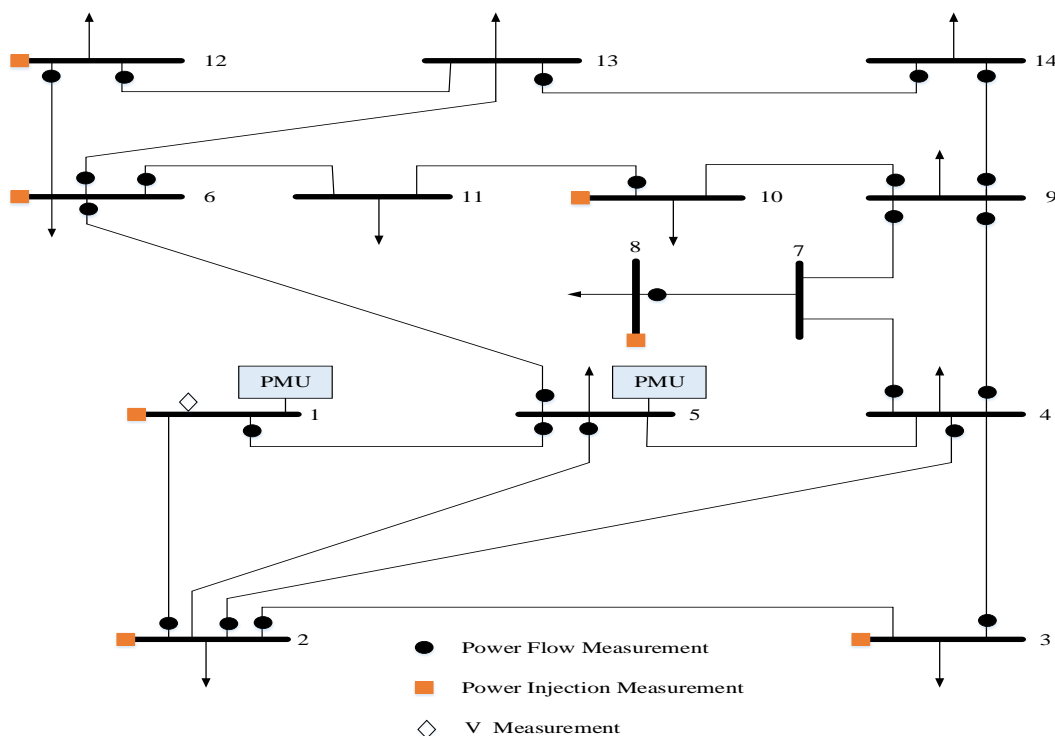
$$\sigma_{I_{ij,r}}^2 = \left(\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial I_{ij}} \right)^2 \sigma_{I_{ij}}^2 + \left(\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \theta_{ij}} \right)^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2 \quad (34)$$

$$= (\cos \theta_{ij})^2 \sigma_{I_{ij}}^2 + (I_{ij} \sin \theta_{ij})^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2$$

$$\sigma_{I_{ij,i}}^2 = \left(\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial I_{ij}} \right)^2 \sigma_{I_{ij}}^2 + \left(\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \theta_{ij}} \right)^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2 \quad (35)$$

$$= (\sin \theta_{ij})^2 \sigma_{I_{ij}}^2 + (I_{ij} \cos \theta_{ij})^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2$$

