

مکان‌یابی چندمرحله‌ای دینامیکی واحدهای اندازه‌گیر فازوری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی

خفاش

سید احسان رضوی اسفلی^۱ و حمید فلقی^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

erazavi@birjand.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

falaghi@birjand.ac.ir

چکیده: بهره‌گیری از واحدهای اندازه‌گیری فازوری در سال‌های اخیر به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های نظارت، کنترل و حفاظت سیستم‌های قدرت مورد توجه قرار گرفته است. در عمل، از آنجاکه سیستم‌های قدرت واقعی دارای تعداد زیادی شین هستند، محدودیت اقتصادی و فنی مانع نصب تمام این واحدهای اندازه‌گیر در مدت زمان کوتاهی می‌شوند؛ از این‌رو نصب واحدهای فازوری به صورت چندمرحله‌ای انجام می‌شود. در این مقاله به منظور افزایش مشاهده‌پذیری در طول افق برنامه‌ریزی یک روش دینامیکی چندمرحله‌ای با معرفی یک شاخص جدید ارائه شده است. در روش پیشنهادی برخلاف روش‌های مرسوم، مکان‌یابی واحدهای فازوری برای هر مرحله وابسته به مراحل قبل و بعد از آن است که نتیجه آن افزایش فضای جستجو و نهایتاً تحویل پاسخ بهینه مسئله است. همچنین، در این رهیافت، مکان‌یابی برای تمامی مراحل میانی در قالب یک فرآیند بهینه‌سازی صورت می‌پذیرد. همچنین، در این مطالعه به منظور در نظر گرفتن جنبه‌های عملی مسئله، محدودیت کانال‌های اندازه‌گیری و مخبراتی واحدهای اندازه‌گیری فازوری پوشش داده شده است. با توجه به پیچیدگی مدل پیشنهادی نسبت مدل‌های مرسوم، به منظور بهینه‌سازی مسئله از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش استفاده شده است. در پایان روش پیشنهادی برای مکان‌یابی چندمرحله‌ای در چندین شبکه نمونه و نیز شبکه انتقال سراسری 230 kv و 400 kv ایران استفاده و با مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج روش‌های مکان‌یابی چندمرحله‌ای موجود کارایی مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی خفاش، برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای دینامیکی، مشاهده‌پذیری سیستم قدرت، مکان‌یابی بهینه، واحد اندازه‌گیر فازوری

۱- مقدمه

که شامل اطلاعات ولتاژ شین، توان اکتیو و راکتیو هستند، فازور ولتاژ شین‌های شبکه را تخمین می‌زنند. تا چندی پیش اطلاعات دستگاه‌های اندازه‌گیر تنها از طریق سیستم کنترل نظارتی و تحلیل اطلاعات^۱ (SCADA) که اطلاعاتش را توسط پایانه‌های راه دور^۲ (RTUs) جمع‌آوری می‌کنند، قابل دسترسی بودند. با ظهور سیستم موقعیت‌یاب جهانی^۳ (GPS)، دستگاه‌های اندازه‌گیری قادر به مخابره همزمان اطلاعات شدند [۱]. به تازگی سیستم دیگری به نام نظارت، حفاظت و کنترل گسترده سیستم^۴ (WAMPC) مطرح شده است که هدف آن جبران کاستی‌های موجود در سیستم کنترل نظارتی و تحلیل اطلاعات بوده است. واحدهای اندازه‌گیر فازوری^۵ (PMU) یکی از اجزای

امروزه در مدیریت سیستم‌های قدرت دستیابی به پایگاه اطلاعاتی کامل، دقیق و نامتناقض به عنوان ورودی به همه مراکز کنترل به صورت همزمان یک عامل کلیدی محسوب می‌شود. تخمین‌گرهای حالت مرسوم با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری

* تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱۰

نام نویسنده مسؤول: حمید فلقی

نشانی نویسنده مسؤول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

اصلی این سیستم به شمار می‌روند. این تجهیز از یک سیگنال همزمان کننده که غالباً توسط سیستم موقعیت‌یاب جهانی ارسال می‌شود، استفاده می‌کند [۲]. از طرفی، واحدهای اندازه‌گیر فازوری عموماً دارای چندین دستگاه اندازه‌گیری در قالب کانال‌های اندازه‌گیری و مخابراتی هستند. [۳] لذا هزینه این تجهیز در مقایسه با اندازه‌گیرهای سنتی بالاتر است. به این ترتیب، تعیین مکان و بهینه‌سازی تعداد این تجهیز در سیستم قدرت به منظور مشاهده‌پذیری کامل شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تاکنون تحقیقات متنوعی در رابطه با مسأله مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیر فازوری به منظور بهبود عملکرد سیستم قدرت انجام گرفته است. بررسی مشاهده‌پذیری کامل شبکه در [۳-۹] بررسی شده است. در [۹-۱۲] مکان‌یابی در حضور احتمال وقوع پیشامد خروج یک خط صورت گرفته است. احتمال خرابی یک واحد اندازه‌گیر فازوری در [۱۲] و [۱۳] در نظر گرفته شده است. همچنین، در [۱۴] و [۱۵] مکان‌یابی این واحدها به منظور تخمین حالت سیستم قدرت انجام گرفته است. از طرفی، به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر در مسأله مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیر فازوری، ابزارهای بهینه‌سازی مختلفی مورد استفاده محققان قرار گرفته است. برای نمونه در [۷-۱۱] سعی شده است که مبتنی بر برنامه‌ریزی اعداد صحیح، مسأله مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیر فازوری فرموله‌بندی و حل شود. به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک [۶] و الگوریتم جستجوی تابو [۴] نمونه‌های دیگری از تلاش‌های انجام شده برای حل مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری برای دستیابی به پاسخ بهینه است.

در مسأله جایابی واحدهای اندازه‌گیر فازوری، طراحان سیستم قدرت و محققان با محدودیت‌های گوناگونی روبه‌رو هستند که از مهمترین آنها می‌توان به محدودیت‌های اقتصادی و ملاحظات فنی اشاره کرد. در عمل یک سیستم قدرت واقعی آن قدر بزرگ است که هزینه واحدهای فازوری مورد نیاز برای مشاهده‌پذیر ساختن شبکه قابل ملاحظه است. از این رو، نصب واحدهای فازوری مورد نظر طی افق برنامه‌ریزی چند ساله در قالب چند مرحله زمانی به اجرا گذاشته می‌شود [۱۶]. تحقیقات انجام شده در زمینه مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای اندازه‌گیر فازوری نیز با اهداف گوناگونی دنبال شده است که افزایش مشاهده‌پذیری در طی مراحل برنامه‌ریزی [۱۶]، افزایش

مشاهده‌پذیری خطوط ارتباطی شبکه انتقال^۶ و اولویت نصب واحدهای فازور در محل‌های کم تراکم^۷ [۱۷] و [۱۸] نمونه‌هایی از این مطالعات هستند. در [۱۹] مکان‌یابی احتمالی چندمرحله‌ای با توجه به توسعه شبکه مورد توجه قرار گرفته است. در [۱۷] با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی^۸ (AHP) و ارائه یک مدل خطی، سعی شده است که شاخص‌های مرتبط با مشاهده‌پذیری خطوط ارتباطی شبکه انتقال، مشاهده‌پذیری ولتاژ شین و مشاهده‌پذیری ناحیه کنترل ولتاژ بهبود یابند. در [۱۶] روشی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است که برای هر مرحله از افق برنامه‌ریزی مشاهده‌پذیری سیستم به صورت مجزا و بدون در نظر گرفتن مراحل افزایش می‌یابد؛ فرآیند بهینه‌سازی مذکور به ازای هر مرحله یکبار تکرار می‌گردد. روش مکان‌یابی چندمرحله‌ای فوق در مطالعات دیگری همچون [۱۹] و [۲۰] استفاده شده است.

