

# جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در شبکه‌های قدرت و توزیع بهینه‌سازی افزونگی اندازه‌گیری‌ها

علی انصاری<sup>(۱)</sup> - فریبرز حقیقت‌دار فشارکی<sup>(۲)</sup>

(۱) کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۲

**خلاصه:** امروزه در سیستم‌های قدرت مدرن به منظور دستیابی به مانیتورینگ، آنالیز، حفاظت و کنترل دقیق‌تر سیستم از واحدهای اندازه‌گیری فازوری، استفاده می‌گردد. به دلیل هزینه‌ی بالای این واحدها، استفاده از کمینه تعداد آن‌ها جهت تامین رویت‌پذیری سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر آن با بیشینه کردن قابلیت اطمینان سیستم اندازه‌گیری، احتمال از دست رفتن سیستم قدرت بدلیل اختلال در سیستم اندازه‌گیری به حداقل خواهد رسید. در این مقاله، علاوه بر جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری، روش جدیدی جهت توزیع بهینه‌سازی افزونگی آن‌ها در راستای ارتقاء قابلیت اطمینان سیستم اندازه‌گیری، ارائه شده است. از آنجا که باس‌ها با افزونگی مرتبه ۱ با از دست رفتن اندازه‌گیری خود، رویت‌پذیری سیستم را با خطر مواجه می‌کنند، با کمک این روش سعی شده که تعداد این قبیل از باس‌ها در سیستم کاهش یابد. از سوی دیگر، روش پیشنهادی بر خلاف روش‌های قبلی، سعی می‌کند که با کاهش تعداد سایر باس‌های با افزونگی مراتب پایین، بدون افزایش مراتب پائین‌تر از خود، قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشد. همچنین جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در پیشامدهای خروج خط یا از دست رفتن واحد اندازه‌گیری، توسط این روش جدید، صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که روش پیشنهادی روی سیستم‌های تست مرجع ۱۴-، ۳۰-، ۵۷- و ۱۱۸- باس IEEE پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش‌های قبلی مقایسه گردیده است. این نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر رفع اشکالات روش‌های قبلی، در برخی حالات، بهبود قابلیت اطمینان سیستم اندازه‌گیری حاصل گردیده است. این امر کارایی بهتر و موثرتر روش پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد. همچنین موارد فوق با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثر گره‌های تزریق صفر مورد مطالعه قرار گرفته است. **کلمات کلیدی:** جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری، رویت‌پذیری سیستم قدرت، توزیع بهینه، افزونگی اندازه‌گیری‌ها، قابلیت اطمینان

## Placement of Phasor Measurement Units in Power Networks and Optimal Distribution of Measurement Redundancy

Ali Ansari<sup>(1)</sup> - Fariborz Haghghatdar Fesharaki<sup>(2)</sup>

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran  
aliansari.eng@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran  
fr\_haghghat@yahoo.com

**Abstract:** Nowadays, for more accurate system monitoring, analysis, protection and control, Phasor Measurement Units (PMUs) are used in modern power systems. Optimal placement of PMUs to maintain the full network observability with the least number of these devices installed in the network is very important, because of the significant cost of PMUs. Moreover, by maximizing the measurement system reliability, the power system outage due to measurement system malfunction would be minimized. In this paper in addition to the optimal placement of PMUs a new method is proposed for optimal distribution of measurements redundancy. Since the buses having first order redundancy degrade the system observability by missing their measurements, this method is used to reduce the number of these buses. On the other hand, the proposed method, in spite of previous methods, is used to enhance the system observability by improving the redundancy order of the other low order redundancy buses without increasing the number of the lower orders. In addition, by using this method, the optimal PMU placement can be obtained considering the contingencies such as PMU outage or line outage. It should be noted that the proposed methods are implemented on the IEEE 14-, 30, 57- and 118- bus power networks and the simulation results are compared with the previous methods. Simulations show that drawbacks of previous methods are removed and in addition, in some cases, the reliability of the measurement system is improved. This implies the better performance and more efficiency of proposed method in this paper. In addition, simulations are performed with and without considering the effect of zero injection buses.

**Index Terms:** Optimal PMU Placemet, Power System Observability, Optimal Distribution, Measurement Redudancy, Reliability

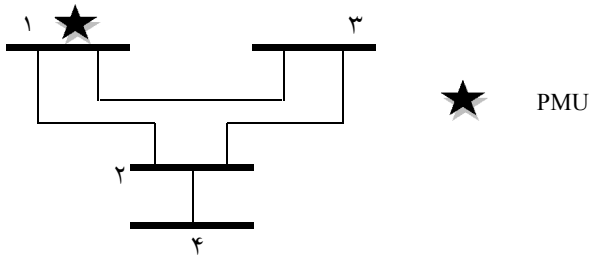
نویسنده مسئول: علی انصاری، کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، aliansari.eng@gmail.com

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین موضوعات مطرح در سیستم‌های قدرت، کنترل، نظارت، ذخیره، آنالیز و گزارش داده است. بدین منظور در اوایل دهه هفتاد سیستم اسکادا معرفی گردید و روز به روز گسترش یافت و مورد استفاده قرار گرفت که تا امروز نیز این سیستم، در بسیاری از کشورهای جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های سیستم اسکادا، اگرچه امکان حل مساله تخمین حالت را غالباً فراهم می‌سازد، اما بنا بر دلایلی از جمله دوره اندازه‌گیری طولانی و داشتن روابط غیرخطی با متغیرهای حالت سیستم، موجب کندی در زمان اجرای تخمین حالت شده و همچنین دقت آن را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. از سوی دیگر این سیستم، توانایی ضبط حالت‌های گذرا و دیگر پیشامدها که لازمی مونتورینگ و تخمین حالت دینامیکی سیستم‌های قدرت می‌باشد را دارا نیست [۱]. همچنین قادر به اندازه‌گیری زاویه ولتاژ نبوده و از طرف دیگر، از نقطه‌نظر نرخ ارسال اطلاعات نیز به شدت دارای محدودیت است. بدین ترتیب، رفع معایب و محدودیت‌های مذکور چالش بزرگی را در برابر دانشمندان قرار داد. تلاش‌ها و تحقیقات زیادی در این راستا به عمل آمد تا این که در اواخر دهه ۸۰ با معرفی واحد اندازه‌گیری فازوری (PMU<sup>۱</sup>) توسط دانشمندان ویرجینیاتک، تحول عظیمی در صنعت برق رخ داد [۲]. این واحدها در اوایل دهه ۹۰ توسط شرکت ماکروداین به صورت تجاری وارد بازار شد [۲]. از خصوصیات بازار این سیستم

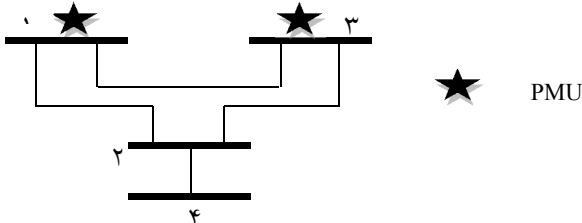
ها این است که با استفاده از سیگنال سنکرون کننده، که غالباً از طرف سیستم موقعیت‌یاب جهانی صادر می‌شود، قادر به اندازه‌گیری فازور ولتاژ و فازور جریان خطوط در یک شین است که سیستم اسکادا از انجام آن قاصر بود. یکی از مباحث مهم در شبکه‌های قدرت، تخمین حالت سیستم‌هاست که در سیستم‌های اسکادا از دقت کافی برخوردار نبود. در مراجع [۲] و [۳] به تخمین دقیق حالت سیستم‌های قدرت مبتنی بر PMU اشاره شده و جایابی واحدها برای رویت‌پذیری سیستم صورت گرفته است. در مرجع [۴] یک روش جدید برای تخمین حالت مطرح شده است. بدین منظور از معیار حداقل مربعات وزندار و روش ازدحام ذرات توسعه یافته استفاده شده است. با توجه به فراگیر شدن روز افزون سیستم‌های اندازه‌گیری گسترده بر مبنای PMU، در مراجع [۵] و [۶] بحث مهم مانیتورینگ و کنترل بلادرنگ سیستم قدرت مطرح شده است. در مرجع [۷] نحوه تشخیص خطا و مکان وقوع آندر خطوط انتقال سیستم‌های مبتنی بر PMU مورد مطالعه قرار گرفته است. همان طور که قبلاً هم اشاره شد، یکی از نقص‌های سیستم اسکادا، ناتوانی در آنالیز حالت‌های گذرای سیستم قدرت است. در مرجع [۸] پیش‌بینی و آنالیز پایداری گذرا در هنگام به کارگیری PMU بررسی شده است. از دیگر کاربردهای سیستم‌های مبتنی بر PMU می‌توان به مانیتورینگ حرارتی خطوط انتقال [۹] و حفاظت گسترده سیستم قدرت [۱۰] را نام برد. همچنین PMUها، اندازه و فاز ولتاژها و جریان‌های باس‌ها را در نرخ بالا گزارش می‌کنند [۱۱] که این امر، امکان دنبال کردن حالت سیستم‌های قدرت را فراهم می‌آورد. این واحدها از نظر هزینه، بسیار بالاتر از سیستم‌های مورد استفاده قبلی است. از همین رو مبحثی به نام جایابی

