

مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیر فازوری برای مکان‌یابی خطا در شبکه قدرت با در نظر گرفتن باس‌های تزریق صفر و خروج تکی خطوط

سهیل مرادی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ رضا محمدی چبنلو^۲، استادیار؛ نوید تقی‌زادگان کلانتری^۳، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران - soheylmoradi@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی و مهندسی عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - reza.mohamadi@gmail.com

۳- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران - ntaghizadegan@yahoo.com

چکیده: با توجه به رشد گسترده فناوری اطلاعات و سامانه‌های مخابراتی و ابزارهای دقیق الکترونیکی، استفاده از واحدهای اندازه‌گیر فازور (PMU) برای رؤیت‌پذیری و حفاظت گسترده شبکه‌های قدرت مطرح گردیده است. اما از طرفی احداث کانال‌های ارتباطی و نصب تجهیزات واحدهای PMU بسیار هزینه‌بر بوده و نیاز به بهینه‌سازی دارد. در این مقاله ابتدا قیود مسئله مکان‌یابی بهینه واحد PMU به منظور حفظ رؤیت‌پذیری حالت عیب شبکه قدرت با در نظر گرفتن باس تزریق صفر مطرح شده است و در ادامه فرمول‌بندی ریاضی آن ارائه شده است. همچنین به منظور لحاظ کردن رخدادهای واقعی شبکه، خروج تکی خطوط نیز در نظر گرفته شده است. در نهایت روش پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۹ و ۱۴ و ۳۰ با سه IEEE اجرا و نتایج بهبودیافته برای کاهش تعداد PMU ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: رؤیت‌پذیری حالت خطا، مکان‌یابی خطا، مکان‌یابی بهینه واحد اندازه‌گیر فازور، باس تزریق صفر.

Optimal PMU Placement for Fault Location Detection in Power Systems Considering Zero-injection Bus and Line Outages

S. Moradi¹, MSc Student; R. Mohammadi², Assistant Professor; N. Taghizadegan Kalantari³, Assistant Professor

1- Electrical Engineering Department, Shahid Madani University of Azarbaijan, Tabriz, Iran, Email: soheylmoradi@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Abbaspour College of Technology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: reza.mohamadi@gmail.com

3- Electrical Engineering Department, Shahid Madani University of Azarbaijan, Tabriz, Iran, Email: ntaghizadegan@yahoo.com

Abstract: Regarding the vast extension of information technology, communication systems and electronic instrumentation, the employment of phasor measurement units (PMUs) has been proposed for power system observability and wide-area protection. Nevertheless, the construction of communication channels and installation of PMU equipment are highly expensive and require optimizations. In this paper, first the constraints are proposed for the optimal PMU placement problem considering fault state observability of power system in presence of zero bus injection, and afterwards the mathematical formulation is presented. For more realistic modeling of power network, line outages have been considered. Finally, the proposed method is implemented on standard IEEE 9, 14, and 30 bus networks, and the enhanced results are represented.

Keywords: Faulty state observability, fault location detection, optimal PMU placement, zero-injection bus.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۶، ۱۳۹۴/۰۱/۱۷، ۱۳۹۴/۰۲/۱۳ و ۱۳۹۴/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۰۷

نام نویسنده مسئول: رضا محمدی چبنلو

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - تهرانپارس - بلوار وفادار شرقی - دانشگاه شهید بهشتی - پردیس فنی و مهندسی عباسپور - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل قابلیت‌هایی که واحدهای اندازه‌گیری فازور در اختیار می‌گذارند، گرایش روزافزونی به استفاده از این واحدها ایجاد شده است. اندازه‌گیری هم‌زمان و لحظه‌ای فازور ولتاژ و جریان و ارائه برچسب زمانی به هریک از نمونه‌ها و اندازه‌گیری چند کانال ورودی از جمله قابلیت‌هایی است که در کنار خطوط انتقال داده پرسرعت، حفاظت گسترده شبکه را به‌عنوان حفاظت اصلی و پشتیبان در شبکه قدرت مطرح می‌کند. هزینه بالای واحدهای PMU و خطوط ارتباطی آن‌ها از جمله عوامل محدودکننده استفاده از این واحدها است. لذا پیدا کردن کم‌ترین تعداد PMU‌های موردنیاز برای نصب در شبکه دارای اهمیت بوده و خود این مسئله بستگی مستقیم به روش به‌کارگرفته‌شده برای حل مسئله رویت‌پذیری شبکه دارد. مسئله رویت‌پذیری را می‌توان در دو زمینه اصلی تعریف نمود، رویت‌پذیری حالت عادی و رویت‌پذیری حالت عیب. مسئله رویت‌پذیری موردبحث در این مقاله، رویت‌پذیری حالت خطا است. نوع روش مکان‌یابی خطای استفاده‌شده برای مسئله رویت‌پذیری، تعیین‌کننده نوع مکان‌یابی واحدهای PMU است.

[۱ و ۲] معرفی‌کننده روشی می‌باشند که در آن از نتایج به‌دست‌آمده از [۳] برای مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور به‌منظور حفظ رویت‌پذیری حالت عیب شبکه استفاده شده است. وابستگی این روش به ماتریس امپدانس شبکه، تغییرات امپدانس‌های بارها و ژنراتورها، عدم نظر گرفتن خطوط ترانسپوزن‌نشده و موازی، معایب مهم برای این روش محسوب می‌شوند. علاوه بر آن، حجم محاسبات اتصال کوتاه برای آزمون رویت‌پذیری این روش بسیار بالا است. برای مثال در یک شبکه بایستی انواع خطاهای ممکن (تک‌فاز، دو فاز و ...) برای حداقل ۱۰ نقطه در هر خط انتقال و برای تمامی خطوط انتقال شبیه‌سازی گردد و نتایج افت ولتاژ تمامی باس‌های شبکه ذخیره گردد. این در حالی است که شرایط شبکه می‌تواند تغییر داشته باشد و نتایج برای زمان‌های دیگر معتبر نباشد. الگوریتم ارائه‌شده در این مرجع نسبت به خروج تکی خطوط انتقال بسیار حساس است [۴]. در [۵] فرض شده است که واحد PMU در تمامی باس‌ها موجود بوده و با استفاده از ولتاژ و جریان باس‌ها الگوریتم حفاظتی ارائه می‌گردد. فرض موجود بودن واحد PMU در تمامی باس‌ها یک فرض نادرست است چراکه عملاً این کار به دلیل هزینه بالای واحد و لینک‌های ارتباطی آن انجام نمی‌شود. در [۶] یک روش مکان‌یابی واحد اندازه‌گیری فازور مبتنی بر اطلاعات ولتاژ و جریان شبکه معرفی می‌گردد. روش مکان‌یابی به‌کارگرفته‌شده نیازمند فازورهای ولتاژ دو سمت خط معیوب و حداقل یکی از جریان‌های طرفین خط است. در این روش مکان‌یابی خطا، خازن‌های جزئی خطوط انتقال لحاظ نشده است. در این مقاله چنین استدلال می‌گردد که برای تشخیص مکان خطا در تمامی خطوط، PMU گذاری بایستی به نحوی باشد که بین دو PMU مجاور یک باس فاصله وجود داشته باشد و قوانین زیر تعیین می‌گردد:

۱. ابتدا PMU روی باس‌هایی قرار داده شود که بیش‌ترین تعداد خطوط ورودی را دارا می‌باشند.

۲. واحدهای PMU با یک باس فاصله قرار گیرند.

۳. واحدهای PMU اضافی بعد از انجام دو مرحله فوق حذف گردند.

در این مقاله هیچ نوع فرمول‌بندی و یا روش ریاضی برای مسئله مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور ارائه نشده است. در [۷] مسئله مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور به‌صورت ریاضی فرمول‌بندی شده است. قیود مسئله بهینه‌سازی مطرح شده و حالت ریاضی قیود ارائه می‌گردد. در این مقاله قیود مسئله بهینه‌سازی خطی می‌باشند. با این‌وجود از الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن جواب مسئله استفاده می‌شود. در این روش اثر باس‌های تزریق‌صفر در مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور لحاظ نشده است.