در این مقاله، با معرفی یک شاخص جدید، روش نوینی ارائه شده است که در آن سعی می‌شود به منظور افزایش مشاهده‌پذیری سیستم در طول افق برنامه‌ریزی، مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای اندازه‌گیر فازوری به صورت دینامیکی انجام پذیرد. در روش پیشنهادی، ابتدا مکان‌های کاندیدای نصب واحدهای اندازه‌گیر فازوری برای مرحله زمانی انتها انتخاب می‌شوند. سپس برای مراحل میانی (مرحله اول تا مرحله ماقبل آخر) به صورت همزمان مکان‌یابی انجام می‌شوند؛ بدین ترتیب مکان‌یابی برای هر مرحله با در نظر گرفتن شرایط مراحل قبل و بعد صورت می‌پذیرد. با توجه به پیچیدگی مدل مسأله، از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش برای حل مدل پیشنهادی استفاده شده است.

۲- مفهوم مشاهده‌پذیری سیستم و تعریف مسأله

مکان‌یابی چندمرحله‌ای

۲-۱- مفهوم مشاهده‌پذیری سیستم قدرت

مطالعات مشاهده‌پذیری با طراحی تخمین‌گرها ارتباط نزدیکی دارد. یکی از روش‌های ساده و البته بسیار مهم برای طراحی تخمین‌گرهایی که بتوان متغیرهای حالت یک سیستم را تخمین زد، استفاده از اطلاعات ورودی و خروجی آن سیستم است [۱۴]. مفهوم مشاهده‌پذیری در تئوری کنترل را می‌توان به

$$\sum_{j \in I} a_{ij} x_j \geq 1, \text{ for } i \in I \quad (2)$$

که در آن x_j متغیر تصمیم دودویی است که یک بودن آن بیانگر حضور واحد اندازه‌گیر فازوری و صفر بودن آن به معنی عدم حضور واحد در شین i است. a_{ij} درایه‌ای متعلق به ماتریس مجاورت شبکه است؛ به این معنی که چنانچه مقدار آن برابر با یک باشد، شین‌های i و j به هم متصل‌اند؛ در غیر این صورت خط یا خطوطی شین‌های i و j را به هم متصل نکرده است. در رابطه (۲)، I مجموعه شین‌های شبکه را شامل می‌شود.

ب) مکان‌یابی مرسوم چندمرحله‌ای واحدهای فازوری

از آنجایی که هزینه واحدهایی فازوری مورد نیاز برای یک شبکه بزرگ مقیاس برای مشاهده‌پذیری کامل آن شبکه، قابل ملاحظه بوده و همچنین، به دلیل ملاحظات فنی، امکان نصب همه واحدهای اندازه‌گیر فازوری در یک بازه زمانی کوتاه میسر نیست. لذا معمولاً شرکت‌های برق به تدریج و در طی چندین مرحله زمانی به نصب این واحدها اقدام می‌نمایند. در اصل می‌توان بیان نمود هدف اصلی بهره‌گیری از واحدهای اندازه‌گیر فازوری در سیستم قدرت، مشاهده حالت سیستم و رصد تمامی اغتشاشات شبکه توسط بهره‌برداران است. بدین ترتیب، واضح است که عدم مشاهده‌پذیری خطوط و شین‌های یک سیستم که عدم مشاهده اغتشاشات شبکه را به دنبال دارد، می‌تواند متحمل هزینه‌های قابل توجهی شود [۲] و [۲۲]. از این‌رو، مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای اندازه‌گیر فازوری عموماً به منظور کمینه‌سازی مشاهده‌ناپذیری در هر مرحله از طراحی انجام می‌شود. در اینجا ذکر این نکته ضروری است که در مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای اندازه‌گیر فازوری، هدف کاهش تعداد این تجهیزات نیست؛ بلکه با مشخص بودن تعداد و مکان‌های این تجهیزات در افق نهایی برنامه‌ریزی (مرحله آخر) سعی در کاهش نامشاهده‌پذیری سیستم و هزینه‌های ناشی از آن می‌شود. البته، در برخی موارد در کنار این هدف اصلی، اهداف دیگری نیز دنبال شده است [۱۷]. در اینجا توجه به این نکته ضروری است که عموماً مکان‌یابی برای مرحله آخر برنامه‌ریزی به چندین پاسخ بهینه از لحاظ تعداد واحد اندازه‌گیری ختم می‌شود؛ اما در نهایت پاسخی به‌عنوان پاسخ بهینه انتخاب

صورت کیفیت اندازه‌گیری حالات داخلی یک سیستم با استنباط از دانش حالات خارجی آن سیستم بیان کرد [۲۱]. عموماً به دلیل سادگی، مشاهده‌پذیری سیستم‌های قدرت با استفاده از روش توپولوژیک صورت می‌گیرد [۲] که برای ارزیابی آن طبق این روش از قوانین زیر استفاده می‌شود:

▪ قانون اول: یک واحد اندازه‌گیر فازوری می‌تواند فازور ولتاژ شین محل نصب شده‌اش را اندازه بگیرد.

▪ قانون دوم: واحد اندازه‌گیر فازوری توانایی اندازه‌گیری فازور جریان تمام خطوط متصل شده به شینی را که در آن قرار گرفته است، دارد. در این صورت، با مشخص بودن امپدانس خطوط، فازور ولتاژ شین‌های مجاور نیز با استفاده از قانون اهم قابل محاسبه است.

توجه به این نکته ضروری است که دو قانون فوق با این فرض بیان شده‌اند که یک واحد اندازه‌گیری فازوری شامل تعداد کافی کانال اندازه‌گیری و مخابراتی باشد، اما در عمل واحدهای اندازه‌گیری فازوری دارای محدودیت‌های مخابراتی و کانال‌های اندازه‌گیری است. در چنین شرایطی، یک واحد اندازه‌گیری فازوری تنها قادر است به تعداد کانال‌های اندازه‌گیری از پیش تعیین شده خود شین‌های یک سیستم را به صورت مستقیم مشاهده‌پذیر سازد.