بهینه‌واحدهای اندازه‌گیری فازوری (OPP<sup>۲</sup>) به میان آمد. بدین نحو که مکان‌های قرارگیری این واحدهای اندازه‌گیری طوری تعیین گردد که با کمترین تعداد از آنها، سیستم کاملاً رویت‌پذیر باشد، تا از نقطه نظر اقتصادی قابل توجیه گردد. در مرجع [۱۲] برای دستیابی به رویت‌پذیری کامل سیستم قدرت با کمترین تعداد PMU از الگوریتم ژنتیک استفاده گردیده است. در مرجع [۱۳] یک روش جدید برای جایابی همزمان واحدهای اندازه‌گیری فازوری و مرکز داده فازور (PDC<sup>۳</sup>) مطرح گردیده است که منجر به ارتقای قابلیت اطمینان شبکه مخابراتی تا بالاترین حد امکان گردیده است. در مرجع [۱۴] برای دستیابی به دو هدف متضاد کمترین تعداد PMU و همچنین بیشترین میزان افزونگی اندازه‌گیری از الگوریتم ژنتیک قدرتمند غیرغالب بهره گرفته شده است. در مرجع [۱۵] با در نظر گرفتن اثر گره‌های تزریق صفر، یک الگوریتم مبتنی بر توپولوژی سیستم قدرت برای جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری پیشنهاد شده و نتایج آن با روش‌های دیگر مقایسه شده است. همچنین در مرجع [۱۶] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بیشترین افزونگی اندازه‌گیری‌ها ضمن تامین رویت‌پذیری سیستم قدرت با کمترین تعداد PMU، هم در حالت خروج خط و هم در حالت خروج PMU، به دست آمده است. مرجع [۱۷] به کلیه هزینه‌ها، از قبیل هزینه‌های آشکار و پنهان پرداخته است تا جایابی واحدهای اندازه‌گیری از نقطه نظر اقتصادی به واقعیت و عمل نزدیک‌تر باشد. مرجع [۱۸] به بررسی تاثیر ویژگی‌های توپولوژیکی در راه‌اندازی شبکه ارتباطی بیسیم برای سیستم‌های مبتنی بر PMU پرداخته و با استفاده از تجزیه و تحلیل سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)<sup>۴</sup>، سعی در یافتن یکی از مکان‌های PMU دار به عنوان ایستگاه اصلی کنترل داشته است. در مرجع [۱۹] شبکه جریان مستقیم در نظر گرفته شده و رویت‌پذیری، در شبکه‌های ترکیبی مستقیم و متناوب در نظر گرفته شده است. یکی از موارد مهم در سیستم‌های مبتنی بر PMU بحث قابلیت اطمینان است. در مرجع [۲۰] یک روش جدید با توسعه الگوریتم ازدحام ذرات در بحث جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری پیشنهاد شده است و دو مدل تابع سیگموئید در راستای دستیابی به جواب‌هایی با همگرایی سریع‌تر و قابلیت اطمینان بالاتر معرفی شده است. در مرجع [۲۱] یک فرمول‌بندی سراسر با کمک روش برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای جایابی واحدها صورت گرفته است. از ویژگی‌های دیگر این مقاله در نظر گرفتن پیشامد مرتبه ۲ است در حالی که در اکثر مقالات پیشامد خروج خط یا PMU به صورت مرتبه ۱ صورت می‌گیرد. مرجع [۲۲] به تاثیر سوء عملکرد ناشی از خاموشی در سیستم اندازه‌گیری گسترده بر اساس معیار قابلیت اطمینان سیستم قدرت پرداخته است. اعمال گره‌های تزریق صفر، به دلیل ارتباط غیرخطی آن‌ها با متغیر نصب PMU، محاسبات را پیچیده و با مشکل روبرو می‌کند. در مرجع [۲۳] برای رفع این مشکل یک مدل خطی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ارائه گردیده است. اما در مرجع [۲۴] روشی ارائه شد که بر خلاف مقاله قبلی، بدون اضافه کردن هیچ قید جدیدی و صرفاً با یک سری تغییرات در قیود دیگر، اثر گره‌های تزریق صفر را در نظر می‌گیرد. در مرجع [۲۵] به بحث توزیع بهینه



شکل (۱): رویت پذیری مستقیم و غیرمستقیم  
Fig (1): Direct and indirect observability

در قسمت قبلی اشاره شد که زمانی یک سیستم رویت پذیر است که تمامی باس‌های آن رویت پذیر باشند. در راستای تبیین این مفهوم در قالب مفهوم افزونگی، می‌توان گفت، زمانی که مرتبه افزونگی هر باس حداقل یک باشد، آن سیستم رویت پذیر خواهد بود. به عنوان مثال همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، با توجه به مرتبه افزونگی صفر باس شماره ۴، رویت‌ناپذیر است. در بخش‌های بعد، در مورد فرم ریاضی محاسبه افزونگی و کاربردهای آن بحث خواهد گردید.



شکل (۲): میزان افزونگی سیستم ۴- باس  
Fig (2): Measurement redundancy in 4-bus system

Table (2): Measurement redundancy in 4-bus system  
جدول (۲): افزونگی باس‌های سیستم ۴- باس

شماره باس	۱	۲	۳	۴
افزونگی	۲	۲	۲	۰

### ۲-۳- گره تزریق صفر

مفهوم کاربردی دیگر در بحث جایابی PMUها تاثیر گره‌های تزریق صفر است. به بیان ساده، گره تزریق صفر، گره‌ای است که نه به بار متصل است و نه به ژنراتور. بنابراین جریان خالص تزریق شده به این گره معلوم و برابر با صفر است. در برخی شرایط وجود این گره‌ها، باعث رویت‌پذیر کردن گره‌های رویت‌ناپذیر خواهد شد که بعضاً کمینه تعداد PMU مورد نیاز برای رویت‌پذیری کل سیستم را کاهش خواهد داد.

باس تزریق صفر و تمامی باس‌های متصل به آن یک مجموعه باس تشکیل می‌دهند. در این مجموعه باس‌ها اگر فقط یک باس رویت‌ناپذیر باشد، ولتاژ آن به کمک قانون جریان کیرشهف و امپدانس خط انتقال به دست می‌آید و بدین ترتیب رویت‌پذیر خواهد شد [۲۷]. شکل (۳) همانند شکل (۲) است با این تفاوت که باس شماره ۲، باس تزریق صفر در نظر گرفته می‌شود. در مجموعه‌ی باس تزریق صفر و باس‌های مجاور، فقط باس

افزونگی پرداخته شده‌است اما بهینه‌سازی با روش پیشنهاد شده در آن، دلیل استفاده از توابع هدف غیرخطی ناصاف، بسیار زمان‌بر بوده و توانایی اعمال به سیستم‌های با مقیاس بزرگ را ندارد. در مرجع [۲۶] یک الگوریتم جدید برای توزیع بهینه افزونگی مطرح شده که مشکل مرجع [۲۵] در آن مرتفع گردیده‌است، اما پاسخ آن بسته به ترتیب اجرای الگوریتم پیشنهادی متفاوت بوده و ممکن است نقطه بهینه فراگیر بدست نیاید. در این مقاله سعی شده که با ارائه یک الگوریتم جدید، ایرادات الگوریتم‌های مطرح شده قبلی برطرف گردد. همچنین علاوه بر کاهش تعداد کل باس‌های مرتبه ۱ به کاهش دیگر باس‌ها با مراتب پایین‌تر در راستای توزیع هر چه بهتر افزونگی جهت بهبود قابلیت اطمینان سیستم گام برداشته شود.