در [۸] مکان‌یابی واحدهای PMU با در نظر گرفتن اثر باس‌های تزریق‌صفر انجام شده است. در این مقاله لزوم تخصیص یک واحد PMU بر روی باس‌های ترمینال تعریف شده است. اشکال این فرض عدم توجه به وجود واحدهای ژنراتوری بر روی باس‌های ترمینال است. در صورتی که باس‌های ترمینال فاقد منبع تولید توان باشند نیازی نیست تا بر روی این باس‌ها واحد اندازه‌گیری فازور قرار داده شود. علاوه بر آن اتصال‌های بین باس‌های متصل به باس تزریق‌صفر برای اولین بار در این مرجع به‌عنوان عامل کاهش‌دهنده تعداد واحدهای PMU موردنیاز برای رویت‌پذیری مطرح شده است. با این‌حال، اتصال‌های درجه دوم (اتصال میان باس‌های متصل به باس‌های تزریق‌صفر از طریق یک باس بار دیگر) لحاظ نشده و فرمول‌بندی ریاضی برای لحاظ اثر باس‌های تزریق‌صفر ارائه نشده است. مرجع [۹] مسئله رویت‌پذیری شبکه را با استفاده از استفاده هم‌زمان واحد اندازه‌گیری فازور و واحدهای اندازه‌گیری شارش توان مطرح کرده است. روش ارائه‌شده در [۱۰] مبتنی بر روش بهینه‌سازی تکامل دیفرانسیلی است. هم قیود مسئله مکان‌یابی و هم تابع هدف به‌صورت غیرخطی تعریف شده‌اند. در روش پیشنهادی مسئله مکان‌یابی بهینه (با در نظر گرفتن اثر باس‌های تزریق‌صفر) به‌صورت کاملاً خطی فرمول‌بندی شده است و می‌توان آن را با استفاده از روش‌های ریاضی خطی از جمله روش برنامه‌ریزی دودویی خطی حل نمود. این امر باعث افزایش سرعت محاسبات به‌ویژه در شبکه‌های بزرگ می‌گردد.

در این مقاله یک فرمول‌بندی ریاضی برای مسئله مکان‌یابی بهینه واحد PMU برای رویت‌پذیری خطا با در نظر گرفتن باس‌های تزریق‌صفر ارائه شده است. همچنین در این مقاله مسئله مکان‌یابی بهینه واحد PMU برای رویت‌پذیری خطا با در نظر گرفتن خروج تکی خطوط مورد مطالعه قرارگرفته است که در هیچ‌یک از کارهای قبلی بررسی نشده است. در بخش دوم از این پژوهش مسئله رویت‌پذیری حالت خطا بیان شده است. این مسئله بدون لحاظ کردن اثر باس‌های تزریق‌صفر در بخش سوم بررسی شده است. روش فرمول‌بندی پیشنهادی برای در نظر گرفتن اثر باس‌های تزریق‌صفر و خروج تکی خطوط به ترتیب در بخش‌های چهارم و پنجم ارائه شده است.

$$I_F = I_{iF} + I_{kF} \quad (4)$$

$$I_F = \frac{[U_j \cosh(\gamma l_{kj}) - I_{jk} Z_C \sinh(\gamma l_{kj})]}{Z_C \sinh(\gamma l_{ik} (1-x_{ik}))} - \frac{[U_i \cosh(\gamma l_{ik}) - I_{ik} Z_C \sinh(\gamma l_{ik})]}{Z_C \sinh(\gamma l_{ik} (1-x_{ik}))} \quad (5)$$

با توجه به فرض مقاومتی بودن امپدانس عیب رابطه (۶) به صورت زیر نوشته می شود:

$$Arg(U_F) = Arg(I_F) \quad (6)$$

می توان روابط (۱) تا (۶) را بر روی توالی های فاز مثبت، منفی و صفر اعمال نمود. باید دقت نمود که برای هر توالی فاز بایستی ضریب انتشار و امپدانس مشخصه همان توالی در روابط درج شود. بنابراین فرض می کنیم:

$$D_{kj1} = \gamma l_{kj}, D_{kj0} = \gamma_0 l_{kj} \quad (7)$$

$$D_{ki1} = \gamma l_{kj}, D_{ki0} = \gamma_0 l_{ik}$$

در روابط بالا زیر نویس های ۱، ۲ و ۰ به ترتیب مربوط به توالی های مثبت، منفی و صفر می باشند. با توجه به تک فاز بودن خطا، داریم:

$$I_{F1} = I_{F2} = I_{F0} = \frac{1}{3} I_F \quad (8)$$

بنابراین طبق رابطه (۶) می توان نوشت:

$$\frac{\text{Im}(U_F)}{\text{Re}(U_F)} = \frac{\text{Im}(I_F)}{\text{Re}(I_F)} \quad (9)$$

که در آن:

$$U_F = (U_{i1} + U_{i2}) \cosh(D_{ik1} x_{ik}) - (I_{k1} + I_{ki2}) Z_{C1} \sinh(D_{ik1} x_{ik}) + U_{i0} \cosh(D_{ik0} x_{ik}) - I_{ki0} Z_{C0} \sinh(D_{ik0} x_{ik}) \quad (10)$$

$$I_{F1} = \frac{[U_j 1 \cosh(D_{kj1}) - I_{jk} 1 Z_{C1} \sinh(D_{kj1})]}{Z_C \sinh(\gamma l_{ik} (1-x_{ik}))} - \frac{[U_i 1 \cosh(D_{ik1}) - I_{ik} 1 Z_{C1} \sinh(D_{ik1})]}{Z_{C1} \sinh(D_{ik1} (1-x_{ik}))} \quad (11)$$

با حذف I_{jk} از روابط و ساده سازی آن ها می توانیم مقدار X_{ik} را از روی مقادیر U_i و U_j و I_{ik} به دست آوریم. در صورت بروز خطا این عدد مقداری مابین صفر و یک خواهد بود. طبق رابطه (۱۲):

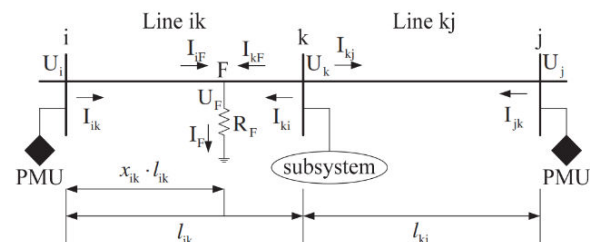
$$X_{ik} = \frac{1}{D_{ik1}} \arccos h \left(\sqrt{\frac{-f + \sqrt{f^2 - 4eg}}{2e}} \right) \quad (12)$$

(مقادیر D_{ik} , f , e , g برای خطای تک فاز در پیوست درج شده است). در شبکه واقعی سطوح ولتاژ مختلفی وجود دارد. بایستی توجه داشت در حین انجام محاسبات برای هر خطی که در مجاورت ترانسفورماتور باشد، ولتاژها، جریان ها و امپدانس های مورد نیاز با توجه به نسبت تبدیل ترانسفورماتور، در طرف مورد مطالعه معادل سازی شوند. محاسبات مربوط به انواع عیب های دیگر در [۱۱] ارائه شده است.

در صورتی که فرض کنیم خطا بر روی خط K_i یا خط K_j رخ داده باشد، به ترتیب دو مکان خطای X_{kj} و X_{ki} از رابطه (۱۲) به دست می آید. با توجه به اینکه تنها یکی از اعداد به دست آمده جواب صحیح است، یک فرایند بررسی عیب انجام می شود که وظیفه انتخاب جواب صحیح را بر عهده دارد. نتایج به دست آمده از X_{kj} و X_{ki} را می توان به پنج حالت بیان شده در رابطه (۱۳) طبقه بندی نمود.

۲- بیان مسئله رؤیت پذیری حالت خطا

واحد اندازه گیری فازور واحدی است که بر روی باس های شبکه قدرت نصب می شود و این قابلیت را دارد که ولتاژ باس های نصب شده بر روی آن و جریان های تمامی خطوط متصل شونده به آن باس را اندازه گیری نماید. در صورتی که ولتاژ یک باس مستقیماً از روی واحد PMU نصب شده روی باس اندازه گیری شود، اندازه گیری مستقیم و در صورتی که ولتاژ یک باس از طریق جریان باس مجاور، ولتاژ باس مجاور و اطلاعات امپدانس خط اندازه گیری شود، آن اندازه گیری به صورت شبه اندازه گیری تعریف می شود. مهم ترین مسئله در تعریف رؤیت پذیری حالت عیب به این معنی است که بتوانیم خطاهای رخ داده در تمامی نقاط شبکه را تشخیص داده و مکان یابی نماییم. به بیان دیگر باید بتوانیم مکان دقیق عیب در طول هر یک از خطوط انتقال موجود در شبکه را تشخیص دهیم. تئوری ارائه شده در [۱۱] چنین بیان می کند که برای رؤیت پذیر بودن شبکه (عیب)، شرط لازم و کافی این است که جریان حداقل یک طرف خطوط انتقال و ولتاژ دو سر آن ها معلوم باشد. هر الگوی ساختاری شبکه قدرت را می توان به عنوان حالتی از شبکه شکل ۱ در نظر گرفت. برای اینکه شبکه شکل ۱ رؤیت پذیر خطا باشد، بایستی بتوانیم با استفاده از واحدهای اندازه گیری فازور مستقر در باس های i و j محل عیب را بر روی خط l_{ik} تشخیص بدهیم.