▪ قانون سوم: چنانچه ولتاژ دو شین مجاور مشخص باشد، فازور جریان خط (یا خطوط) ارتباطی بین این دو شین نیز با استفاده از قانون اهم قابل محاسبه است.

▪ قانون چهارم: چنانچه از میان یک شین توان تزریق صفر و شین‌های مجاور همگی بجز یکی مشاهده‌پذیر باشند، شین مشاهده‌ناپذیر با استفاده از قانون جریان کیرشهف (KCL) به صورت غیر مستقیم مشاهده‌پذیر می‌گردد.

۲-۲- مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری

الف) مکان‌یابی بهینه واحدهای فازوری

تابع هدف مرسوم در مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری به صورت روابط (۱) و (۲) فرمول‌بندی می‌شود.

$$\min C = \sum_{j \in I} x_j \quad (1)$$

Subject to:

\tilde{S}^M شین‌های کاندیدا برای نصب واحدهای اندازه‌گیر فازوری جهت مشاهده‌پذیری کامل شبکه و همچنین در رابطه (۶)، n^j تعداد واحدهای اندازه‌گیر فازوری قابل نصب در هر مرحله را نشان می‌دهد. مجموعه S^k نیز بیانگر مکان‌های نصب واحدهای فازوری در مرحله k است.

بدیهی است که به منظور در نظر گرفتن اثر شین‌های توان تزریق صفر دیگر نمی‌توان از رابطه (۴) بهره جست، چراکه این رابطه تنها سه قانون اول مشاهده‌پذیری را پوشش می‌دهد. از این‌رو، در [۱۳] و [۱۶] روابطی خطی ارائه شده است که اثر شین‌های توان تزریق در نظر گرفته شده است.

تابع هدف ارائه شده در رابطه (۳) مبنای بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در زمینه مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای فازوری قرار گرفته‌است. در این مدل شین‌های کاندیدای نصب واحد فازوری شبکه با استفاده از تابع هدف ارائه شده در رابطه (۱) به عنوان مجموعه \tilde{S}^M مشخص می‌شود. سپس مسأله در مرحله اول به منظور افزایش مشاهده‌پذیری حل می‌شود. شایان ذکر است که پس از یافتن مجموعه پاسخ \tilde{S}^M ، مراحل بهینه‌سازی به ترتیب از مرحله اول تا مرحله ماقبل آخر با حذف پاسخ‌های مراحل قبل از مجموعه \tilde{S}^M به عنوان مکان‌های کاندیدای مرحله جدید ادامه می‌یابد.

ج) ضرورت طرح یک مدل جامع به منظور مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای اندازه‌گیر فازوری

پیش از ارائه مدل پیشنهادی لازم است با ذکر یک مثال ضرورت مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل مکان‌یابی چندمرحله‌ای مرسوم بیان شود.

برای نمونه، فرض شود یک شبکه ۳۹ شین فرضی توسط ۸ واحد فازوری در مکان‌های معین (شین‌های a, b, c, d, e, f, g, h) مشاهده‌پذیر گردد که باید این هشت تجهیز اندازه‌گیری در طی سه افق زمانی در شبکه نصب گردند: مرحله اول ۳ واحد، مرحله دوم ۳ واحد و مرحله آخر ۲ واحد. حال چنانچه فرض شود این مسأله توسط روش چندمرحله‌ای مرسوم مکان‌یابی گردد و پاسخ بهینه مطلق مسأله چنان باشد که بتوان در مراحل اول تا سوم به ترتیب ۱۵، ۲۸ و ۳۹ شین را مشاهده‌پذیر ساخت. به عبارت دیگر، در مراحل اول تا سوم به

می‌شود که افزونگی اندازه‌گیری بیشتری را شامل شود [۱۳]، [۱۷] و [۲۲]. از این‌رو، بهره‌برداران شبکه تمایل دارند در انتهای افق برنامه‌ریزی علاوه بر مشاهده‌پذیری کامل شبکه، سیستمی با افزونگی اندازه‌گیری بیشتری را در اختیار داشته باشند. بنابراین، مکان‌های نهایی نصب واحدهای فازوری از ابتدا معلوم در نظر گرفته می‌شوند. این در حالی است که در مکان‌یابی چندمرحله‌ای، از آنجا که در مراحل میانی سیستم مشاهده‌پذیر کامل نیست، افزایش مشاهده‌پذیری سیستم تنها هدف اصلی بوده، مسأله افزونگی اندازه‌گیری آنچنان حائز اهمیت نیست. از این‌رو، در تمامی مطالعات صورت گرفته پیرامون مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای فازوری تنها به افزایش مشاهده‌پذیری سیستم پرداخته شده است.

تابع هدف و قیود مرسوم در مسأله مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای اندازه‌گیر فازوری بدون در نظر گرفتن اثر شین‌های توان تزریق صفر به صورت روابط زیر است:

$$\max f_1 = \sum_{i=1}^{Nb} u_i \quad (۳)$$

Subject to:

$$\mathbf{Ax} \geq \mathbf{u} \quad (۴)$$

$$x_i = 0, \forall i \notin \tilde{S}^M \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{Nb} x_i = \sum_{j=1}^k n^j \quad (۶)$$

که در آن،

$$x_i = 1, \forall i \in S^1 US^2 \dots US^{k-1} \text{ \& } \tilde{S}^0 = \emptyset \quad (۷)$$

تابع هدف و قیود ارائه شده در روابط (۳) تا (۷)، مکان‌یابی واحدهای فازوری را برای مرحله k م نشان می‌دهد. پارامتر Nb نیز در رابطه (۳) معرف تعداد شین‌های شبکه است. در رابطه (۴)، ماتریس مجاورت شبکه است. در این رابطه بردارهای \mathbf{u} و \mathbf{x} به ترتیب به صورت $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_{Nb}]^T$ و $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{Nb}]^T$ تعریف می‌شوند. اجزای تشکیل دهنده بردار \mathbf{u} همگی متغیرهای دودویی هستند که یک و صفر بودن آنها به ترتیب بیانگر مشاهده‌پذیری و یا عدم مشاهده‌پذیری شین مربوطه است؛ از این‌رو، تابع هدف رابطه (۳) بیشینه‌سازی مشاهده‌پذیری در سیستم قدرت را دنبال می‌کند. در رابطه (۵)، M تعداد مراحل برنامه‌ریزی و مجموعه