در ادامه، در بخش دوم مفاهیم مربوط به سیستم‌های مبتنی بر PMU معرفی شده و پس از آن فرمول‌بندی مساله مطرح می‌گردد. در بخش سوم الگوریتم‌های توزیع بهینه افزونگی تشریح شده و ایرادات آن بیان خواهد شد و پس از آن، الگوریتم پیشنهادی جهت رفع ایرادات مطرح شده و همچنین توسعه الگوریتم، ارائه خواهد گردید. در بخش چهارم نتایج اعمال روش پیشنهادی به سیستم‌های آزمایشی استاندارد IEEE بررسی خواهد شد و با روش‌های پیشین مقایسه خواهد گردید. نهایتاً در بخش پنجم، مقاله با ارائه نتایج بدست آمده اصلی پایان می‌یابد.

## ۲- جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری

در ابتدا لازم است ابتدا به برخی مفاهیم پرداخته و پس از آن مساله فرمول‌بندی خواهد شد.

### ۲-۱- رویت پذیری سیستم قدرت

مطابق تعریف رویت‌پذیری توپولوژیک گره، زمانی یک گره رویت‌پذیر گفته می‌شود که یا روی آن یک PMU نصب باشد یا به گره‌ای که روی آن PMU نصب است، متصل باشد [۲۷]. به عنوان مثال همان‌طور که در شکل (۱) ملاحظه می‌گردد، نصب PMU روی باس شماره ۱، منجر به رویت‌پذیری آن به صورت مستقیم و رویت‌پذیری باس‌های شماره ۲ و ۳ به صورت غیر مستقیم (وجود PMU روی باس‌های متصل مجاور) گردیده‌است. زمانی یک شبکه رویت‌پذیر گفته می‌شود که تمامی باس‌های آن رویت‌پذیر باشند. به عنوان مثال در شکل (۱)، به سبب رویت‌ناپذیر بودن باس شماره ۴، کل سیستم رویت‌ناپذیر خواهد بود.

### ۲-۲- افزونگی اندازه‌گیری

به تعداد دفعاتی که یک باس به صورت مستقیم یا به صورت غیرمستقیم، رویت‌پذیر می‌گردد افزونگی آن باس اطلاق می‌شود. به عنوان مثال در شکل (۲)، PMU روی باس‌های شماره ۱ و ۳ نصب شده است، باس شماره ۱ هم به علت وجود PMU روی آن و هم به دلیل وجود PMU روی باس مجاور (باس شماره ۳) رویت‌پذیر خواهد بود. بنابراین افزونگی آن برابر با ۲ است. همچنین با توجه به شکل (۲)، افزونگی باس‌های سیستم، مطابق با جدول (۱) خواهد بود.

### ۲-۵-۲- قابلیت اطمینان سیستم اندازه‌گیری

قبل از طرح حالت‌های بعد، فرمولی ساده برای قابلیت اطمینان به فرم رابطه (۴) تعریف می‌شود که در ادامه به فراخور نیاز جهت تایید و اعتبار سنجی الگوریتم و شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، استفاده خواهد شد.

$$R = \prod_{i=1}^{N_{bus}} (1 - (q)^{RI(i)}) \quad (4)$$

که  $q$  احتمال خرابی PMU است و در ادامه مقاله مقدار آن برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

### ۲-۵-۳- در نظر گرفتن اثر گره‌های تزریق صفر

اگر قرار بر اعمال اثر گره‌های تزریق صفر روی جایابی PMUها باشد، طبق مرجع [۲۴]، رابطه (۳) به فرم رابطه (۵) تبدیل خواهد شد.

$$A_{new} X \geq b ; A_{new} = P A, b = P I \quad (5)$$

که ماتریس  $A_{new}$ ، ماتریس جدید اتصالات گره و ماتریس  $b$ ، ماتریس تامین رویت‌پذیری سیستم در حضور گره‌های تزریق صفر خواهد بود. ماتریس جایگشت ( $P$ ) که در مرجع [۲۴] معرفی شده است، نقش کلیدی دارد. این ماتریس با توجه به توپولوژی سیستم و تعداد گره‌های تزریق صفر و باس‌های اطراف آن تعیین می‌گردد. باید توجه داشت که بدین ترتیب بدون اضافه کردن قید جدید و صرفاً با تغییر در فرم رابطه، اثر گره‌های تزریق صفر اعمال می‌شود.

### ۲-۵-۴- در نظر گرفتن احتمال خروج خط یا خروج PMU

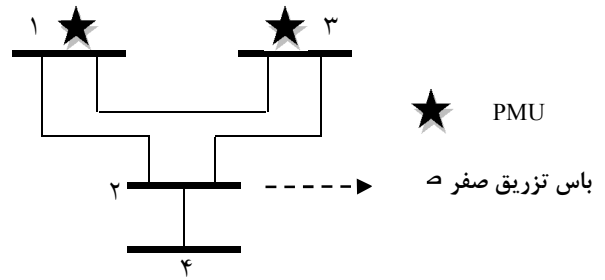
یکی دیگر از مواردی که در جایابی‌ها صورت می‌پذیرد، در نظر گرفتن پیشامد خروج خط یا PMU است که این امر قاعداً تأثیر خود را روی رویت‌پذیری خواهد گذاشت. از طرفی مطلوب این است که سیستم همواره رویت‌پذیر بماند. لذا باید افزونگی هر باس حداقل برابر با ۲ در نظر گرفته شود که بعد از خروج احتمالی خط یا PMU کماکان رویت‌پذیری برقرار بماند. بنابراین رابطه (۲) به فرم رابطه (۶) بازنویسی خواهد شد.

$$RI(i) = \sum_{j=1}^{N_{bus}} A(i, j) x(i, j) \geq 2 \quad (6)$$

### ۳- توزیع بهینه افزونگی

تا اینجا توابع هدف و قیود برای جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری بیان شد. اما تمرکز اصلی مقاله، روی توزیع بهینه افزونگی است. در بسیاری از مقالات یکی از اهداف به کار رفته در بهینه‌سازی، بیشینه کردن افزونگی است که هر چند در اکثر مواقع ما را به سوی جواب بهتر سوق می‌دهد ولی در برخی مواقع که در ادامه اشاره خواهد شد، جایابی‌هایی یافت می‌گردد که اگر چه افزونگی کل آن‌ها کمتر از حالات دیگر است ولی به سبب توزیع بهینه افزونگی، جواب مذکور مناسب‌تر است. در ادامه مختصری در مورد الگوریتم‌های قبلی روی این موضوع توضیح داده خواهد شد. سپس ایرادات آن‌ها بیان خواهد گردید و نهایتاً روش پیشنهادی، ارائه خواهد شد.

شماره ۴ رویت‌ناپذیر است که با توجه به توضیحات بالا رویت‌پذیر خواهد شد و در پی آن کل سیستم رویت‌پذیر می‌گردد. در حالی که در شرایط مشابه و بدون در نظر گرفتن گره تزریق صفر، سیستم نمایش داده شده در شکل (۲)، رویت‌ناپذیر خواهد بود.



شکل (۳): تأثیر گره تزریق صفر روی رویت‌پذیری باس‌ها  
Fig. (3): Impact of zero injection bus on observability

### ۲-۴- مرتبه افزونگی باس

در ادامه مقاله، قراردادی به فرم Red-m در نظر گرفته می‌شود که  $m$  نشانگر میزان افزونگی است. به عنوان مثال اگر افزونگی باسی از باس‌های سیستم، ۲ باشد، یک باس Red-2 نامیده می‌شود.