شکل ۱: حالت کلی شبکه قدرت

برای مثال خطای تک فاز به زمین را در نظر می گیریم. می توان ولتاژ باس k را به صورت ۱ به دست آورد:

$$U_k = U_j \cosh(\gamma l_{kj}) - I_{jk} Z_C \sinh(\gamma l_{kj}) \quad (1)$$

که در آن Z_c امپدانس مشخصه و γ ضریب انتشار است. ولتاژ و جریان محاسبه محل عیب محاسبه شده از سمت باس i به صورت رابطه (۲) به دست می آید.

$$U_F = U_i \cosh(\gamma l_{ik} x_{ik}) - I_{ik} Z_C \sinh(\gamma l_{ik} x_{ik}) \quad (2)$$

$$I_{iF} = -\frac{U_i}{Z_C} \sinh(\gamma l_{ik} x_{ik}) + I_{ik} \cosh(\gamma l_{ik} x_{ik})$$

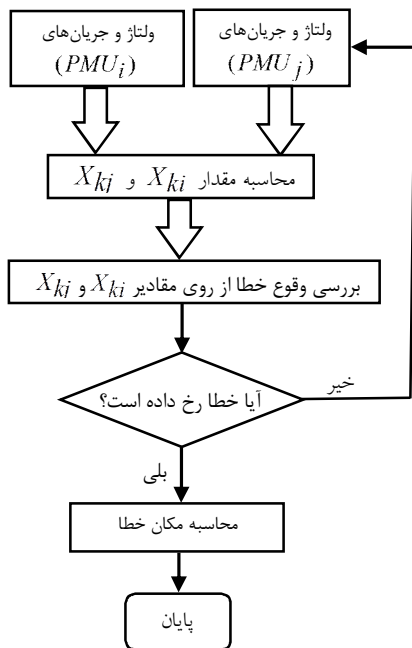
در رابطه فوق X_{ik} نشان دهنده محل خطا بر حسب درصدی از طول خط l_{ik} است. ولتاژ و جریان محل خطا محاسبه شده از سمت باس k به صورت رابطه (۳) است.

$$U_F = U_k \cosh(\gamma l_{ik} (1-x_{ik})) - I_{ki} Z_C \sinh(\gamma l_{ik} (1-x_{ik})) \quad (3)$$

$$I_{kF} = -\frac{U_k}{Z_C} \sinh(\gamma l_{ik} (1-x_{ik})) + I_{ki} \cosh(\gamma l_{ik} (1-x_{ik}))$$

بنابراین جریان عیب را به صورت روابط (۴) و (۵) خواهیم داشت:

روی باس i و یک برای نشان دادن وجود واحد PMU بر روی باس i در نظر گرفته می شود.



شکل ۲: فرایند تشخیص وقوع خطا

$$\min f(X) = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (15)$$

قانون معلوم بودن ولتاژ و حداقل یک جریان، شرط بهینه سازی این مسئله است. برای اینکه مطمئن شویم ولتاژ دو سر خط انتقال L_{ij} معلوم است بایستی یکی از شروط زیر برقرار باشد.

الف- روی باس های i و j واحد PMU نصب شود (اندازه گیری مستقیم).

ب- بتوان ولتاژ باس های i و j را به وسیله ولتاژ باس مجاور (k) به دست آورد (اندازه گیری غیرمستقیم).

بنابراین شرط معلوم بودن ولتاژ باس i به صورت رابطه (۱۶) تعریف می شود:

$$f_i = \sum_{j=1}^N A_{i,j} \cdot X_j \geq 1 \quad (16)$$

که در آن، A ماتریس تلاقی در شبکه است و به صورت رابطه (۱۷) تعریف می گردد:

$$A_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{در صورتی که باس های } i \text{ و } j \text{ به هم متصل نباشند} \\ 1 & \text{در صورتی که باس های } i \text{ و } j \text{ به هم متصل باشند} \end{cases} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) تساوی $i=j$ مربوط به شرط ۱ و نامساوی $i \neq j$ مربوط به شرط ۲ از شروط معلوم بودن ولتاژ است. برای اینکه مطمئن شویم حداقل یکی از جریان های دو طرف خط L_{ij} معلوم است، بایستی شرط رابطه (۱۸) برقرار باشد.

- (1) $X_{ik} \in (0,1), X_{kj} \notin (0,1)$
 - (2) $X_{ik} \notin (0,1), X_{kj} \in (0,1)$
 - (3) $X_{ik} \in (0,1), X_{kj} \in (0,1)$
 - (4) $X_{ik} \notin (0,1), X_{kj} \notin (0,1)$
 - (5) $X_{ik} = 1, X_{kj} = 0$
- (۱۳)

که به ترتیب، نشان دهنده مکان عیب بر روی خطوط K_i و K_j است. مقادیر درست X_{ki} و X_{kj} بایستی اعدادی مابین صفر و یک باشد. بنابراین در صورتی که حالت دوم، از حالات بیان شده روی دهد، مکان عیب همان X_{ki} یا X_{kj} است. در صورتی که جواب های خروجی نشان دهنده حالت سوم باشند یا خطای محاسباتی رخ داده است و یا عیب خارجی اتفاق افتاده است. در صورتی که حالت چهارم اتفاق بیفتد، مکان محاسبه شده خارج از بازه صفر و یک خواهد بود. این بدین معنی است که عیب خارجی رخ داده است. در صورتی که حالت پنجم حاصل شود، به این مفهوم است که خطا بر روی باس K رخ داده است. با توجه به اینکه اهمیت تشخیص خطا بر روی باس بیش تر است، می توانیم معیار رابطه (۱۴) را برای دقت بیشتر تعیین کنیم.

$$|X_{ik} - 1| < \varepsilon \cap |X_{kj} - 1| < \varepsilon \quad (14)$$

که در آن، ε عدد بسیار کوچکی است که می توان مقدار مناسب برای آن را از شبیه سازی به دست آورد. می توان فلوچارت روش مکان یابی خطا را برای یک عیب به صورت اشاره شده در ادامه بیان نمود. فلوچارت شکل ۲ برای هر یک از خطوط شبکه در هر لحظه از زمان محاسبه می شود. طبق روش توضیح داده شده، برای مکان یابی خطا در یک خط کافی است دو ولتاژ (اندازه گیری شده مستقیم U_i و غیرمستقیم U_j) و یک جریان (I_{ik}) معلوم باشند.

می توان از این نتیجه به عنوان زیربنای حل مسئله مکان یابی واحد اندازه گیری فازور در شبکه قدرت استفاده کرد. در صورتی که مکان تمامی خطاهای رخ دهنده در شبکه تشخیص داده شود، شبکه قدرت رؤیت پذیر خواهد بود. بنابراین، می توان مسئله رؤیت پذیری حالت خطا را به صورت جایابی بهینه واحدهای اندازه گیری فازور بازتعریف نمود، به گونه ای که قانون معلوم بودن دو ولتاژ و یک جریان برای تمامی خطاها رعایت شود.