محتمل فوق در فضای جستجوی مدل مرسوم توجه‌پذیر است. در مسأله مکان‌یابی چندمرحله‌ای، چنانچه مکان‌یابی طبق مدل مرسوم که مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی است، صورت پذیرد و چنانچه مسأله در مرحله اول دارای بیش از یک بهینه مطلق باشد آنگاه طبق نکته ذکر شده، مدل خطی مرسوم یکی از بهینه‌های موجود را دنبال می‌کند؛ در این حالت ممکن است پاسخ بهینه کلی مسأله دنبال نشود. برای روشن‌تر شدن موضوع، چنانچه فرض شود در مثال فوق بتوان با نصب ۳ واحد فازوری در شین‌های a, e, f ، و یا در شین‌های a, c, f تعداد ۱۵ شین را مشاهده‌پذیر ساخت. حال این دو دسته جواب، پاسخ‌های بهینه مطلق مرحله اول هستند. پاسخی که در اینجا مطرح است این است که کدام یک باید به‌عنوان پاسخ بهینه انتخاب شود؟ از آنجاکه روش مکان‌یابی چندمرحله‌ای مرسوم برای هر مرحله مستقل است، هیچ تمایزی برای این دو دسته جواب قائل نمی‌شود و طبق نکته‌ای که پیش از این بدان اشاره شد، همواره از این دو پاسخ تنها یکی از آنها (بر اساس تکنیک حل‌کننده^۹ برنامه‌ریزی عدد صحیح) انتخاب می‌شوند؛ اما محتمل است دسته جوابی که انتخاب نشده است، در مراحل بعد عملکرد بهتری از لحاظ مشاهده‌پذیری داشته باشد.

حالت فوق در وضعیت‌های توپولوژیک خاص اتفاق می‌افتد (جدول (۱) از آزمون اول) و لزوماً این‌گونه نیست که روش مرسوم همواره به پاسخ بهینه دست نیابد؛ اما آنچه اهمیت دارد این است که شبکه‌های سیستم واقعی بزرگ مقیاس بوده و احتمال بروز شرایط مطرح شده در مسائل با مقیاس بالا و تعداد افق‌های برنامه‌ریزی بیشتر، بسیار محتمل است. از این رو، باید مکان‌یابی برای هر مرحله با توجه به مراحل قبل و بعد و به صورت دینامیک و همزمان انجام پذیرد. بنابراین، ضرورت مدل جامع و فراگیر در این زمینه منطقی است.

د) مکان‌یابی چندمرحله‌ای دینامیکی واحدهای اندازه‌گیر فازوری

در این مقاله برای افزایش مشاهده‌پذیری سیستم در طول افق برنامه‌ریزی، یک روش دینامیکی جدید ارائه شده است که در آن بر خلاف روش‌های موجود، مکان‌یابی واحدهای فازوری برای هر مرحله وابسته به مراحل قبل و بعد آن است که نتیجه آن افزایش فضای جستجوست. لذا برای تعریف و فرمول‌بندی

ترتیب ۲۴، ۱۱ و ۰ شین رؤیت‌ناپذیرند (مجموعاً ۳۵ شین در طی افق برنامه‌ریزی). پرسشی که در اینجا مطرح می‌شود، این است که آیا پاسخ به‌دست آمده پاسخی بهینه است؟ در اینجا می‌توان به یک پاسخ محتمل اشاره نمود که در فضای جستجوی مدل مرسوم قرار ندارد؛ برای نمونه، چنانچه این ۸ واحد اندازه‌گیری فازوری به ترتیبی در شبکه نصب شوند که در مراحل اول تا سوم به ترتیب ۱۴، ۳۰ و ۳۹ شین مشاهده‌پذیر باشند. به عبارت دیگر، در مراحل اول تا سوم به ترتیب ۲۵، ۹ و ۰ شین رؤیت‌ناپذیرند (مجموعاً ۳۴ شین در طی افق برنامه‌ریزی). واضح است که حالت دوم نسبت به پاسخ روش مرسوم برتری دارد؛ چراکه در مجموع تعداد شین‌های بیشتری را مشاهده‌پذیر ساخته، هزینه‌های ناشی از عدم مشاهده‌پذیری کمتری بر سیستم تحمیل می‌گردد. به وضوح مشخص است که پاسخ حالت دوم در فضای جستجوی مدل مرسوم قرار نمی‌گیرد؛ این مهم بدین دلیل است که در روش مرسوم ابتدا مکان‌یابی برای مرحله اول با هدف افزایش مشاهده‌پذیری سیستم صورت گرفته و قطعاً پاسخی بهتر از مشاهده‌پذیر نمودن ۱۴ شین را انتخاب می‌کند (۱۵ شین). سپس با کنار گذاشتن شین‌های انتخاب شده مرحله اول، فرایند بهینه‌سازی برای مرحله دوم بار دیگر مجدداً تکرار شده، این روند تا مرحله ماقبل آخر ادامه می‌یابد. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد، آن است که روش‌های مرسوم با وجود تحصیل بهینه مطلق مدل خود از فضای جستجوی محدودی برخوردار است و تمامی حالت‌های ممکن را شامل نمی‌شود.

شایان ذکر است که پاسخ احتمالی فوق، تنها یکی از حالت‌های بهتر را نشان می‌دهد. پاسخ محتمل دیگری را می‌توان مطرح نمود که در فضای جستجوی مدل مرسوم قرار ندارد: مشاهده‌پذیر ساختن به ترتیب ۱۵، ۲۹ و ۳۹ شین در مراحل اول تا سوم. در نگاه اول شاید این‌گونه به نظر رسد که این پاسخ محتمل نیز قطعاً باید در فضای جستجوی مدل مرسوم قرار گیرد؛ اما لزوماً چنین نیست. نکته ظریفی در این میان وجود دارد که به ماهیت مدل‌های خطی مرسوم بر می‌گردد. در اینجا یادآوری این نکته ضروری است که مدل‌های خطی‌ای که دارای چندین بهینه مطلق هستند، همواره در اجراهای مختلف تنها به یکی از چند پاسخ بهینه منتهی می‌شوند. حال با در نظر گرفتن نکته فوق در روش مکان‌یابی چند مرحله‌ای مرسوم، عدم پاسخ

جستجو برای مکان‌یابی نسبت به مدل‌های موجود گسترش می‌یابد؛ چرا که بر خلاف روش‌های موجود جواب به دست آمده در هر مرحله از جواب‌های کاندیدای مرحله بعد کنار گذاشته نمی‌شود. قید (۱۱) به منظور محدود کردن تعداد واحدهای اندازه‌گیر فازوری هر مرحله برابر با تعداد تعیین شده بر اساس محدودیت اقتصادی و ملاحظات فنی اعمال شده به سیستم قدرت است. به عبارت بهتر، در انتهای مرحله t ام برنامه‌ریزی باید به تعداد مجموع واحدهای قابل نصب از مرحله اول تا مرحله t ام واحد اندازه‌گیری فازوری در شبکه نصب شده باشد. در مورد رابطه (۱۱) باید به این نکته توجه نمود که متغیرهای دودویی تصمیم در این رابطه عبارتند از:

$x_1^1, x_2^1, \dots, x_{Nb}^1$ برای مرحله اول، $x_1^2, x_2^2, \dots, x_{Nb}^2$ برای مرحله دوم، الی $x_1^M, x_2^M, \dots, x_{Nb}^M$ برای مرحله آخر.