### ۲-۵-۵- فرمول بندی مساله

#### ۲-۵-۱- فرمول بندی اولیه مساله

در حالت عادی هدف، دستیابی به کمینه تعداد PMU جهت تامین رویت‌پذیری سیستم است. تابع هدف را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\min \sum_{i=1}^{N_{bus}} x(i) \quad (1)$$

$$RI(i) = \sum_{j=1}^{N_{bus}} A(i, j) x(j) \geq 1 ; 1 \leq i, j \leq N_{bus} \quad (2)$$

که  $i$  و  $j$  مبین شماره باس‌ها می‌باشند. پارامتر  $x(i)$  در واقع متغیر حالت به حساب می‌آید بدین نحو که زمانی که PMU روی باسی قرار گیرد، یک در نظر گرفته می‌شود و زمانی که روی آن قرار نگرفته باشد، این مقدار صفر خواهد بود.

پارامتر  $A$  مربوط به ماتریس اتصالات گره‌ها است و مقادیر آن بدین صورت است که زمانی که باس‌های  $i$  و  $j$  به هم متصل‌اند، مقدار یک و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد بود.

پارامتر  $RI$  در واقع همان افزونگی است که در بخش ۲-۲ به آن پرداخته شد. همانطور که قبلاً ذکر گردید، برای رویت‌پذیر بودن سیستم همواره باید برای هر باس افزونگی آن بزرگتر یا مساوی با یک باشد که این موضوع در رابطه (۲) لحاظ شده است. همچنین رابطه (۱) شرط کمینه تعداد واحدهای اندازه‌گیری را ارضا می‌کند. همچنین می‌توان رابطه (۲) را به فرم کلی زیر بیان کرد:

$$A X \geq I \quad (3)$$

که  $I$  ماتریس واحد است.

۳-۱- روش‌های توزیع افزونگی مطرح شده قبلی

همانطور که در مقدمه اشاره شد، در مرجع [۲۵] برای تعادل توزیع افزونگی از الگوریتم جستجوی باینری (BSA<sup>5</sup>) استفاده شده است. این روش شامل یک تابع هدف غیرخطی ناهموار است که توسط روش‌های بهینه‌سازی معمولی قابل حل نیست. همچنین به دلیل پیچیدگی برای سیستم‌های بزرگ قابل استفاده نخواهد بود اما در مرجع [۲۶] الگوریتم به مراتب ساده‌تری ارائه گردیده است که در شکل (۴) نمایش داده شده است. مراحل آن به قرار زیر می‌باشد:

۱- به دست آوردن جایابی اولیه PMU

۲- محاسبه افزونگی هر باس

۳- جایابی PMUها به طریقی که تعداد کل Red-1های سیستم کاسته شود.

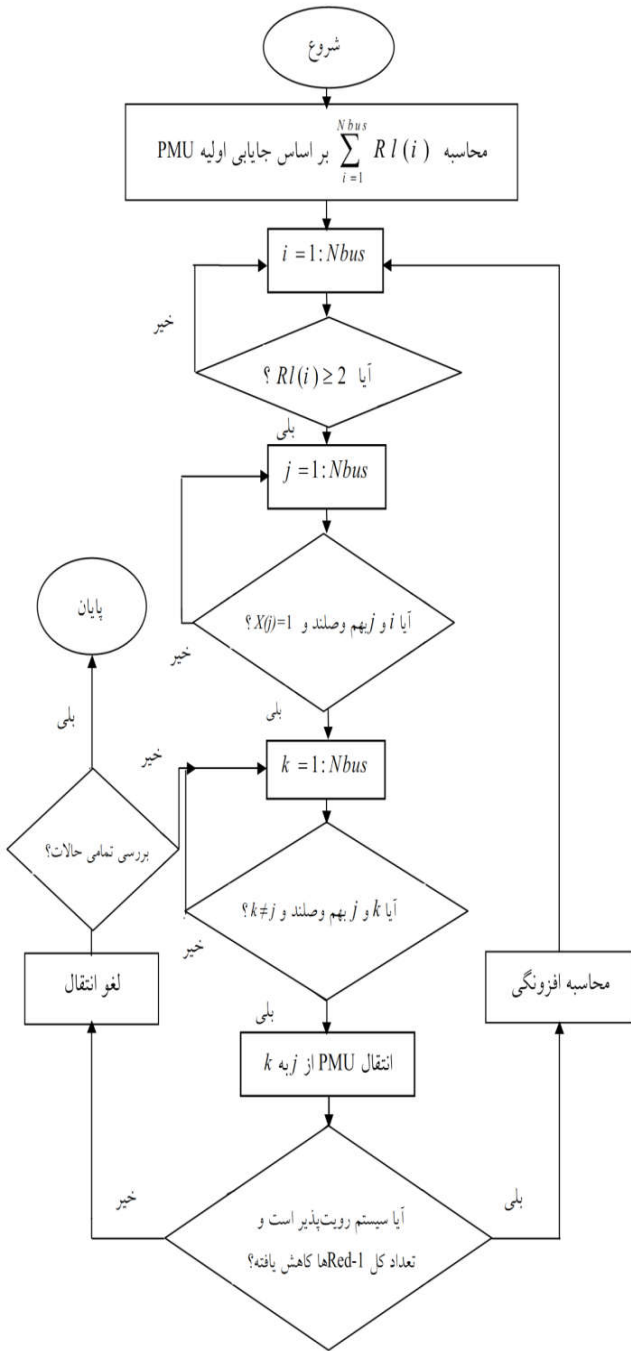
۴- خاتمه الگوریتم زمانی است که با هیچ جایابی شرایط مرحله ۳ ارضا نشود.

اما این روش ایراداتی دارد که به قرار زیر است:

۱- اولین ایراد الگوریتم قائل به ترتیب بودن آن است. از باس شماره ۱ شروع به شمردن نموده و شرایط بررسی می‌شود و با یافتن اولین انتقال که هدف کاهش تعداد افزونگی مرتبه یک را ارضا می‌کند، آن را منظور می‌نماید. در صورتی که ممکن است، انتقال‌های بعدی، شرایط به مراتب بهتری فراهم سازد. فرض کنید در سیستمی دو انتقال فرضی، یکی از باس ۳ به ۴ و دیگری از باس ۵ به ۲، توزیع بهینه افزونگی را ارضا کنند. با توجه به الگوریتم پایه و بحث ترتیب، انتقال از باس ۳ به ۴ صورت می‌پذیرد، در صورتی که ممکن بود اگر ابتدا انتقال از باس ۵ به ۲ صورت می‌گرفت، شرایط بهتری فراهم می‌شد و یا حتی ممکن است با توجه به توپولوژی سیستم، انجام انتقال از باس ۳ به ۴، امکان انتقال از باس ۵ به ۲ را در دوره‌های بعدی الگوریتم، از بین ببرد. پس در ادامه با ارائه روش پیشنهادی سعی می‌شود از عدم رخداد این موضوع اطمینان حاصل گردد.

۲- ایراد دوم این است که این الگوریتم، برای توزیع بهینه افزونگی صرفاً روی کاهش تعداد باس‌ها با افزونگی مرتبه یک تمرکز کرده است. در صورتی که شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که کاهش افزونگی مراتب بالاتر، می‌تواند به پاسخ بهتری منجر شود.

۳- این ایراد در واقع به گونه‌ای از مورد دوم سرچشمه می‌گیرد اما به دلیل اهمیت به صورت جداگانه مطرح می‌شود. در ایراد دوم بیان شد که بررسی انجام انتقال برای مراتب بالاتر، برای دستیابی به جواب بهتر انجام می‌شود. اما اهمیت این موضوع در این است که در برخی موارد، انجام انتقال به منظور کاهش افزونگی مراتب بالاتر، شرایط را برای انجام انتقال جهت کاهش افزونگی مراتب پایین‌تر فراهم می‌کند. در حالی که قبلاً شرایط برای انجام آن مهیا نبود.