۳- مکان یابی PMU بدون در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر در صورتی که متغیر X_i را به عنوان وجود یا عدم وجود واحد PMU بر روی باس i تعریف کنیم، می توانیم به تابعی دست یابیم که حاصل جمع متغیرهای X_i مربوط به تمام باس های شبکه باشد. به بیان دیگر، هدف از مسئله مکان یابی واحدهای PMU، به حداقل رساندن مقدار این تابع هدف است (رابطه ۱۵). متغیر X_i تنها می تواند یکی از دو مقدار صفر و یک را قبول کند. مقدار صفر برای عدم قرارگیری واحد PMU بر

for $i \notin \text{zero injection bus}$:

$$f_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \cdot X_j \geq 1 \quad (23)$$

۳- برای خطوط متصل به باس‌های غیر تزریق صفر، بایستی رؤیت‌پذیری جریان را داشته باشیم (حداقل یک جریان معلوم)؛ یعنی مطابق رابطه (۲۴) داریم:

for $L_{i,j}$

$i, j \notin \text{zero injection bus} \quad (24)$

$$\text{Line}(i, j): X_i + X_j \geq 1$$

۴- در محل باس‌های تزریق صفر برای خطوط متصل به باس تزریق صفر بایستی تمامی جریان‌های ورودی معلوم باشد. به عبارت دیگر قانون کیرشهف برقرار باشد. در صورتی که جریان‌های تزریق شونده به باس تزریق صفر معلوم باشند، ولتاژ باس تزریق صفر معلوم خواهد بود. چراکه این جریان‌ها به صورت مستقیم اندازه‌گیری شده‌اند و می‌توان با استفاده از اندازه‌گیری غیرمستقیم، ولتاژ باس صفر را نیز معلوم کرد. بنابراین خواهیم داشت:

for $i \in \text{zero injection}$

$$f_i = X_i + \sum_{j \in \text{zero}} A_{i,j} \sum_{j_2 \in N} A_{j,j_2} X_{j_2} \geq \quad (25)$$

$$+ \sum_{j \in \text{zero}} A_{i,j} \sum_{j_2 \in N} A_{j,j_2} \quad (26)$$

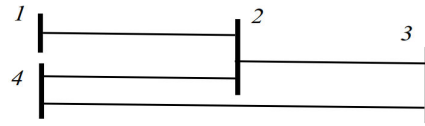
$$- \frac{1}{2} \sum_{j \in N} A_{i,j} \sum_{j_2 \in N} A_{j,j_2} A_{i,j_2} \quad (27)$$

$$- \sum_{j \in \text{zero}} A_{i,j} \sum_{j_2 \in N} A_{j,j_2} \sum_{j_3 \in N} A_{j_2,j_3} A_{i,j_3} \quad (28)$$

در روابط (۲۵) تا (۲۸)، N مجموعه تمامی باس‌ها، zero مجموعه باس‌های تزریق صفر و Terminal Bus مجموعه باس‌های ترمینال است. عبارت مربوط به رابطه (۲۵) نشان‌دهنده باس‌های غیرتزریق صفر متصل شونده به باس تزریق صفر نام است (حتی اگر این اتصال از طریق باس‌های تزریق صفر دیگر باشد). عبارت مربوط به رابطه (۲۶)، نشان‌دهنده تعداد باس‌های غیر تزریق صفر متصل شونده به باس تزریق نام است (حتی اگر این اتصال از طریق باس‌های تزریق صفر دیگر باشد). روابط (۲۵) و (۲۶) تضمین‌کننده شرط معلوم بودن جریان‌های ورودی به باس تزریق صفر نام می‌باشند. رابطه (۲۷) نشان‌دهنده تعداد لینک‌های بین باس‌های غیرتزریق صفر j_2 و j است که بدون هیچ واسطه‌ای به همدیگر متصل می‌شوند. این باس‌ها به باس i متصل می‌باشند. توضیح در مورد وجود این قسمت از رابطه این است که وجود چنین لینک‌هایی باعث می‌شود از تعداد متغیرهای لازم برای رؤیت‌پذیری شبکه کاسته شود. برای مثال، شبکه شکل ۴ را در نظر بگیرید.

$$X_i + X_j \geq 1 \quad (18)$$

این بدان معنی است که حداقل یک PMU روی یکی از باس‌های i و j قرار می‌گیرد. قیود بالا برای شبکه شکل ۳، از روی روابط (۱۶) و (۱۸) به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) به دست می‌آید.



شکل ۳: شبکه نمونه بدون باس تزریق صفر

$$\text{Line}(1-2): X_1 + X_2 \geq 1$$

$$\text{Line}(2-3): X_2 + X_3 \geq 1 \quad (19)$$

$$\text{Line}(2-4): X_2 + X_4 \geq 1$$

$$\text{Line}(3-4): X_3 + X_4 \geq 1$$

$$\text{Bus 1}: X_1 + X_2 \geq 1$$

$$\text{Bus 2}: X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \geq 1 \quad (20)$$

$$\text{Bus 3}: X_2 + X_3 + X_4 \geq 1$$

$$\text{Bus 4}: X_2 + X_3 + X_4 \geq 1$$

روابط (۱۹) و (۲۰) را می‌توان به وسیله هرگونه روش بهینه‌سازی حل نمود. با توجه به ذات خطی بودن مسئله می‌توان از روش برنامه‌نویسی خطی دودویی (Binary integer programming) استفاده نمود. حاصل این روش بهینه‌سازی یک بردار از متغیرهای X (رابطه (۲۱)) است که در تمامی روابط (۱۹) و (۲۰) صادق می‌باشند.

$$X = [1, 1, 0, 1] \quad (21)$$

۴- مکان‌یابی PMU با در نظر گرفتن باس‌های تزریق صفر

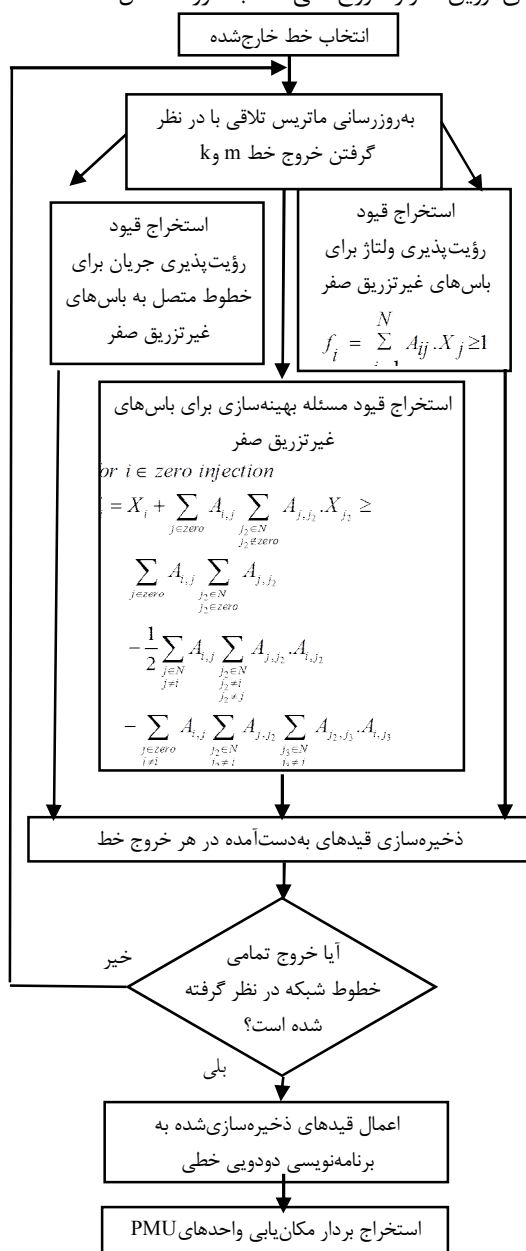
باس تزریق صفر باسی است که در آن هیچ جریانی تولید و مصرف نمی‌شود؛ یعنی حاصل جمع جریان‌های ورودی به باس بار، برابر است با حاصل جمع جریان‌های خروجی از باس بار. بنابراین وجود باس تزریق صفر در شبکه قدرت باعث می‌شود که تعداد متغیرهای لازم برای رؤیت‌پذیری آن شبکه در مقایسه با شبکه‌ای با همان تعداد باس و فاقد باس تزریق صفر کاهش یابد. در این بخش، ابتدا شروط اصلی مسئله بیان می‌شوند و نهایتاً فرمول‌بندی مکان‌یابی PMU با در نظر گرفتن باس تزریق صفر ارائه می‌شود. شروط مسئله مکان‌یابی PMU با در نظر گرفتن باس تزریق صفر به این صورت بیان می‌شوند:

۱- باس‌های ترمینال حتماً بایستی دارای واحد PMU باشند. باس ترمینال باسی است که تنها از طریق یک خط انتقال به شبکه قدرت متصل باشد. در صورت قطع این خط دیگر نمی‌توانیم اندازه‌گیری مستقیم داشته باشیم، بنابراین رابطه (۲۲) را به صورت زیر داریم.