مشخص است که تعداد این متغیرها نسبت به رابطه (۶) از مدل مرسوم M برابر بوده، در نتیجه فضای جستجوی مسأله افزایش می‌یابد. قید (۱۲) بیانگر این محدودیت است که مکان واحدهای فازوری باید از نقاط کاندیدای به دست آمده از مجموعه \tilde{S}^M انتخاب شود. همچنین، قید رابطه (۱۳) بدین منظور به کار گرفته شده است تا تضمین گردد چنانچه در مرحله t ام یک واحد اندازه‌گیر بر روی شین t ام نصب گردد، در مراحل بعدی برنامه‌ریزی شین مذکور مجهز به واحد اندازه‌گیری باشد. در انتها جواب نهایی مسأله مطابق با روابط زیر بیان می‌شود:

$$\tilde{S}^t = \{i \in I | x_i^t = 1\} \quad (14)$$

$$S^t = \tilde{S}^t - \tilde{S}^{t-1} \quad \forall \tilde{S}^0 = \emptyset \quad (15)$$

که در رابطه (۱۴)، \tilde{S}^t مجموعه مکان‌های کاندیدای نصب واحدهای اندازه‌گیری فازوری از مرحله اول تا مرحله t ام است. در رابطه (۱۵) نیز مجموعه S^t بیانگر مکان‌های نصب واحدهای فازوری در مرحله زمانی t است.

مدل‌سازی ریاضی پیشنهادی در مقایسه با مدل مرسوم دارای دو تفاوت اساسی است: اول اینکه متغیرهای تصمیم در تابع هدف پیشنهادی با توجه به تعداد مراحل، بیشتر از مدل مرسوم است. دومین تفاوت مدل‌سازی ریاضی پیشنهادی و مدل مرسوم را می‌توان به پیچیدگی ریاضی بین متغیرهای $x_{i \in I}^t$ و $u_{i \in I}^t$ به ازای $t \in \{1, 2, \dots, M-1\}$ دانست که به علت دینامیک بودن روش حل، بر خلاف مدل مرسوم (رابطه (۴)) به سادگی قابل

تابع هدف، شاخص جدیدی با عنوان متوسط شین‌های رؤیت‌ناپذیر به صورت زیر معرفی شده است:

$$AUB = 1 - \left(\frac{1}{Nb} \sum_{i \in I} u_i \right) \quad (8)$$

در این رابطه، شاخص AUB بیانگر میانگین شین‌های مشاهده نشده است. متغیر دودویی u_i نشان دهنده مشاهده‌پذیر بودن شین t ام به ازای عدد یک است. شاخص معرفی شده در مرحله t ام به صورت رابطه زیر قابل تعمیم است:

$$AUB^t = 1 - \left(\frac{1}{Nb} \sum_{i \in I} u_i^t \right) \quad (9)$$

در رابطه (۹)، u_i^t معرف مشاهده‌پذیری شین t ام در مرحله t ام به ازای عدد یک است. در این مدل، همانند روش مرسوم مسأله، ابتدا برای مرحله زمانی آخر حل شده و شین‌های کاندیدای برای نصب واحدهای اندازه‌گیر فازوری مشخص می‌شوند. این مجموعه به صورت $\tilde{S}^M = \{i \in I | x_i^M = 1\}$ تعریف می‌شود. در تعریف این مجموعه، M تعداد مراحل افق برنامه‌ریزی و $x_{i \in I}^M$ پاسخ به دست آمده از نتایج مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیر فازوری طبق تابع هدف رابطه (۱) برای مرحله آخر است؛ به عبارت بهتر، $x_{i \in I}^M$ متغیرهای دودویی مربوط به مرحله آخر افق برنامه‌ریزی هستند که یک بودن آنها نشان دهنده حضور واحد اندازه‌گیر فازوری در مرحله‌ی آخر است. از این رو، \tilde{S}^M شماره شین‌هایی را نشان می‌دهد که باید پس از اتمام افق برنامه‌ریزی به واحدهای فازوری مجهز شده باشند. با معرفی شاخص AUB مدل پیشنهادی برای مکان‌یابی چندمرحله‌ای دینامیکی واحدهای اندازه‌گیر فازوری به صورت روابط زیر بیان می‌شود:

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^{M-1} AUB^t \quad (10)$$

Subject to:

$$\sum_{i \in \tilde{S}^M} x_i^t = \sum_{k=1}^t n^k \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, M-1\} \quad (11)$$

$$x_j^t = 0 \quad \forall j \in \{I - \tilde{S}^M\} \text{ and } t \in \{1, 2, \dots, M-1\} \quad (12)$$

$$x_j^t \leq x_j^{t+1} \quad \forall j \in I \text{ and } t \in \{1, 2, \dots, M-2\} \quad (13)$$

رابطه (۱۰) مجموع شاخص‌های متوسط شین‌های رؤیت‌ناپذیر شده همه مراحل زمانی را شامل می‌شود. در این صورت فضای

ارائه نیست.

$$APO = \frac{1}{Nb} \sum_{i \in I} PO_i \quad (19)$$

با فرض مشخص بودن شین‌های کاندیدا به عنوان مجموعه \tilde{S}^M ، تابع هدف و قیود مسأله مکان‌یابی احتمالی چند مرحله‌ای دینامیکی به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود:

$$\max f_3 = \sum_{t=1}^{M-1} APO^t \quad (20)$$

Subject to:

$$\sum_{i \in \tilde{S}^M} x^t_i = \sum_{k=1}^t n^k \quad \forall t \in \{1, 2, \dots, M-1\} \quad (21)$$

که در آن:

$$x^t_j = 0 \quad \forall j \in \{I - \tilde{S}^M\} \text{ and } t \in \{1, 2, \dots, M-1\} \quad (22)$$

$$x^t_j \leq x^{t+1}_j \quad \forall j \in I \text{ and } t \in \{1, 2, \dots, M-2\} \quad (23)$$

با توجه به مدل پیشنهادی برای افزایش احتمال مشاهده‌پذیری سیستم، تابع هدف به صورت رابطه (۲۰) مدل می‌شود که در آن به صورت همزمان با در نظر گرفتن همه مراحل با یکدیگر، سعی در بهبود شاخص احتمالی مورد نظر شده است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی خفاش (BA)

خفاش‌ها جانوران شگفت‌انگیزی هستند. آنها تنها پستاندارانی هستند که پرواز می‌کنند و همچنین، بسیاری از آنها از توانایی پیشرفته تعیین مکان با استفاده از صوت برخوردارند. اغلب خفاش‌ها برای تعیین مکان از صوت‌هایی با فرکانس در محدوده خاص استفاده می‌کنند. در میان تمام گونه‌های خفاش‌ها، خفاش‌های کوچک مثالی معروف هستند که از صوت به عنوان ابزاری برای تعیین مکان استفاده می‌کنند. خفاش‌های کوچک پالس‌های صوتی بسیار بلندی را از خود ساطع کرده، از پژواک ناشی از برخورد پالس‌ها با اجسام محیط، آنها را پردازش می‌کنند [۲۳] و [۲۴].