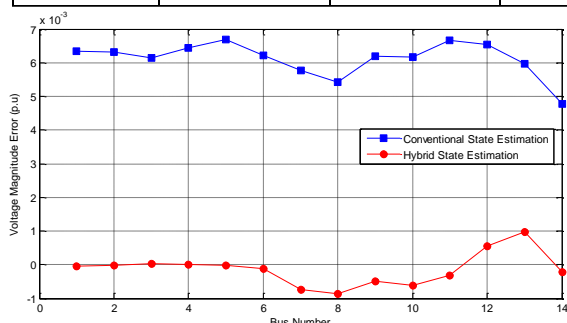
که در آن $\sigma_{I_{ij,r}}$ و $\sigma_{I_{ij,i}}$ به ترتیب واریانس‌های خطای $I_{ij,r}$ و $I_{ij,i}$ می‌باشند. با توجه به [۱۸]، $\sigma_{\theta_{ij}}$ برابر ۰,۰۰۱۷ رادیان و $\sigma_{I_{ij}}$ برابر ۰,۰۰۲ در نظر گرفته می‌شود، با جایگزینی مقادیر فوق، واریانس خطاهای اندازه‌گیری جریان و به طبع مقادیر اندازه‌گیری شده برای اهداف شبیه‌سازی محاسبه خواهند شد. جدول ۱ مقادیر واقعی متغیرهای حالت و مقدار تخمین زده شده در دو حالت متداول و ترکیبی را نشان می‌دهد. در تخمین



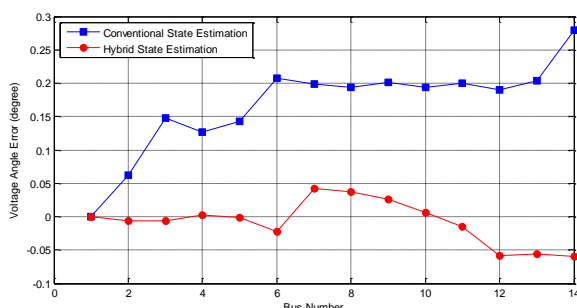
شکل ۴: شبکه تست IEEE ۱۴-Bus

جدول ۱: مقادیر واقعی و تخمین زده شده توسط تخمین حالت متداول و ترکیبی

متغیر حالت	واقعی	متداول	ترکیبی	متغیر حالت	واقعی	متداول	ترکیبی
V_1 (p.u)	۱,۰۶۰۰	۱,۰۵۳۷	۱,۰۶۰۰	δ_1 (°)	-	-	-
V_r (p.u)	۱,۰۴۵۰	۱,۰۳۸۷	۱,۰۴۵۰	δ_r (°)	-۴,۹۸۹۱	-۵,۰۵۱۷	-۴,۹۸۲۶
V_f (p.u)	۱,۰۱۰۰	۱,۰۰۳۸	۱,۰۱۰۰	δ_f (°)	-۱۲,۷۴۹۲	-۱۲,۸۹۶۹	-۱۲,۷۴۲۵
V_δ (p.u)	۱,۰۱۳۲	۱,۰۰۶۸	۱,۰۱۳۲	δ_δ (°)	-۱۰,۲۴۲۰	-۱۰,۳۶۸۶	-۱۰,۲۴۴۴
V_ϵ (p.u)	۱,۰۱۶۶	۱,۰۰۹۹	۱,۰۱۶۶	δ_ϵ (°)	-۸,۷۶۰۱	-۸,۹۰۳۲	-۸,۷۵۸۶
V_v (p.u)	۱,۰۷۰۰	۱,۰۶۳۸	۱,۰۷۰۰	δ_v (°)	-۱۴,۴۴۶۹	-۱۴,۶۵۴۶	-۱۴,۴۲۴۳
V_λ (p.u)	۱,۰۴۵۷	۱,۰۳۹۹	۱,۰۴۵۷	δ_λ (°)	-۱۳,۲۳۶۸	-۱۳,۴۳۵۶	-۱۳,۲۷۹۰
V_κ (p.u)	۱,۰۸۰۰	۱,۰۷۴۶	۱,۰۸۰۰	δ_κ (°)	-۱۳,۲۳۶۸	-۱۳,۴۳۰۵	-۱۳,۲۷۳۶
V_η (p.u)	۱,۰۳۰۵	۱,۰۲۴۳	۱,۰۳۰۵	δ_η (°)	-۱۴,۸۲۰۱	-۱۵,۰۲۱۲	-۱۴,۸۴۵۸
V_{ι} (p.u)	۱,۰۲۹۹	۱,۰۲۳۷	۱,۰۲۹۹	δ_{ι} (°)	-۱۵,۰۳۶۰	-۱۵,۲۳۰۱	-۱۵,۰۴۲۹
V_{11} (p.u)	۱,۰۴۶۱	۱,۰۳۹۵	۱,۰۴۶۱	δ_{11} (°)	-۱۴,۸۵۸۱	-۱۵,۰۵۷۸	-۱۴,۸۴۳۶
V_{1r} (p.u)	۱,۰۵۳۳	۱,۰۴۶۷	۱,۰۵۳۳	δ_{1r} (°)	-۱۵,۲۹۷۳	-۱۵,۴۸۷۷	-۱۵,۲۳۸۸
V_{1f} (p.u)	۱,۰۴۶۶	۱,۰۴۰۷	۱,۰۴۶۶	δ_{1f} (°)	-۱۵,۳۳۱۳	-۱۵,۵۳۴۹	-۱۵,۲۷۵۹
$V_{1\delta}$ (p.u)	۱,۰۱۹۳	۱,۰۱۴۵	۱,۰۱۹۳	$\delta_{1\delta}$ (°)	-۱۶,۰۷۱۷	-۱۶,۳۵۱۷	-۱۶,۰۱۲۰