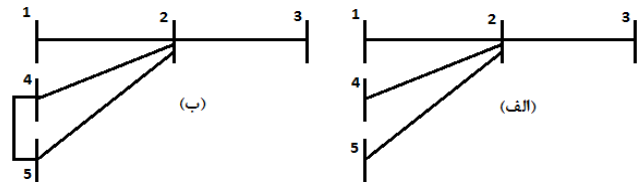
$$\text{for } i \in \text{Terminal Bus } X_i = 1 \quad (22)$$

۲- برای باس‌های غیر تزریق صفر بایستی شرط رؤیت‌پذیری ولتاژ را داشته باشیم (ولتاژ دو سر خط معلوم باشد)؛ یعنی مطابق رابطه (۲۳) داریم:

۳. استخراج قیود مسئله مکان یابی برای باس های غیر تزریق صفر (رؤیت پذیری ولتاژ)
 ۴. استخراج قیود مسئله مکان یابی برای خطوط متصل به باس های غیر صفر (رؤیت پذیری جریان)
 ۵. استخراج قیود مسئله بهینه سازی برای باس های تزریق صفر
 ۶. دسته بندی قیود و ذخیره سازی آن ها
 ۷. تکرار مراحل ۱ تا ۶ برای تمامی خطوط واقع در شبکه
 ۸. دسته بندی قیدهای به دست آمده برای هر یک از خطوط و اعمال دسته قیدها به برنامه ریزی دودویی خطی
 ۹. به دست آوردن بردار متغیرهای X
- فلوچارت کلی مکان یابی واحد اندازه گیری فازور با لحاظ اثر باس های تزریق صفر و خروج تکی خط به صورت شکل ۵ است.



شکل ۵: فلوچارت شکل ۵: فلوچارت مکان یابی واحد اندازه گیری فازور با در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر و خروج تکی خط



شکل ۴: شبکه نمونه با باس تزریق صفر (باس شماره ۲)

در شبکه شکل ۴-الف، باس شماره ۲ باس تزریق صفر است. برای اینکه شبکه فوق رؤیت پذیر عیب باشد، بایستی واحد PMU بر روی باس های {۱، ۳، ۴، ۵} قرار گیرد و در صورتی که لینک مابین باس ۴ و ۵ برقرار باشد (شکل ۴-ب)، واحدهای PMU بایستی بر روی باس های {۱، ۳، ۴} و یا {۱، ۳، ۵} قرار گیرد. رابطه (۲۸) نشان دهنده تعداد لینک هایی است که بین باس های غیر تزریق صفر j و l ، از طریق باس 2 ایجاد می شوند و همچنین باس های j و l به باس تزریق صفر نام متصل می باشند.

در مراجع قبلی رابطه (۲۸) مورد بررسی قرار نگرفته است و در این تحقیق در نظر گرفته می شود. این قسمت از معادله مخصوصاً در شبکه های بزرگ و پیچیده بسیار حائز اهمیت است، چراکه در شبکه های پیچیده تعداد لینک هایی که بین باس ها ایجاد شده و دارای شرایط رابطه (۲۸) است زیاد بوده و می تواند بر روی جواب مسئله بهینه سازی تأثیرگذار باشد.

۵- مکان یابی واحد اندازه گیری فازور با در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر و خروج تکی خط

خروج خط در شبکه انتقال انرژی به دلایل مختلف در شبکه قدرت به وفور رخ می دهد. انواع خطاهای دائم خط انتقال، خروج های برنامه ریزی شده خطوط جهت انجام تعمیرات و نگهداری و احداث خط جدید از جمله عوامل خروج خط می باشند. در صورتی که مکان یابی واحدهای اندازه گیری فازور بدون در نظر گرفتن این پدیده انجام شود، این امکان وجود دارد که در اثر خروج خط انتقال قسمتی از شبکه قدرت غیر رؤیت پذیر شوند. بر حسب پیچیدگی شبکه قدرت و حساسیت خط انتقال خارج شونده، محدوده رؤیت ناپذیری می تواند از یک خط رؤیت ناپذیر تا چندین خط و باس بار رؤیت ناپذیر متغیر باشد. چنین محدوده رؤیت ناپذیری از لحاظ حفاظتی غیر قابل قبول است و می تواند هزینه های سنگینی در پی داشته باشد. برای انجام مکان یابی واحد PMU با در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر و خروج تکی خط مراحل پیش رو پیشنهاد می گردد:

۱. خارج کردن خط انتقال $(l-j-k)$ و به روز کردن ماتریس تلاقی شبکه (با حذف درایه های سطر k ام و ستون k ام و سطر l ام و ستون l ام).
۲. تعیین باس های ترمینال (در صورتی که با خروج یک خط باس مربوط به آن خط به یک حالت یک سو تغذیه تبدیل شود، آن باس، باس ترمینال محسوب نمی شود).

۶- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، روش جدید مکان‌یابی واحد اندازه‌گیری فازور بر روی شبکه های استاندارد ۹ و ۱۴ و ۱۳ باسه IEEE اجرا می‌شود و نتایج محل نصب واحد اندازه‌گیری فازور و چک کردن رؤیت‌پذیری به صورت جدول ارائه می‌شود. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشان دهنده نتایج مسئله بهینه‌سازی برای شبکه‌های ۹، ۱۴ و ۳۰ باسه IEEE می‌باشند. ساختار شبکه‌های استاندارد IEEE در [۱۲] ارائه شده است.

چنانچه در جدول شماره ۲ نمایش داده شده است، تعداد ۷ واحد اندازه‌گیری فازور لازم است تا بدون لحاظ اثر باس‌های تزریق صفر شبکه رؤیت‌پذیر باشد. تنها با اضافه کردن یک واحد اندازه‌گیری فازور می‌توان از مکان‌یابی خطا حین خروج تکی خط اطمینان داشت. در صورتی که اثر باس‌های تزریق صفر را نیز لحاظ کنیم، شبکه تنها با ۳ عدد PMU رؤیت‌پذیر خواهد بود. این بدان معنی است که با در نظر گرفتن اثر باس‌های تزریق صفر، به تعداد ۴ واحد PMU صرفه‌جویی خواهد شد. اگر اثر باس‌های تزریق صفر و خروج خط به صورت هم‌زمان وجود داشته باشد، ۵ واحد اندازه‌گیری فازور مورد نیاز خواهد بود. جدول‌های ۳، ۴ و ۵ نشان دهنده آزمون رؤیت‌پذیری شبکه ۱۴ باسه در حالت‌های مختلف می‌باشند.

جدول ۱: نتایج مسئله بهینه‌سازی برای شبکه ۹ باسه IEEE

نتایج شبکه ۹ باسه IEEE	با در نظر گرفتن تزریق صفر	بدون در نظر گرفتن تزریق صفر
بدون در نظر گرفتن خروج خط	۳، ۲، ۱	۹، ۷، ۴، ۳، ۲، ۱
	۳ واحد PMU	۶ واحد PMU
با در نظر گرفتن خروج خط	۳، ۲، ۱	۹، ۷، ۴، ۳، ۲، ۱
	۳ واحد PMU	۶ واحد PMU

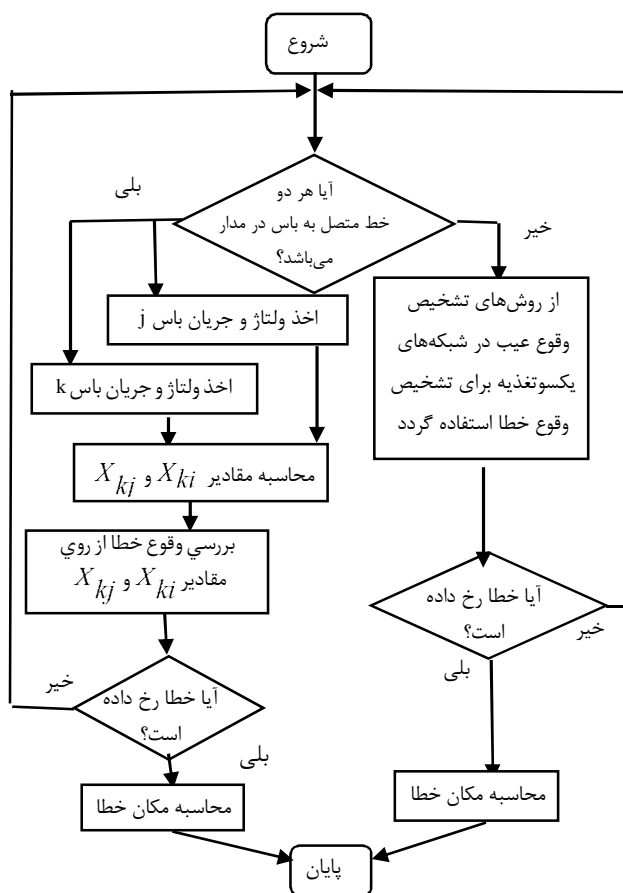
جدول ۲: نتایج مسئله بهینه‌سازی برای شبکه ۱۴ باسه IEEE