الگوریتم بهینه‌سازی خفاش که در سال ۲۰۱۰ برای نخستین بار توسط Xin-She Yang ارائه شد [۲۴]، الهامی از خصوصیات ردیابی خفاش‌های کوچک در جستجوی شکار است. به منظور بسط این الگوریتم بهینه‌سازی از قوانین کلی استفاده شده است که در زیر به آنها اشاره می‌گردد:

■ قانون اول: همه خفاش‌ها به کمک پژواک فاصله را

(و) مکان‌یابی احتمالی چندمرحله‌ای دینامیکی

تاکنون در اغلب تحقیقات انجام شده، مشاهده‌پذیری سیستم قدرت از دیدگاه قطعی بررسی شده است؛ به این معنی که یک شین یا مشاهده‌پذیر است یا خیر. مرجع [۱۹] با معرفی شاخص‌های احتمالی، از جمله شاخص احتمال مشاهده‌پذیری که در رابطه زیر به آن اشاره شده، به بررسی احتمالی مکان‌یابی واحدهای فازور پرداخته است:

$$PO_i = 1 - \prod_{j \in I} (1 - x_j \bar{A}_{ij}) \quad (16)$$

رابطه فوق برای مرحله زمانی t ام به صورت زیر قابل تعمیم است:

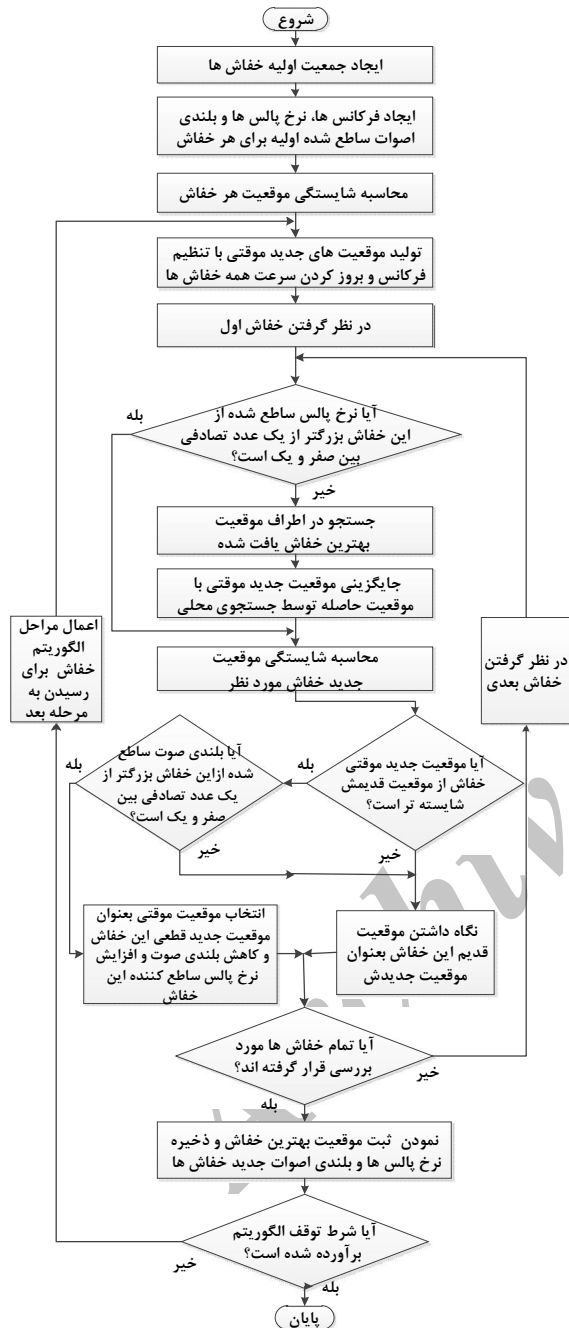
$$PO^t_i = 1 - \prod_{j \in I} (1 - x^t_j \bar{A}_{ij}) \quad (17)$$

مطالعات نشان می‌دهد که احتمال مشاهده‌پذیری شین‌هایی که تنها توسط اثر شین تزریق صفر و یا اندازه‌گیر توان تزریقی مشاهده‌پذیر می‌شوند، بسیار کم است [۱۹]، از این رو، شاخص ارائه شده در روابط (۱۶) و (۱۷) صرف نظر از اثر شین تزریق صفر است. در این روابط \bar{A}_{ij} مقدار ثابتی است که تشریح‌کننده احتمال مشاهده‌پذیری شین شماره i خواهد بود. این مقدار به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{A}_{ij} = a_{ij} A_j^{VM} A_j^{PMU} A_j^{LINK} A_j^{CM} A_j^{LINE} \quad (18)$$

در این رابطه A_j^{VM} و A_j^{CM} به ترتیب بیان‌کننده دسترسی به ولتاژ اندازه‌گیری شده توسط واحد اندازه‌گیر فازوری نصب شده در شین j و دسترسی به جریان اندازه‌گیری شده خط i - j است که این مقادیر توسط دسترس‌پذیری ترانسفورماتورهای ولتاژ و ترانسفورماتورهای جریان قابل محاسبه است. A_j^{PMU} و A_j^{LINK} نیز به ترتیب بیانگر احتمال بهره‌برداری موفقیت‌آمیز از واحد فازوری نصب شده در شین j و ارتباط مخیراتی آن است. همچنین A_j^{LINE} معرف دسترس‌پذیری خط i - j است. در رابطه (۱۸)، $A_{ii}^{LINK} = A_{ii}^{CM} = 1$ خواهد بود. بر این اساس شاخص سیستم با عنوان میانگین مشاهده‌پذیری احتمالی به صورت زیر قابل بیان است:

$$r_i = [1 - \exp(-\gamma\tau)] \quad \forall \gamma \geq 0 \quad (28)$$



شکل (۱): مراحل کلی الگوریتم بهینه‌سازی خفاش

همان‌طور که از رابطه (۲۸) مشخص است بازه تغییرات r بین صفر و یک است؛ عدد صفر به معنی عدم ارسال پالس و عدد یک به معنی ارسال بیشینه آن. مراحل کلی الگوریتم بهینه‌سازی خفاش مطابق شکل (۱) انجام می‌پذیرد. نکته‌ای که

تشخیص می‌دهند و همچنین، همه آنها تفاوت صدای پژواک شده ناشی از غذا و اجسام اطراف پیرامونشان را می‌دانند.