شکل ۷: خطای اندازه ولتاژ برای تخمین حالت متداول و ترکیبی

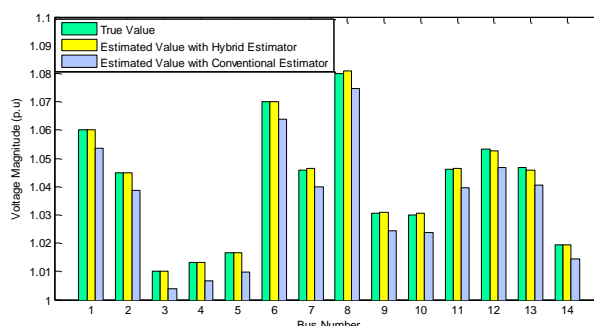


شکل ۸: خطای زاویه ولتاژ برای تخمین حالت متداول و ترکیبی

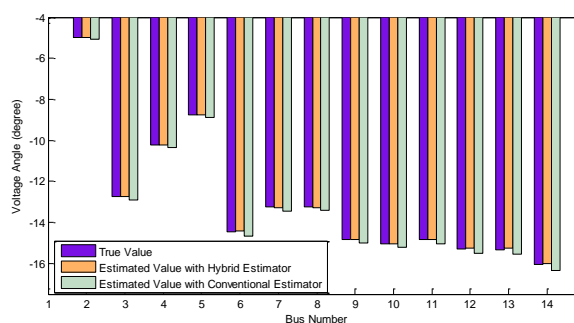
همانطور که مشاهده می‌شود، هنگامی که تنها از دستگاه‌های اندازه‌گیری متداول برای تخمین حالت استفاده شود نتایج از دقت بالایی برخوردار نیست و خطای قابل ملاحظه‌ای در مقادیر تخمینی مشاهده می‌شود. اما با ترکیب PMU ها با دستگاه‌های اندازه‌گیری متداول، دقت و کارایی تخمین حالت بهبود می‌یابد و خطای متغیرهای حالت تخمین زده‌شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

برای آزمایش کارایی تشخیص و شناسایی داده‌های بد از تخمین حالت ترکیبی استفاده می‌شود. جدول ۲ داده‌های بد را

همانطور که از شکل‌های ۵ و ۶ پیداست، مقادیر تخمین زده شده توسط تخمین حالت ترکیبی از تخمین حالت متداول دقیق‌تر می‌باشند و اختلاف ناچیزی با مقادیر واقعی دارند. برای بررسی دقیق‌تر عملکرد دو تخمین‌گر حالت، شکل‌های ۷ و ۸ خطای زاویه و اندازه ولتاژهای تخمین‌زده شده را نشان می‌دهند.