نتایج شبکه ۱۴ باسه IEEE	با در نظر گرفتن تزریق صفر	بدون در نظر گرفتن تزریق صفر
بدون در نظر گرفتن خروج تکی خط	۸، ۶، ۲	۱۳، ۱۰، ۹، ۸، ۶، ۴، ۲
	۳ واحد PMU	۷ واحد PMU
با در نظر گرفتن خروج تکی خط	۸، ۶، ۵، ۲، ۱	۱۳، ۱۰، ۹، ۸، ۶، ۴، ۲، ۱
	۵ واحد PMU	۸ واحد PMU

حالت خاص: در شبکه قدرت باس‌هایی وجود دارد که تعداد خطوط انتقال ورودی به آن‌ها دو عدد است. در صورتی که یکی از خطوط به عنوان خروج تکی خطی از مدار خارج شود، برای مکان‌یابی خطا دیگر نمی‌توان از روش انتخاب‌شده در بخش قبل استفاده کرد. چراکه در این حالت تنها ولتاژ و جریان یک طرف خط انتقال در دسترس خواهد بود. برای حل این مشکل کافی است از روش‌های رایج شبکه‌های یک‌سو تغذیه استفاده کرد.

برای حفاظت بر خط شبکه بایستی یک سیستم تصمیم‌گیرنده طراحی شود تا با توجه به وضعیت خروج خطوط چنان تصمیم‌گیری کند که روش مکان‌یابی خطای مناسب آن وضعیت انتخاب گردد. فرمان‌های این سیستم تنها بر روی باس‌هایی اعمال می‌گردد که تنها دو خط به آن‌ها متصل است. فرمان‌های این سیستم در ادامه بیان شده‌اند:

- در صورتی که یکی از خطوط متصل به باس‌هایی با دو خط ورودی، قطع شده باشد و در صورتی که خود آن باس، باس تزریق صفر باشد، بایستی از روش‌های مربوط به مدارهای یک‌سو تغذیه برای مکان‌یابی خطا استفاده شود.
- در صورتی که هر دو خط متصل به این نوع باس‌ها در مدار باشند، بایستی از روش ذکر شده در ابتدای فصل برای مکان‌یابی خطا استفاده گردد. فلوچارت مربوط به این فرایند تصمیم‌گیری را می‌توان به صورت شکل ۶ نمایش داد.



شکل ۶: فرایند تشخیص وقوع خطا با در نظر گرفتن خروج تکی خط

جدول ۵: زمون رؤیت پذیری شبکه ۱۴ باسه با در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر و خروج خط

شماره	خط معیوب	خط خارج شونده	ولتاژ طرف اول	ولتاژ طرف دوم	جریان یک طرف
۱	۱-۲	سایر خطوط	۱	۲	۱ یا ۲
۲	۱-۵	سایر خطوط	۱	۵	۱ یا ۵
۳	۲-۵	سایر خطوط	۲	۵	۲ یا ۵
۴	۲-۴	۴-۸	۲	۵	۲
۵	۲-۴	۴-۵	۲	۸	۲
۶	۳-۴	۲-۳	۸+۵+۲	-	۸+۵+۲
۷	۴-۵	۴-۸	۸+۶	۵	۸+۶+۲ یا ۵
۸	۶-۱۱	۱۰-۱۱	۶	-	۶
۹	۶-۱۱	۸-۱۴	۶	۸	۶ یا ۸
۱۰	۱۰-۱۱	۸-۱۴	۶	۸	۶ یا ۸
۱۱	۱۰-۱۱	۹-۱۰	۶	-	۶
۱۲	۶-۱۲	۱۲-۱۳	۶	-	۶
۱۳	۶-۱۳	۱۲-۱۳	۶	۸+۶	۶

جدول ۳: آزمون رؤیت پذیری شبکه ۱۴ باسه بدون در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر و با در نظر گرفتن خروج خط

شماره	خط معیوب	خط خارج شونده	ولتاژ طرف اول	ولتاژ طرف دوم	جریان یک طرف
۱	۱-۲	سایر خطوط	۱	۲	۲ یا ۱
۲	۱-۵	۵-۶	۱	۴ یا ۲	۱
۳	۲-۵	۱-۵	۲	۴	۲
۴	۲-۵	۴-۵	۲	۱	۲
۵	۲-۴	سایر خطوط	۲	۴	۲ یا ۴
۶	۳-۴	۲-۳	-	۴	۴
۷	۵-۴	۱-۵	۲ یا ۶	۴	۴
۸	۶-۱۱	۱۰-۱۱	-	۶	۶
۹	۱۰-۱۱	۶-۱۱	-	۱۰	۱۰
۱۰	۶-۱۲	۱۲-۱۳	۶	-	۶
۱۱	۶-۱۳	سایر خطوط	۱۳	۶	۳ یا ۶
۱۲	۱۳-۱۴	۹-۱۴	۱۳	-	۱۳

جدول ۶ نشان دهنده نتایج مسئله بهینه سازی برای شبکه ۳۰ باسه IEEE است. برای رؤیت پذیری شبکه ۳۰ باسه بدون در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر و خروج خط، به ۱۷ عدد واحد اندازه گیری فازور نیاز است. اگر بدون در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر خروج تکی خط لحاظ شود بازهم ۱۷ عدد واحد PMU نیاز خواهد بود، با این تفاوت که مکان واحدهای PMU متفاوت از یکدیگر خواهند بود. بنابراین می توان تنها با تغییر آرایش واحدهای PMU بر روی شبکه رؤیت پذیری حین خروج تکی خط را به دست آورد. در صورتی که اثر باس های تزریق صفر را لحاظ کنیم، رؤیت پذیری شبکه نیازمند ۹ واحد اندازه گیری فازور خواهد بود. به این معنی که ۸ عدد واحد PMU صرفه جویی می شود و در مرحله آخر با در نظر گرفتن هم زمان اثر باس های تزریق صفر و خروج تکی خطوط ۱۰ واحد PMU مورد نیاز خواهد بود تا شبکه به طور کامل رؤیت پذیر باشد.

جدول ۶: نتایج مسئله بهینه سازی برای شبکه ۳۰ باسه IEEE

نتایج شبکه ۳۰ باسه	مکان یابی PMU با در نظر گرفتن باس تزریق صفر	مکان یابی PMU بدون در نظر گرفتن باس تزریق صفر
مکان یابی PMU با خروجی تکی خط	۹، ۸، ۶، ۲، ۱، ۱۴، ۱۳، ۱۱، ۱۰، ۷، ۶، ۵، ۴، ۱	۱۴، ۱۳، ۱۱، ۱۰، ۷، ۶، ۵، ۴، ۱، ۲۷، ۲۶، ۲۴، ۲۱، ۱۹، ۱۶، ۱۵
	۲۹، ۲۶	۲۹
	۱۰ PMU	۱۷ PMU
مکان یابی PMU بدون خروجی تکی خط	۱۱، ۹، ۸، ۲، ۱، ۲۶، ۱۴، ۱۳	۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۸، ۶، ۵، ۳، ۲، ۲۷، ۲۶، ۲۴، ۲۲، ۱۹، ۱۷، ۱۵
	۲۹	۳۰
	۹ PMU	۱۷ PMU

با توجه به نتایج، می توان چنین استدلال نمود که افزایش یک واحد PMU در راستای رؤیت پذیری شبکه ۳۰ باسه امری معقول است. باید توجه داشت که با افزایش حجم سیستم، در نظر گرفتن اثر باس های

جدول ۴: آزمون رؤیت پذیری شبکه ۱۴ باسه با در نظر گرفتن اثر باس های تزریق صفر و بدون در نظر گرفتن خروج خط