قانون دوم: خفاش‌ها به صورت تصادفی با سرعت v_i در موقعیت p_i با فرکانس ثابت f_{min} و طول موج‌های مختلف و بلندی صوت R شکار خود را دنبال کرده، می‌توانند به صورت خودکار طول موج و همچنین، نرخ پالس‌های ارسالی خود را $(r \in [0,1])$ با توجه نزدیکی به شکارشان تنظیم کنند.

قانون سوم: اگر چه بلندی صوت می‌تواند در بسیاری از حالات متفاوت باشد، با این حال فرض می‌شود که این تغییرات از بیشترین مقدار R_0 تا کمترین مقدارش به عنوان R_{min} محدود باشد.

با توجه به قوانین توصیف شده در بالا، به منظور مدل‌سازی ریاضی، برای هر خفاش مجازی i در فضای جستجوی d بعدی، موقعیت p_i و سرعت v_i در هر تکرار الگوریتم می‌توان از روابط ذیل استفاده کرد:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (24)$$

$$v_i^{\tau+1} = v_i^{\tau} + (p_i^{\tau} - p_*)f_i \quad (25)$$

$$p_i^{\tau+1} = p_i^{\tau} + v_i^{\tau} \quad (26)$$

در روابط بالا τ شمارنده تکرار الگوریتم و β یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه صفر و یک است. p_* بهترین موقعیت فعلی است که در هر تکرار پس از مقایسه با موقعیت‌های جدید خفاش‌های مجازی انتخاب می‌شود. از سوی دیگر در هر تکرار، جستجوی محلی بر اساس گردش تصادفی حول موقعیت بهترین خفاش به صورت $p_{new} = p_{old} + \epsilon R^{\tau}$ انجام می‌شود که در آن $\epsilon \in [-1,1]$ برای جهت محدود کردن پله‌های گردش تصادفی به کار گرفته شده است. در رابطه فوق $R^{\tau} = \langle R_i^{\tau} \rangle$ میانگین بلندی اصوات همه خفاش‌های در تکرار τ تعریف می‌شود. از طرفی، بلندی صوت R_i و نرخ پالس ارسالی r در هر تکرار الگوریتم باید مطابق روابط ذیل بروز شود:

$$R_i^{\tau+1} = \alpha R_i^{\tau} \quad \forall 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (27)$$

خفاش‌ها به دنبال طعمه حرکت می‌کنند. در کدبندی این مسأله موقعیت هر خفاش به صورت یک بردار به طولی برابر با تعداد واحدهای فازوری کاندیدا مشخص می‌شود. درایه‌های این بردار ناگزیر باید همگی عضو مجموعه S^M باشند.

برای ساده‌سازی کدبندی مسأله، می‌توان n^1 درایه اول بردار موقعیت هر خفاش را به عنوان شین‌های کاندیدای نصب واحد فازوری در مرحله اول (S^1) و n^2 درایه بعدی را کاندیدای نصب واحد فازوری در مرحله دوم (S^2) در نظر گرفت و این روند را تا مرحله آخر ادامه داد. برای مثال، چنانچه فرض شود که در شبکه ۳۰ شین IEEE کاندیدای نصب واحدهای فازور به منظور مشاهده‌پذیری کامل شبکه شین‌های 2, 4, 10, 12, 15, 20, 27 باشند و افق برنامه‌ریزی، سه مرحل و به صورت $n^1 = 2, n^2 = 3, n^3 = 2$ در نظر گرفته شده باشد، آنگاه S^3 به صورت $S^3 = \{2, 4, 10, 12, 15, 20, 27\}$ تعریف می‌شود. از طرفی، چنانچه فرض شود موقعیت یک خفاش مجازی به صورت $p1 = 10, 4, 20, 15, 27, 2, 12$ تعریف شود، طبق توضیحات بالا کدبندی موقعیت این خفاش به صورت شکل (۲) اعمال می‌شود. بر این اساس، همان گونه که از شکل (۲) مشخص است، مجموعه‌های $S^1, S^2, S^3, \tilde{S}^1, \tilde{S}^2, \tilde{S}^3$ و S^3 به صورت $S^1 = \{10, 4\}, \tilde{S}^1 = \{10, 4\}, S^2 = \{10, 4, 20, 15, 27\}, \tilde{S}^2 = \{10, 4, 20, 15, 27, 2, 12\}, S^3 = \{2, 12\}$ و $\tilde{S}^3 = \{20, 15, 27\}$ مشخص می‌شوند.

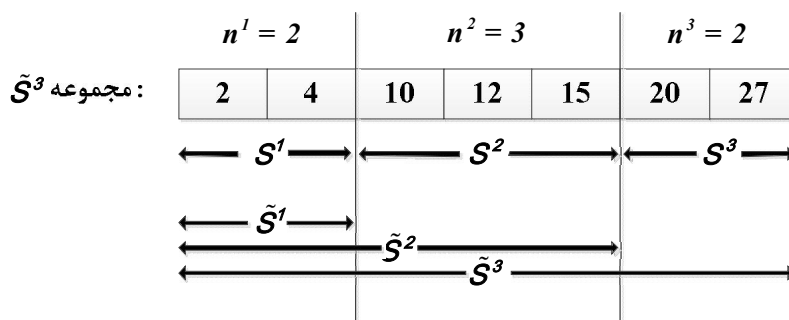
باید بدان توجه نمود، این است که کاربرد نرخ پالس ارسالی r_i دقیقاً برگرفته از آن چیزی است که در واقعیت اتفاق می‌افتد. چنانچه خفاش به هدف خود نزدیک شود، به منظور رصد نمودن هرچه بهتر موقعیت شکار خود پالس‌های بیشتری ارسال می‌کند. شبیه‌سازی این رفتار در الگوریتم بهینه‌سازی خفاش با تنظیم پارامتر r_i امکان‌پذیر است. هرچه این نرخ به عدد یک نزدیکتر باشد، جستجوی محلی در اطراف بهترین موقعیت با احتمال بیشتری صورت می‌پذیرد، و بالعکس. موضوع فوق در روند الگوریتم شکل (۱) نشان داده شده است. نکته حائز اهمیت این است که با انتخاب متغیرهای $r_i = R_i = 0$ این الگوریتم مشابه الگوریتم تجمع ذرات عمل می‌کند و یا با برابر قرار دادن متغیرهای $r_i = R_i = 0.7$ این الگوریتم شبیه الگوریتم جستجوی هارمونی رفتار می‌کند [۲۵]. شایان ذکر است که شرط توقف الگوریتم، تعداد تکرارهای معینی فرض شده است.