شکل ۹: مقایسه بین مقادیر واقعی و تخمین زده‌شده از اندازه‌های ولتاژ توسط تخمین حالت متداول و ترکیبی



شکل ۱۰: مقایسه بین مقادیر واقعی و تخمین زده‌شده از زوایای ولتاژ توسط تخمین حالت متداول و ترکیبی

برای اندازه‌گیری‌های ادغام‌شده، در هنگام استفاده از اندازه‌گیری‌های جریان در مختصات دکارتی نشان می‌دهد.

جدول ۲: داده‌های بد برای آزمایش کارایی شناسایی داده‌های بد

نوع تخمین حالت	داده‌های بد	نویز اضافه شده
تخمین حالت ترکیبی	$I_{5-1,2}$	$9/96 \sigma_{15-1,2}$
	P_{4-9}	$8 \sigma_{P4-9}$

۵- نتیجه گیری

در این مقاله فرمولاسیون حداقل مربعات وزندار برای مسئله تخمین حالت، شامل اندازه‌گیری‌های متداول و همچنین اندازه‌گیری‌های فازور جریان و ولتاژ پیشنهاد شده است. مدل دقیق تخمین حالت ترکیبی و چگونگی محاسبه کوواریانس خطای اندازه‌گیری‌ها توصیف شده است. برای نشان دادن کارایی الگوریتم تخمین گر حالت، سیستم IEEE ۱۴-Bus مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است. همانطور که از نتایج شبیه سازی مشاهده شد، با قرار دادن دو PMU در شین‌های ۱ و ۵ و ترکیب آنها با دستگاه‌های اندازه‌گیری متداول، دقت و کارایی تخمین حالت به‌طور چشمگیری بهبود یافته است. در نهایت نشان داده شده است که با آزمون مربعات کای و آزمون بزرگترین مانده نرمالیزه شده داده‌های بد فرضی در جدول ۲ در طی ۳ تکرار با موفقیت شناسایی و حذف شده‌اند.

مراجع

- [۱] Thorp JS, Phadke AG, Karimi KJ, et al. "Real time voltage-phasor measurements for static state estimation". IEEE Trans Power Apparatus Syst ۱۹۸۵;۱۰۴(۱۱):۳۰۹۸-۱۰۶.
- [۲] Phadke AG, Thorp JS, Karimi KJ. "State estimation with phasor measurements". IEEE Trans Power Syst ۱۹۸۶;۱(۱):۲۳۳-۴۱.
- [۳] Phadke AG, Thorp JS. "Synchronized phasor measurements and their applications". New York: Springer Science and Business Media; ۲۰۰۸.
- [۴] Qing Zhang; Chakhchoukh, Y.; Vittal, V.; Heydt, G.T.; Logic, N.; Sturgill, S. "Impact Of PMU Measurement Buffer Length on State Estimation and its Optimization" IEEE Trans, Power Systems, Volume: ۲۸, Issue: ۲, page(s): ۱۶۵۷ - ۱۶۶۵, Year: ۲۰۱۳.

جدول ۴: تحلیل داده‌های بد برای تخمین حالت ترکیبی

اندازه‌گیری‌ها	نرمالیزه‌شده در اجرای اول	اندازه‌گیری‌ها	نرمالیزه‌شده در اجرای دوم	اندازه‌گیری‌ها	نرمالیزه‌شده در اجرای سوم
$I_{5-1,2}$	۸/۴۹۸۰	P_{4-9}	-۷/۷۵۹۲	Q_{9-10}	۱/۳۳۲۸
P_{4-9}	-۷/۷۶۵۳	P_{9-7}	-۳/۰۹۸۷	P_{12}	-۱/۱۴۶۸
$I_{5-2,2}$	-۳/۸۵۳۲	P_{4-7}	۳/۰۷۴۴	Q_{10}	۱/۱۳۱۲
$I_{1-2,2}$	۳/۴۵۲۳	Q_{9-10}	۱/۶۸۲۴	P_{4-2}	۱/۰۷۶۲
P_{9-7}	-۳/۰۷۹۲	Q_{6-11}	-۱/۲۶۰۹	$I_{5-2,i}$	-۱/۰۳۴۲
$J(\hat{x}) = ۱۴۷/۲۴$		$J(\hat{x}) = ۷۴/۰۶۰$		$J(\hat{x}) = ۱۳/۸۴۲۵$	