شماره	خط معیوب	ولتاژ طرف اول	ولتاژ طرف دوم	جریان یک طرف
۱	۱-۲	۲	۶+۲	۶+۲ یا ۲
۲	۲-۵	۲	۶	۲ یا ۶
۳	۱-۵	۲	۶	۶+۲
۴	۲-۳	۲	۸+۲	۲ یا ۸+۲
۵	۳-۴	۲	۲	۸+۲
۶	۴-۹	۸	۸	۸+۲
۷	۴-۵	۲	۲	۶+۲
۸	۹-۱۰	۶	۸	۶
۹	۱۰-۱۱	۶	۸+۶	۶
۱۰	۶-۱۱	۶	۸+۶	۶
۱۱	۶-۱۲	۶	۶	۶
۱۲	۶-۱۳	۶	۸+۶	۶ یا ۸+۶
۱۳	۱۲-۱۳	۶	۶	۶
۱۴	۱۳-۱۴	۶	۸+۶	۶
۱۵	۹-۱۴	۶	۸+۶	۶ یا ۸+۶

جدول ۸: آزمون رویت‌پذیری شبکه ۳۰ باسه با در نظر گرفتن اثر باس‌های تزریق صفر و خروج تکی خط

جریان یک طرف	ولتاژ طرف دوم	ولتاژ طرف اول	خط خارج شونده	خط مورد مطالعه
۱ یا ۲	۲	۱	۳-۱	۲-۱
۱ یا ۱۳+۶+۲	۱۳+۶+۲	۱	۲-۱	۱-۳
۱	-	۱	۴-۳	۱-۳
۱ یا ۱۳+۶	۱۳+۶	۱	۴-۲	۱-۳
۱ یا ۱۳+۲	۱۳+۲	۱	۶-۴	۱-۳
۱۳+۶+۲	-	۱+۶+۲ ۳	۳-۱	۳-۴
۱ یا ۱۳+۶	۱	۱۳+۶	۴-۲	۳-۴
۱ یا ۱۳+۲	۱	۱۳+۲	۶-۴	۳-۴
۶ یا ۱۳+۲	۶	۱۳+۲	۴-۳ یا ۳-۱	۴-۶
۶ یا ۲	۶	۲	تمامی خطوط	۲-۶
۶	-	۶	۷-۵ یا ۷-۲	۶-۷
۲ یا ۶	۲	۶	بغیر از ۶- ۷ و ۵-۷	۶-۷
۲	-	۲	۷-۵، ۷-۶	۵-۲
۲ یا ۶	۶	۲	خطوط بغیر از ۶- ۷ و ۵-۷	۵-۲
۶	-	۶	۲۸-۸	۸-۶
۶ یا ۲۹+۲۶+۶	۶	+۲۹+۶ ۲۶	۲۸-۶	۸-۶
۲۶ یا ۲۹+۶	۶	۲۹+۶	۲۶-۲۵	۸-۶
۲۶ یا ۲۹+۶	۶	۲۹+۶	۲۹-۲۷	۸-۶
۲۹+۶	-	۲۹+۶	۸-۶	۲۸-۸
۲۶ یا ۲۹+۶	۲۶	۲۹+۶	۲۵-۲۴	۲۶-۲۵
۱۴+۱۳+۶+۲+۱ ۲۹ یا	۲۶	۶+۲+۱ ۱+۱۳+ ۴	۲۷-۲۵	۲۶-۲۵
۱۹	-	۲۹	۳۰-۲۷	۳۰-۲۹
۱۹ یا ۲۹+۶	۲۹	۲۹+۶	۲۷-۲۵	۳۰-۲۹
۱۹ یا ۲۹+۶	۲۹	۲۹+۶	۲۷-۲۹	۳۰-۲۹
۱۴ یا ۱۳+۶+۲+۱ ۱۳	+۶+۲+۱ ۱۳	۱۴	۱۶-۱۲	۱۴-۱۲
۱۴	۱۴	۱۴	۱۵-۱۶	۱۴-۱۲
۱۴ یا ۲۹+۲۶+۱۴+۶ ۱۴	۱۴	+۱۴+۶ ۲۹+۲۶	۱۳-۱۲	۱۴-۱۲
۱۴+۱۳	-	۱۴+۱۳	۱۷-۱۶	۱۶-۱۲
۱۴ یا ۲۹+۲۶+۹+۶ ۱۴+۱۳	۲۶+۹+۶ ۲۹+	۱۴+۱۳	۱۸-۱۶	۱۶-۱۲

تزریق صفر صرفه‌جویی بیش‌تری را از لحاظ هزینه نصب واحدهای اندازه‌گیری فازور دارد. جدول‌های ۷، ۸ و ۹ نشان‌دهنده آزمون رویت‌پذیری شبکه ۳۰ باسه در حالت‌های مختلف مکان‌یابی می‌باشند.

جدول ۷: آزمون رویت‌پذیری شبکه ۳۰ باسه با در نظر گرفتن اثر باس‌های تزریق صفر و بدون در نظر گرفتن خروج تکی خط

جریان یک طرف	ولتاژ طرف دوم	ولتاژ طرف اول	خط معیوب	شماره
۱ یا ۲	۲	۱	۱-۲	۱
۱ یا ۱۳+۹+۲	۱۳+۹+۲	۱	۱-۳	۲
۱	۱۳	۱	۳-۴	۳
۲	۱۳	۲	۲-۴	۴
۲	۹	۲	۲-۶	۵
۲	۲۹+۲۶+۸+۲+۱	۲	۲-۵	۶
۱۳+۲+۱	۲	۱	۴-۶	۷
۲	۲	۲	۶-۷	۸
۲	۲	۲	۵-۷	۹
۸	۲۹+۲۶+۹+۲+۱	۸	۶-۸	۱۰
۱۱	۹	۱۱	۹-۱۱	۱۱
۱۴	۱۴	۱۳+۲+۱	۱۲-۱۴	۱۲
۱۴	۱+۱۳+۱۱+۹+۲+۱ ۴	۱۴	۱۴-۱۵	۱۳
+۱۳+۱۱+۹+۲+۱ ۱۴	۱۴	۱۴	۱۲-۱۵	۱۴
۱۴+۱۳	۲۹+۲۶+۱۴+۹	۱۴	۱۲-۱۶	۱۵
۱۴+۱۳	۲۹+۲۶+۱۴+۹	۱۴+۱۳	۱۶-۱۷	۱۶
۱۴+۱۳	۹	۱۴+۱۳	۱۰-۱۷	۱۷
۲۹+۲۶+۱۴	۲۹+۲۶+۱۴	۹	۱۰-۲۰	۱۸
۲۹+۲۶+۱۴+۹	۲۹+۲۶+۱۴+۹	+۲۶+۴+۱ ۲۹	۱۹-۲۰	۱۹
۲۹+۲۶+۱۴+۹	۲۹+۲۶+۱۴+۹	+۲۶+۴+۱ ۲۹	۱۸-۱۹	۲۰
۲۹+۲۶+۱۴	۲۹+۲۶+۱۴+۹	۱۴	۱۵-۱۸	۲۱
۱۴+۹	۲۹+۲۶+۹	۱۴	۱۵-۲۳	۲۲
۱۴+۹	۲۹+۲۶	۱۴+۹	۲۳-۲۴	۲۳
۲۹+۲۶	۱۴+۹	۱۴+۹	۲۴-۲۵	۲۴
۲۶	۱۴+۱۱+۹+۸+۲	۲۶	۲۵-۲۶	۲۵
۲۹+۸ ۲۶+۱۴+۱۱+۹	۲۹	۲۶	۲۵-۲۷	۲۶
۲۹	۲۹	۲۹	۲۷-۳۰	۲۷
۲۹	۲۹+۲۶	۲۹	۲۹-۳۰	۲۸
۲۹	۲۹	۲۹	۲۷-۲۹	۳۰
۲۹ یا ۲۶+۲۹	۲۹+۲۶	۸	۸-۲۸	۳۱

۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش ارائه‌شده ابتدا مسئله مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور به‌منظور رؤیت‌پذیری حالت خطا و با در نظر گرفتن اثر باس‌های تزریق‌صفر موردبررسی قرار گرفت و یک فرمول‌بندی جدید برای آن ارائه شد. سپس اثر خروج تکی خطوط به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار بر رؤیت‌پذیری حالت خطا، در مسئله مکان‌یابی واحدهای PMU لحاظ شد. روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های استاندارد ۹، ۱۴ و ۳۰ باسه IEEE پیاده‌سازی شد. و نتایج حاصل همراه با جدول‌های صحت‌سنجی رؤیت‌پذیری ارائه شد. نشان داده شد با استفاده از روش پیشنهادی، جواب مسئله بهینه‌سازی به‌گونه‌ای تغییر می‌یابد که با افزایش اندک در تعداد واحدهای PMU و با تغییر چیدمان واحدهای اندازه‌گیری فازور می‌توان از رؤیت‌پذیری بودن شبکه حین خروج تکی خطوط اطمینان داشت. همچنین نشان داده شد در مواردی می‌توان بدون افزایش تعداد واحدهای PMU و تنها با تغییر چیدمان این واحدها در شبکه، رؤیت‌پذیر بودن شبکه در حین خروج تکی خطوط را تضمین نمود.