شکل (۴): روند نمای روش پایه جهت توزیع بهینه افزونگی اندازه‌گیری‌ها  
Fig. (4): Flowchart of the basic method for optimal distribution of the measurement redundancy

۳-۲- بهبود الگوریتم مرجع [۲۶] و معرفی الگوریتم پیشنهادی

جهت رفع ایراد اول، بدین گونه عمل می‌شود که در هر مرحله، ابتدا تمامی انتقال‌هایی که شرایط را بهبود می‌بخشند، لیست شده و سپس بهترین آن گزینش می‌گردد.

در مورد ایراد دوم، در روش پیشنهادی، کاهش افزونگی‌های مراتب بالاتر هم منظور می‌گردد. منتها ذکر این نکته ضروریست که هدف اصلی، کاهش تعداد افزونگی‌های مراتب پایین‌تر است. به عبارت دیگر زمانی انجام انتقال برای کاهش افزونگی مراتب بالا مجاز است که منجر به

صورت می‌گرفت نه تنها باعث کاهش تعداد کل Red-1ها نمی‌شد بلکه تعداد کل باس‌ها با افزونگی ۲ را هم افزایش می‌داد که این موارد به صورت خلاصه در جدول جدول (۲) آورده شده است. در جدول (۳) به شکل مناسب‌تری حالت‌های شکل (۷) با هم مقایسه شده و روند پیشرفت در هر مرحله مشهود است. لازم به ذکر است که قابلیت اطمینان محاسبه شده در جدول مذکور بر اساس رابطه (۳) صورت پذیرفته است. مطابق این جدول ملاحظه می‌شود که حالت ب نسبت به الف و حالت ج نسبت به حالت ب از نظر قابلیت اطمینان شرایط بهتری را داراست که این نکته نشان‌دهنده کارآرایی بهتر الگوریتم پیشنهادی جهت توزیع بهینه افزونگی است. همچنین در حالت ب جمع کل افزونگی سیستم برابر ۱۳ است ولی در پایان مرحله سوم که جواب نهایی است این مقدار به ۱۲ می‌رسد. جواب نهایی چون دارای گره‌های Red-1 کمتری است، پاسخ بهتری محسوب می‌شود و سیستم قابلیت اعتماد بالاتری دارد اما کاهش جمع کل افزونگی در این حالت، بر این موضوع صحت می‌گذارد که بیشترین بودن مقدار افزونگی کل، همیشه ملاک بهتر بودن پاسخ نیست و توزیع بهینه افزونگی ارجحیت دارد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در بخش‌های قبل، مفاهیم، فرمول‌بندی‌ها و الگوریتم‌های مختلف مورد استفاده در جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری مطرح گشت. الگوریتم‌های ارائه شده قبلی در زمینه توزیع افزونگی بررسی شد و الگوریتم جدید در این زمینه پیشنهاد گردید. در این بخش با پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیشنهادی روی سیستم‌های مرجع IEEE، با کدنویسی در نرم افزار متلب، کارآیی و توانایی روش‌های پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

افزایش افزونگی‌های مراتب پایین‌تر از خود نگردد. به عنوان مثال اگر انتقالی جهت کاهش تعداد باس‌ها با افزونگی ۲ انجام شود، نباید تعداد کل باس‌ها با افزونگی ۱، افزایش پیدا کنند. این مهم در الگوریتم پیشنهادی لحاظ شده است.

نکته دیگر این که در الگوریتم قبلی، شرط خاتمه، عدم وجود انتقالی جهت کاهش تعداد کل باس‌ها با افزونگی ۱ بود اما در روش پیشنهادی الگوریتم ادامه می‌یابد و به بررسی کاهش افزونگی مراتب بعدی می‌پردازد. زمانی که در طی پروسه هر انتقال، کاهش هر مرتبه از افزونگی صورت پذیرفت، به جای بررسی افزونگی مراتب بالاتر، مجدداً از افزونگی ۱ شروع کرده و در صورت عدم وجود انتقال، مجدداً افزونگی مراتب بالاتر بررسی می‌گردد. این روندنما به طور کامل در شکل (۵) آورده شده است.

اکنون مثالی بررسی می‌شود تا توضیحات فوق، ملموس‌تر گردند. شکل (۶)، سیستم ۷ باس را نشان می‌دهد که روی باس‌های ۳، ۴ و ۷ آن PMU قرار گرفته است. این جایابی هم شرط رویت‌پذیری سیستم و هم شرط کمترین تعداد PMU را ارضا کرده است. اکنون هر دو روش الگوریتم پایه و روش پیشنهادی در این مقاله، در جهت توزیع بهینه افزونگی آن به کار گرفته خواهد شد.

در الگوریتم پایه چون هدف فقط کاهش تعداد باس‌ها با افزونگی ۱ است، هیچ انتقالی پیدا نشده و مساله جوابی نخواهد داشت. ولی اگر روش پیشنهادی به کار گرفته شود، اگر چه هیچ انتقالی برای کاهش باس‌های افزونگی ۱ یافت نمی‌گردد اما مطابق شکل (۷-ب) در مرحله اول با انجام انتقال از باس ۷ به باس ۶، ابتدا تعداد کل باس‌ها با افزونگی ۲ کاهش پیدا می‌کند. اکنون در مرحله دوم مطابق شکل (۷-ج) شرایط برای انجام انتقال از باس شماره ۳ به ۱ جهت کاهش Red-1ها فراهم می‌گردد. در صورتی که قبل از انتقال ۷ به ۶ این شرایط مهیا نبود. ذکر این نکته ضروریست که انجام انتقال از ۳ به ۱ اگر قبل از انجام انتقال ۷ به ۶

Table (2): Comparing the transfers obtained by the base and the proposed algorithm for optimal distribution of measurement redundancy

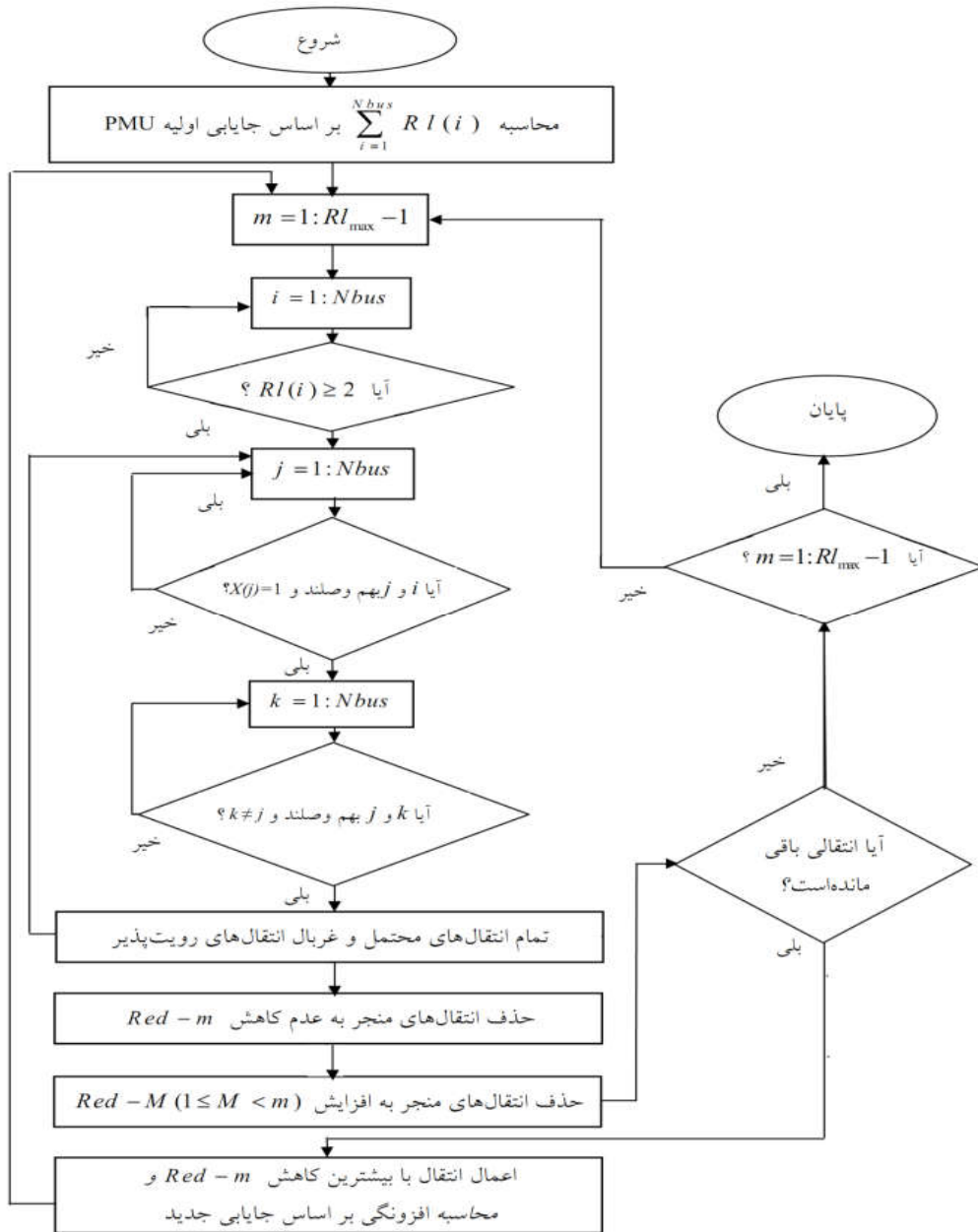
جدول (۲): مقایسه انتقال‌های الگوریتم پایه و الگوریتم پیشنهادی توزیع بهینه افزونگی