- [٥] Hongbo Sun ;Zhenhua Wang ;Nikovski, D. “Two-Level State Estimation Method for Power Systems with SCADA and PMU Measurements” Innovative Smart Grid Technology – Asia (ISGT Asia), ٢٠١٢ IEEE, page(s): ١-٥, Year: ٢٠١٢.
- [٦] R.F. Nuqui, A.G. Phadke, “Hybrid linear state estimation utilizing synchronized phasor measurements”, in: Proceedings of the IEEE Power Tech, Lausanne, Switzerland, July ١-٥, ٢٠٠٧, pp. ١٦٦٥-١٦٦٩.
- [٧] M. Zhou, V.A. Centeno, J.S. Thorp, A.G. Phadke, “An alternative for including phasor measurements in state estimators”, IEEE Trans. Power Syst. ٢١ (٤) (٢٠٠٦) ١٩٣٠-١٩٣٧.
- [٨] Chakrabarti S, Kyriakides E, Ledwich G, Ghosh A. “A comparative study of the methods of inclusion of PMU current phasor measurements in a hybrid state estimator”. In: IEEE Power Eng Soc General Meeting, ٢٠١٠, p. ١-٧.
- [٩] Chakrabarti S, Kyriakides E, Ledwich G, Ghosh A. “Inclusion of PMU current phasor measurements in a power system state estimator”. IET Gener Transm Distrib ٢٠١٠;٤(١٠):١١٠٤-١١٠٥.
- [١٠] Valverde G, Chakrabarti S, Kyriakides E, Terzija V. “A constrained formulation for hybrid state estimation”. IEEE Trans Power Syst ٢٠١١;٢٦(٣):١١٠٢-٩.
- [١١] L. Zhao, A. Abur, “Multiarea State Estimation using Synchronized Phasor Measurements”, IEEE Trans. Power Syst. ٢٠ (٧) (٢٠٠٥) ٦١١-٦١٧.
- [١٢] Jun Zhu; Abur,A “Bad Data Identification When using Phasor Measurements” Power Tech, ٢٠٠٧ IEEE Lausanne. Pages: ١٦٧٦-١٦٨١. ٢٠٠٧.
- [١٣] George N. Korres, Nikolaos M. Manousakis. “A State Estimator Including Conventional and Synchronized Phasor Measurements” Original Research Article Computer& Electrical Engineering, Volume ٣٨, Issue ٣, March ٢٠١٢, Pages ٢٩٤-٣٠٥.
- [١٤] A. Abur and A. Gómez Expósito, “Power system state estimation: theory and implementation”, New York, NY: Marcel Dekker, ٢٠٠٤.
- [١٥] Mukhtar Ahmad. “Power System State Estimation” Artech House ,٢٠١٣.
- [١٦] T.S. Bi, X.H. Qin, Q.X. Yang, A novel hybrid state estimator for including synchronized phasor measurements, Electr. Power Syst. Res. ٧٨ (٢٠٠٨) ١٣٤٣-١٣٥٢.
- [١٧] Vide, P .C; Barbosa, F .M; Carvalho, J.B. “Performance Metrics for Evaluation of a Mixed Measurement Based State Estimator” IEEE Conference Publications, pages: ٢٧٤-٢٧٩, ٢٠١٢.
- [١٨] IEEE Std C٣٧,١١٨-٢٠٠٥-IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE Power Engineering Society, ٢٠٠٥.