جدول ۹: آزمون رؤیت‌پذیری شبکه ۳۰ باسه بدون در نظر گرفتن اثر باس‌های

تزریق‌صفر و با در نظر گرفتن خروج تکی خط

جریان یک طرف	خط خارج‌شونده	ولتاژ طرف دوم	ولتاژ طرف اول	خط معیوب
۲ یا ۱	۱-۳	۲	۱	۱-۲
۴ یا ۱	۱-۲	۴	۱	۱-۳
۱	۳-۴	-	۱	۱-۳
۴ یا ۱	۲-۴	۴	۱	۱-۳
۴	۱-۳	-	۴	۳-۴
۵	۱-۲	۴	۵	۲-۵
۵	۲-۴	۱	۵	۲-۵
۵	۲-۵	۶	۵	۵-۷
۵	۶-۷	-	۵	۵-۷
۸ یا ۶	سایر خطوط	۸	۶	۶-۸
۱۴	۱۳-۱۲	۱۵ یا ۱۶	۱۴	۱۲-۱۴
۱۴	۱۲-۱۵	۱۳	۱۴	۱۲-۱۴
۱۹	۱۵-۱۸	-	۱۹	۱۸-۱۹
۱۵	۱۸-۱۹	-	۱۵	۱۵-۱۸
۱۶	۱۰-۱۷	-	۱۶	۱۶-۱۷
۲۴	۱۵-۲۳	-	۲۴	۲۳-۲۴
۲۴	به‌غیراز ۱۵-۲۳	۱۵	۲۴	۲۳-۲۴
۲۹	۲۷-۳۰	-	۲۹	۲۹-۳۰
۲۷	۲۹-۳۰	-	۲۷	۲۷-۳۰
۸	۲۷-۲۹	۸	۲۷	۸-۲۸
۸	۲۷-۲۸	۸	۶	۸-۲۸
۲۶	۲۴-۲۵	۲۷	۲۶	۲۵-۲۶
۲۶	۲۵-۲۷	۲۴	۲۶	۲۵-۲۶

مراجع

[1] M. Avendano-Mora, and J. Milanovic, "Generalized formulation of the optimal monitor placement problem for fault location," *Electric Power Systems Research*, vol. 93, pp. 120-126, 2012.

[2] Y. Liao, "Fault location observability analysis and optimal meter placement based on voltage measurements," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 1062-1068, 2009.

[3] Y. Liao, "Fault location for single-circuit line based on bus-impedance matrix utilizing voltage measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 609-617, 2008.

[4] H. Nazari-pouya, and S. Mehraeen, "Optimal PMU placement for fault observability in distributed power system by using simultaneous voltage and current measurements," *Power and Energy Society General Meeting (PES), IEEE*, pp. 1-6, 2013.

[5] M. Eissa, M.E. Masoud, and M.M.M. Elanwar, "A novel back up wide area protection technique for power transmission grids using phasor measurement unit," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 270-278, 2010.

[6] K.P. Lien, C.W. Liu, C.S. Yu, and J.A. Jiang, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 1128-1136, 2006.

[7] S. Geramian, H.A. Abyaneh, and K. Mazlumi, "Determination of optimal PMU placement for fault location using genetic algorithm," *13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, pp. 1-5, 2008.

[8] S.P. Pokharel, and S. Brahma, "Optimal PMU placement for fault location in a power system," *North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-5, 2009.

[9] J. Fadiran, S. Chowdhury, and S. Chowdhury, "Optimal placement of phasor and conventional measurements for power system state estimation and fault observability," *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1-6, 2012.

[10] B. Rajasekhar, A.K. Chandel, and B. Vedik, "Differential evolution based optimal PMU placement for fault observability of power system," *Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, pp. 1-5, 2013.

[11] Z. Jiang, S. Miao, H. Xu, P. Liu, and B. Zhang, "An effective fault location technique for transmission grids using phasor measurement units," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, pp. 653-660, 2012.

[12] www.ee.washington.edu/research/pstca/.

پیوست

مقدار X_{ik} برای خطای تک‌فاز به زمین

$$X_{ik} = \frac{1}{D_{ik1}} \operatorname{arccos} h \left(\sqrt{\frac{-f + \sqrt{f^2 - 4eg}}{2e}} \right) \quad (1-پ)$$

که در آن:

$$a = \frac{E_2 G_1 - E_1 G_2}{H_2 G_1 - H_1 G_2}, b = \frac{F_2 G_1 - F_1 G_2}{H_2 G_1 - H_1 G_2} \quad (2-پ)$$

$$d = \frac{F_2 H_1 - F_1 H_2}{H_1 G_2 - H_2 G_1}, c = \frac{E_2 H_1 - E_1 H_2}{H_1 G_2 - H_2 G_1} \quad (3-پ)$$

$$e = (c^2 - a^2 + d^2 - b^2)^2 - (2ab - 2cd)^2 \quad (4-پ)$$

$$f = 2(c^2 - a^2 + d^2 - b^2)(b^2 - d^2 - 1) + (2ab - 2cd)^2 \quad (5-پ)$$

$$g = (b^2 - d^2 - 1) \quad (6-پ)$$

$$H_1 = \frac{(\operatorname{Im}[j I_{ik0} Z_{c0}] - \frac{\operatorname{Im}(I_{F1})}{\operatorname{Re}(I_{F1})} \operatorname{Re}[j I_{ik0} Z_{c0}])}{j} \quad (7-پ)$$

$$E_1 = (-\operatorname{Im}(U_{i1} + U_{i2}) - \frac{\operatorname{Im}(I_{F1})}{\operatorname{Re}(I_{F1})} \operatorname{Re}(U_{i1} + U_{i2})) \quad (8-پ)$$

$$F_1 = \frac{(-\operatorname{Im}[j(I_{ik1} + I_{ik2}) Z_{c1}] + \frac{\operatorname{Im}(I_{F1})}{\operatorname{Re}(I_{F1})} \operatorname{Re}[j(I_{ik1} + I_{ik2}) Z_{c1}])}{j} \quad (9-پ)$$

$$G_1 = \frac{\operatorname{Im}(I_{F1})}{\operatorname{Re}(I_{F1})} \operatorname{Re}(U_{i0}) - \operatorname{Im}(U_{i0}) \quad (10-پ)$$

$$E_2 = \sinh(D_{ik1}), F_2 = -\cosh(D_{ik1}) \quad (11-پ)$$

$$H_2 = -\operatorname{Con}_{ik} \cdot \cosh(D_{ik0})$$

$$G_2 = \operatorname{Con}_{ik} \cdot \sinh(D_{ik0})$$

$$\operatorname{Con}_{ik} = \frac{Z_{C0}}{2Z_{C1}} \cdot \left(\frac{[(U_{j1} + U_{j2}) \cosh(D_{kj1}) - (I_{jk1} + I_{jk2}) Z_{C1} \sinh(D_{kj1})]}{[U_{j0} \cosh(D_{kj0}) - I_{kj0} Z_{C0} \sinh(D_{kj0})]} - \frac{[U_{i0} \cosh(D_{ik0}) - I_{ik0} Z_{C0} \sinh(D_{ik0})]}{[U_{j0} \cosh(D_{kj0}) - I_{kj0} Z_{C0} \sinh(D_{kj0})]} \right) \cdot \left(\frac{[(U_{i1} + U_{i2}) \cosh(D_{ik1}) - (I_{ik1} + I_{ik2}) Z_{C1} \sinh(D_{ik1})]}{[U_{j0} \cosh(D_{kj0}) - I_{kj0} Z_{C0} \sinh(D_{kj0})]} - \frac{[U_{i0} \cosh(D_{ik0}) - I_{ik0} Z_{C0} \sinh(D_{ik0})]}{[U_{j0} \cosh(D_{kj0}) - I_{kj0} Z_{C0} \sinh(D_{kj0})]} \right) \quad (12-پ)$$