الگوریتم اعمالی	انتقال‌های صورت گرفته پس از اعمال الگوریتم
الگوریتم پایه	بدون انتقال
الگوریتم پیشنهادی توزیع بهینه افزونگی	(کاهش تعداد Red-2ها) ۶ → ۷: انتقال اول (کاهش تعداد Red-1ها) ۱ → ۳: انتقال دوم ۱ → ۳: انتقال دوم

Table (3): Reliability and total measurement redundancy after transfers obtained by the proposed optimal redundancy distribution algorithm

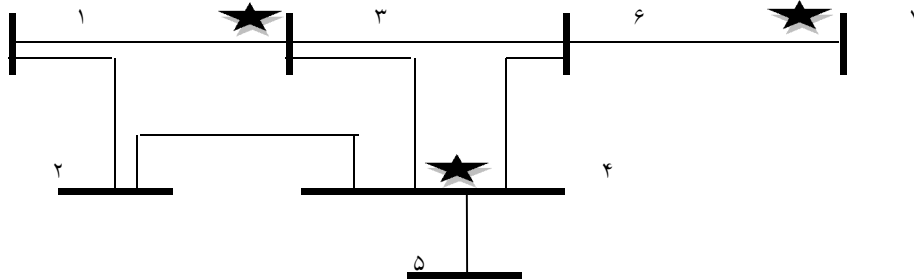
جدول (۳): قابلیت اطمینان و افزونگی کل اندازه‌گیری‌ها بعد از انتقال‌های الگوریتم پیشنهادی توزیع بهینه افزونگی

	الف	ب	ج
$RI(i)$	[۱ ۱۲ ۲۱ ۳ ۱]	[۱ ۱۳ ۳۱ ۳ ۱]	[۱ ۲۲ ۲۱ ۳ ۱]
$\sum_{i=1}^{N_{bus}} RI(i)$	۱۱	۱۳	۱۲
$R$	۸۱,۳	۸۱,۴۲	۸۵,۹



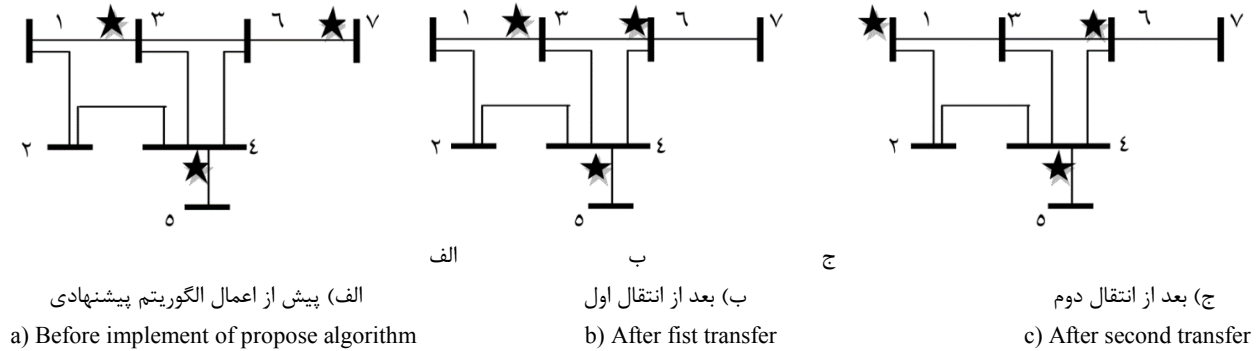
شکل (۵): روندنمای روش پیشنهادی جهت توزیع بهینه افزونگی اندازه‌گیری‌ها

Fig. (5): Flowchart of the proposed method for optimal distribution of the measurement redundancy



شکل (۶): جایابی PMU در سیستم ۷ باس قبل از اعمال الگوریتم‌های توزیع افزونگی

Fig. (6): Placement of PMU before applying the redundancy distribution algorithms 7-bus system



شکل (۷): انتقال‌ها بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی جهت توزیع بهینه افزونگی اندازه‌گیری

Fig. (7): Transfers after implementation the proposed algorithm for the optimal distribution of the measurement redundancy

#### ۴-۳- جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در حضور گره‌های

##### توزریق صفر

بحث بعدی در مورد در نظر گرفتن اثر گره‌های توزریق صفر در جایابی واحدهای اندازه‌گیری است. همانطور که در بخش ۲-۳ اشاره گردید، گره توزریق صفر گره ای است که نه به بار متصل باشد و نه به ژنراتور. پس با توجه به داده‌های سیستم‌های مرجع IEEE ارائه شده در مرجع [۲۸]، شماره این نوع گره‌ها در جدول (۶) مشخص می‌گردد. با توجه به شماره‌ی این نوع گره‌ها، شبیه‌سازی انجام شده و جایابی جدیدی به دست آمده که مطابق با جدول (۷) می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، تعداد PMUهای مورد نیاز نسبت به حالت قبلی کمتر شده است.

#### ۴-۴- اعمال الگوریتم پیشنهادی توزیع بهینه افزونگی به جایابی

##### واحدها در حضور گره‌های توزریق صفر

در مرجع [۲۶] جایابی واحدها در حضور گره‌های توزریق صفر آورده شده اما الگوریتم‌های توزیع افزونگی به آن اعمال نگردیده‌است. در این بخش، نتایج شبیه‌سازی‌ها در این حالت ارائه خواهد شد. همانطور که قبلاً اشاره گردید، در نظر گرفتن اثر گره‌های توزریق صفر، منجر به کاهش تعداد PMUهای مورد نیاز جهت تامین رویت‌پذیری سیستم می‌شود که از جنبه‌ی اقتصادی بسیار مفید می‌باشد. اما از طرفی این کاهش، میزان انتقال‌های ممکن جهت توزیع بهینه افزونگی را محدودتر کرده و طبیعی است که به نسبت حالت قبل، انتقال‌های کمتری موجود باشد. با این وجود در سیستم ۳۰- باس مطابق جدول (۸) مشاهده می‌شود که با انجام دو انتقال، دو واحد از Red-1های کل سیستم کم می‌شود.

از سوی دیگر با توجه به تغییر جایابی‌ها در حضور گره‌های توزریق صفر که در بخش قبل مشاهده شد، ممکن است انتقال‌های قبلی صادق نباشد. به عنوان مثال در بخش ۴-۲ که هنوز اثر گره‌های توزریق صفر منظور نگردیده بود، انتقال از باس ۴ به باس ۳ باعث بهتر شدن جواب می‌شد. اما اکنون این انتقال باعث افزایش تعداد کل باس‌ها با افزونگی ۱ خواهد شد که انتقالی نامناسب برای سیستم است. اما از طرف دیگر کماکان انتقال از باس ۱۸ به باس ۱۹ جز جواب‌های مطلوب به حساب می‌آید. همچنین یک نکته جالب در مورد سیستم ۱۱۸- باس که در جدول (۵) ملاحظه گردید، این که انتقال از باس ۲۰ به ۲۱ باعث بهتر شدن وضعیت می‌گردد

#### ۴-۱- جایابی اولیه PMU در حالت عادی

در ابتدای امر یادآوری می‌شود که منظور از حالت عادی این است که خروج خط یا PMU و همین‌طور اثر گره‌های توزریق صفر لحاظ نمی‌شود. بنابراین جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در شرایط عادی با هدف دستیابی به کمینه تعداد PMUها، مطابق روابطی که در بخش‌های قبل بحث شد، انجام می‌گیرد. در جدول (۴) ملاحظه می‌شود که برای هر کدام از سیستم‌های مرجع، تعداد PMU مورد نیاز و مکان نصب آنها و همچنین جمع کل افزونگی اندازه‌گیری‌ها پیش از اعمال الگوریتم‌های توزیع بهینه، چه میزان خواهد بود [۲۶]. در بخش‌های بعدی مشاهده خواهد شد که به فراخور هر الگوریتم این جایابی‌ها دستخوش تغییر می‌گردند.

#### ۴-۲- اعمال الگوریتم‌های توزیع افزونگی به جایابی واحدهای

##### اندازه‌گیری فازوری

در جهت توزیع هر چه بهتر افزونگی بین باس‌های سیستم، الگوریتم پایه و همچنین الگوریتم پیشنهادی بیان شد. اکنون به جایابی‌های به دست آمده در شرایط عادی، هر دو الگوریتم اعمال و نتایج مقایسه می‌گردد. همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود بدون اضافه کردن PMU و صرفاً با جابجایی PMU بین باس‌ها، تعداد واحدهای با افزونگی مراتب کمتر در هر مرحله جابجایی کاسته می‌شود. در مقایسه روش پایه با روش پیشنهادی در بخش ۳-۲-۴ به انتقال جدیدی در سیستم ۳۰ باسه، جهت کاهش تعداد کل افزونگی‌های مرتبه ۲ دست یافته می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم اندازه‌گیری را نسبت به الگوریتم پایه بهبود می‌بخشد. این در حالی است که در الگوریتم پایه به بررسی کاهش مراتب افزونگی مراتب ۲ و بالاتر پرداخته نشده است. توضیح بیشتر آن که با توجه ایرادات مطرح شده در بخش ۳-۱ از قبیل ساختار قائل به ترتیب بودن الگوریتم پایه و همچنین صرفاً بررسی افزونگی مرتبه یک و عدم توجه به سایر افزونگی‌های مراتب پایین‌تر، امکان از دست رفتن جواب‌های بهینه وجود دارد. هر چند ممکن است در برخی موارد جواب‌های هر دو الگوریتم یکسان باشند اما با توجه به رفع آن‌ها در الگوریتم پیشنهادی، امکان از دست رفتن جواب‌های بهینه در مورد توزیع بهینه افزونگی به صفر خواهد رسید. لازم به ذکر است که منظور از جواب‌های بهینه، مناسب‌ترین جایابی‌های PMU بر روی باس‌های سیستم در راستای توزیع هر چه بهتر افزونگی اندازه‌گیری سیستم به کمک کاستن افزونگی‌های مراتب پایین است.



از سوی دیگر اثر گره‌های تزریق صفر مورد بحث قرار گرفت که ضمن کاهش تعداد PMUهای مورد نیاز جهت رویت‌پذیر نمودن سیستم، منجر به افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد. در پایان نتایج شبیه‌سازی‌های عددی بر روی سیستم‌های قدرت استاندارد IEEE ارائه شده که نشان دهنده کارآیی بهتر روش پیشنهادی نسبت به روش‌های ارائه شده پیشین است.

ولی در جدول (۶) مشاهده شد، زمانی که گره تزریق صفر منظور گردید، این جایابی به صورت اتفاقی، بدون اعمال الگوریتم توزیع بهینه افزونگی صورت پذیرفته است. با همه این توضیحات، نتایج جایابی قبل و بعد از اعمال الگوریتم مطابق جدول (۸) خواهد بود که بهبود قابلیت اطمینان را برای سیستم ۳۰- باسه نشان می‌دهد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در اغلب مقالات منتشر شده قبلی که به بحث افزونگی در اندازه‌گیری‌ها می‌پردازند، هدف بیشینه نمودن افزونگی است. در حالی که در این مقاله ملاحظه شد که توزیع بهینه افزونگی اندازه‌گیری‌ها در افزایش قابلیت اطمینان سیستم موثرتر خواهد بود. همچنین مشاهده شد که روش پیشنهادی در این مقاله نسبت به سایر الگوریتم‌های مطرح شده قبلی، به سبب رفع ایرادات و بررسی سایر مراتب افزونگی کارآمدتر است و امکان از دست رفتن جواب‌های بهینه نسبت به الگوریتم‌های قبلی مطرح شده، به صفر خواهد رسید.

### پی‌نوشت:

1. Phasor Measurement Unit
2. Optimal PMU Placement
3. Phasor Data Concentrator
4. Geographic Information System
5. Binary Search Algorithm

Table (4): Placement of PMUs before implementation of the redundancy distribution algorithms

جدول (۴): جایابی PMU ها قبل از اعمال الگوریتم‌های توزیع افزونگی

سیستم تست IEEE	تعداد PMU مورد نیاز	جمع کل افزونگی	مکان قرارگیری PMU
۱۴- باس	۴	۱۹	۲،۶،۷،۹
۳۰- باس	۱۰	۵۲	۲،۴،۶،۹،۱۰،۱۲،۱۵،۱۸،۲۵،۲۷
۵۷- باس	۱۷	۷۲	۱،۴،۶،۹،۱۵،۲۰،۲۴،۲۸،۳۱،۳۲،۳۶،۳۸،۳۹،۴۱،۴۶،۵۰،۵۳
۱۱۸- باس	۳۲	۱۶۴	۳،۵،۹،۱۲،۱۵،۱۷،۲۰،۲۳،۲۸،۳۰،۳۴،۳۷،۴۰،۴۵،۴۹،۵۲،۵۶،۶۲،۶۴،۶۸،۷۱،۷۵،۷۷،۸۰،۸۵،۸۶،۹۰،۹۴،۱۰۱،۱۰۵،۱۱۰

Table (5): Comparing the results of the baseand the proposed algorithm for redundancy distribution

جدول (۵): مقایسه نتایج اعمال الگوریتم پایه و الگوریتم پیشنهادی توزیع افزونگی

سیستم تست IEEE	قبل از انجام انتقال		الگوریتم پایه		الگوریتم پیشنهادی			
	تعداد گره‌های تزریق صفر	قابلیت اطمینان	انتقال‌های صورت گرفته جهت توزیع بهینه افزونگی	تعداد گره‌های تزریق صفر	قابلیت اطمینان	انتقال‌های صورت گرفته جهت توزیع بهینه افزونگی	تعداد گره‌های تزریق صفر	قابلیت اطمینان
۱۴- باس	۱۹	۰،۵۹۴۲	-	۱۹	۰،۵۹۴۲	-	۱۹	۰،۵۹۴۲
۳۰- باس	۵۲	۰،۳۹۲۰	۴→۳ ، ۱۸→۱۹	۵۰	۰،۴۲۹۱	۴→۳ ، ۱۸→۱۹ ، ۳→۱	۵۰	۰،۴۳۰۱
۵۷- باس	۷۲	۰،۱۰۶۶	۳۹→۵۷	۷۲	۰،۱۱۱۷	۳۹→۵۷	۷۲	۰،۱۱۱۷
۱۱۸- باس	۱۶۴	۰،۰۱۵۳	۲۰→۲۱	۱۶۴	۰،۰۱۶۰	۲۰→۲۱	۱۶۴	۰،۰۱۶۰

Table (6): Specifications of zero injection buses in IEEE test systems

جدول (۶): مشخصات گره‌های تزریق صفر در شبکه مرجع IEEE

سیستم تست IEEE	تعداد شاخه‌ها	تعداد گره‌های تزریق صفر	شماره باس‌های گره تزریق صفر
۱۴- باس	۲۰	۱	۷
۳۰- باس	۴۱	۶	۶،۹،۲۲،۲۵،۲۷،۲۸
۵۷- باس	۷۸	۱۵	۴،۷،۱۱،۲۱،۲۲،۲۴،۲۶،۳۴،۳۶،۳۷،۳۹،۴۰،۴۵،۴۶،۴۸
۱۱۸- باس	۱۷۹	۱۰	۵،۹،۳۰،۳۷،۳۸،۶۳،۶۴،۶۸،۷۱،۸۱

Table (7): Number of PMUs required before and after considering the effect of zero injection buses  
جدول (۷): تعداد PMUهای مورد نیاز قبل و بعد از در نظر گرفتن اثر باس‌های تزریق صفر

سیستم تست IEEE	تعداد PMUها قبل از در نظر گرفتن گره‌های تزریق صفر	تعداد PMUها بعد از در نظر گرفتن گره‌های تزریق صفر	جمع کل افزونگی‌ها	مکان‌های قرار گیری PMUها
۱۴- باس	۴	۳	۱۶	۲,۶,۹
۳۰- باس	۱۰	۷	۳۲	۲,۴,۱۰,۱۲,۱۸,۲۳,۲۷
۵۷- باس	۱۷	۱۳	۷۲	۱,۴,۱۰,۱۴,۲۰,۲۴,۲۹,۳۰,۳۲,۳۶,۴۹,۵۴,۵۶
۱۱۸- باس	۳۲	۲۸	۱۵۱	۳,۸,۱۲,۱۵,۱۷,۲۱,۲۷,۳۱,۳۲,۳۴,۴۰,۴۵,۴۹,۵۳,۵۶,۶۲,۶۵, ۷۰,۷۵,۷۷,۸۵,۸۶,۸۹,۹۲,۹۳,۱۰۰,۱۰۵,۱۱۰

Table (8): System reliability before and after the implementation of the proposed measurement redundancy distribution algorithm in the presence of zero injection buses  
جدول (۸): قابلیت اطمینان سیستم قبل و بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی توزیع افزونگی اندازه‌گیری‌ها در حضور گره‌های تزریق صفر

سیستم تست IEEE	قابلیت اطمینان قبل از انجام انتقالها	الگوریتم پیشنهادی	
		انتقالها	قابلیت اطمینان
۱۴- باس	۰,۵۳۷۷	-	۰,۵۳۷۷
۳۰- باس	۰,۲۷۵۸	۲۳→۲۴, ۱۸→۱۹	۰,۳۰۳۵
۵۷- باس	۰,۰۶۸۵	-	۰,۰۶۸۵

### References

- [1] B. Xu, A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 943-946, New York, NY, USA, Oct. 2004.
- [2] A. G. Phadke, J. S. Thorp, Synchronized phasor measurements and their applications. Springer, 2008.
- [3] B. Mohammadi-Ivatloo, S. Hosseini, "Optimal PMU placement for power system observability considering secondary voltage control", Proceeding of the IEEE/CCECE, pp. 000365-000368, Niagara Falls, ON, Canada, May 2008.
- [4] A.A. Saleh, A.S. Adail, A.A. Wadoud, "Optimal phasor measurement units placement for full observability of power system using improved particle swarm optimisation", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 11, No. 7, pp. 1794-1800, June 2017.
- [5] I. Kamwa, J. Beland, G. Trudel, R. Grondin, C. Lafond, D. McNabb, "Wide-area monitoring and control at hydro-Québec: Past, present and future", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 12-24, Montreal, Que., Canada, June 2006.
- [6] I. Kamwa, R. Grondin, Y. Hébert, "Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems-a decentralized/hierarchical approach", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pp. 136-153, Feb. 2001.
- [7] Y.H. Lin, C.W. Liu, C.S. Chen, "A new PMU-based fault detection/location technique for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination-part I: theory and algorithms", IEEE Trans. on power delivery, Vol. 19, No. 4, pp. 1587-1593, Oct. 2004.
- [8] C.W. Liu, J.S. Thorp, "New methods for computing power system dynamic response for real-time transient stability prediction", IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 47, No. 3, pp. 324-337, Mar. 2000.
- [9] S. Skok, I. Ivankovic, Z. Cerina, "Applications based on PMU technology for improved power system utilization", Proceeding of IEEE/PES, pp. 1-8, Tampa, FL, USA, June 2007.
- [10] Y.J. Wang, C.W. Liu, Y.H. Liu, "A PMU based special protection scheme: a case study of Taiwan power system", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 27, No. 3, pp. 215-223, Mar. 2005.
- [11] J.D. La Ree, V. Centeno, J.S. Thorp, A.G. Phadke, "Synchronized phasor measurement applications in power systems", IEEE Trans. on smart grid, Vol. 1, No. 1, pp. 20-27, June 2010.
- [12] F.J. Marin, F. Garcia-Lagos, G. Joya, F. Sandoval, "Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks", Electronics Letters, Vol. 39, No. 19, pp. 1403-1405, Sep. 2003.
- [13] F. Haghghatdar Fesharaki, R.A. Hooshmand, A. Khodabakhshian, "Simultaneous optimal design of measurement and communication infrastructures in hierarchical structured WAMS", IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 5, No. 1, pp. 312-319, Jan. 2014.
- [14] B. Milosevic, M. Begovic, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 69-75, Feb. 2003.

- [15] B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal placement of PMUs for power system observability using topology based formulated algorithms", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 9, No. 13, pp. 2463-2468, Dec. 2009.
- [16] P.P. Bedekar, S.R. Bhide, V.S. Kale, "Optimum PMU placement considering one line/one PMU outage and maximum Redundancy using Genetic algorithm", *Proceeding of IEEE/Electrical Engineering/ECTICON*, pp. 688-691, May 2011.
- [17] Z.H. Rather, Z. Chen, P. Thøgersen, P. Lund, B. Kirby, "Realistic approach for phasor measurement unit placement: consideration of practical hidden costs", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 30, No. 1, pp. 3-15, Feb. 2015.
- [18] D. Ghosh, T. Ghose, D.K. Mohanta, "Communication feasibility analysis for smart grid with phasor measurement units", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, Vol. 9, No. 3, pp. 1486-1496, Aug. 2013.
- [19] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Safdarian, M. Shahidehpour, "Observability of hybrid AC/DC power systems with variable-cost PMUs", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 29, No. 1, pp. 345-352, Feb. 2014.
- [20] S. Teimourzadeh, F. Aminifar, M. Shahidehpour, "Contingency-constrained optimal placement of micro-PMUs and smart meters in microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 10, No. 2, pp. 1888-1897, March 2019.
- [21] Y. Wang, C. Wang, W. Li, J. Li, F. Lin, "Reliability-based incremental PMU placement", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 29, No. 6, pp. 2744-2752, Nov. 2014.
- [22] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, A. Safdarian, "Impact of WAMS malfunction on power system reliability assessment", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 3, No. 3, pp. 1302-1309, Sep. 2012.
- [23] S. Soman, S. Dambhare, D. Dua, R. Gajbhiye, "Optimal zero injection considerations in PMU placement: An ILP approach", *Proceeding of PSCC*, Jan. 2008.
- [24] N.H. Abbasy, H.M. Ismail, "A unified approach for the optimal PMU location for power system state estimation", *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 806-813, May 2009.
- [25] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, "Optimal placement of phasor measurement units for power system observability", *IEEE Trans. on power systems*, Vol. 23, No. 3, pp. 1433-1440, Aug. 2008.
- [26] N. Xia, H.B. Gooi, S. Chen, M. Wang, "Redundancy based PMU placement in state estimation", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol. 2, pp. 23-31, June 2015.
- [27] D. Dua, S. Dambhare, R.K. Gajbhiye, S. Soman, "Optimal multistage scheduling of PMU placement: An ILP approach", *IEEE Transactions on Power delivery*, Vol. 23, No. 4, pp. 1812-1820, Oct. 2008.
- [28] Available on line: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