۴- روش حل مسأله

۴-۱- کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی خفاش در حل

مسأله مکان‌یابی چندمرحله‌ای دینامیکی واحدهای اندازه‌گیر فازوری در ابتدا مکان‌های کاندیدای نصب واحدهای فازوری شبکه در مرحله آخر مطابق با تابع هدف ارائه شده در رابطه (۱) با عنوان مجموعه S^M مشخص می‌شوند. برای بهینه‌سازی تابع هدف رابطه (۱۰) و برآورده کردن قیود مسأله، گروهی از

تعداد PMU در مرحله سوم: تعداد PMU در مرحله دوم: تعداد PMU در مرحله اول:



شکل (۲): نحوه کدبندی موقعیت خفاش p1

۲-۴- برآورده کردن قیود مدل پیشنهادی توسط

الگوریتم خفش

با توجه به ماهیت پیوسته بودن الگوریتم خفش، اصلاح نحوه کدبندی ارائه شده در قسمت قبل به منظور رعایت قیود مسأله امری اجتناب‌ناپذیر است. در زیر دو قیود از مسأله مکان‌یابی پیشنهادی معرفی و به تشریح راهکارهای برآورده کردن این قیود پرداخته شده است.

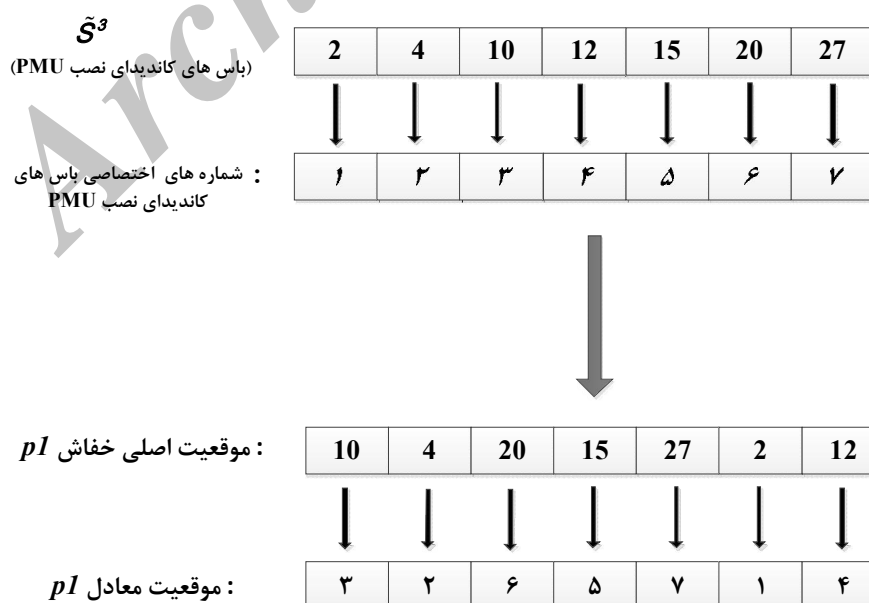
الف) قید شماره ۱- شین‌های کاندیدای نصب واحدهای فازور در مراحل مختلف باید عضو مجموعه \tilde{S}^M باشند:

ماهیت الگوریتم خفش این گونه است که برای دستیابی به موقعیت جدید هر خفش مجازی طبق رابطه (۲۶) تغییراتی به موقعیت قدیم خفش‌ها افزوده می‌شود. پس از این مرحله، از آنجا که شماره شین عدد صحیحی است، باید موقعیت جدید گرد شود. از طرفی، بسیار محتمل است برخی از اعداد گرد شده عضو مجموعه \tilde{S}^M نباشند. از این رو، برای برآورده ساختن این قید، ابتدا به هر کدام از شین‌های عضو این مجموعه عددی غیرتکراری بین ۱ تا n (برابر با تعداد اعضای مجموعه \tilde{S}^M) اختصاص داده می‌شود. بر این اساس با توجه به اعداد اختصاص داده شده، برای موقعیت اصلی هر خفش یک موقعیت معادل نیز وجود دارد؛ لذا از این موقعیت معادل در طول اجرای

الگوریتم بهینه‌سازی به منظور رعایت قید شماره ۱ استفاده می‌شود. به سادگی مشخص است که با به‌کارگیری این شیوه، پس از گرد شدن بردار موقعیت جدید معادل، تمام درایه‌های این بردار همچنان در محدوده ۱ تا n قرار خواهند گرفت و این به آن معنی است که درایه‌های بردار موقعیت اصلی هر خفش همگی زیر مجموعه‌ی \tilde{S}^M هستند. قابل ذکر است که تنها به هنگام محاسبه برازندگی هر خفش، این اعداد دوباره به حالت اولیه برگردانده می‌شوند. بدیهی است که حد بالا و پایین درایه‌های بردار موقعیت معادل جدید برای هر خفش به ترتیب برابر با n و ۱ انتخاب می‌شوند. در شکل (۳) به نحوه چگونگی کدبندی موقعیت خفش $p1$ (خفش ذکر شده در مثال قبل) برای رعایت قید شماره ۱ پرداخته شده است.

ب) قید شماره ۲- همه اعضای مجموعه \tilde{S}^M باید در بردار موقعیت جدید خفش آمده باشند:

بسیار محتمل است که بردار موقعیت جدید یک خفش، پس از رعایت کردن قید شماره ۱ (بردار موقعیت جدید معادل) و گرد شدن، از اعداد تکراری تشکیل شده باشد. برای رفع این مشکل، اعداد غیرتکراری از بردار موقعیت جدید را در مکان‌هایشان ثابت کرده، اعداد تکراری از این بردار حذف می‌شوند. در مرحله بعد اعداد ثابت شده از بردار موقعیت قدیم



شکل (۳): نحوه کدبندی موقعیت خفش $p1$ به منظور رعایت قید شماره ۱

۵-۲- مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای فازوری در

شبکه نمونه

الف) آزمون اول: مکان‌یابی احتمالی چندمرحله‌ای دینامیکی با در نظر گرفتن توسعه شبکه

به منظور مکان‌یابی احتمالی چندمرحله‌ای دینامیکی، سیستم ۵۷ شین IEEE ارائه شده در [۲۶] که شامل ۸۰ خط انتقال است، در نظر گرفته شده است. در این آزمون نصب واحدهای فازوری در سه مرحله زمانی انجام می‌پذیرد که همزمان با این مراحل شبکه نیز بر اساس مدل ارائه شده در [۲۷] در حال توسعه است. اطلاعات احتمال خروج خطوط شبکه مورد مطالعه و نیز برنامه توسعه این شبکه در [۱۹] موجود است.

به منظور بیشینه‌سازی میانگین مشاهده‌پذیری احتمالی این شبکه در مرحله سوم به نحوی که احتمال مشاهده‌پذیری هر شین در این مرحله کمتر از $PO_i^{3,\min} = 0/985$ نباشد، روشی در [۱۹] ارائه شده است که عنوان می‌کند با شرایط فوق شبکه در مرحله سوم نیازمند ۲۴ واحد فازوری است که مکان این واحدها به صورت $S^3 = \{1,3,6,8,11,12,14,18,20,22,24,28,30,32,35,38,39,40,41,45,47,51,52,54\}$ است. نتایج روش پیشنهادی این مقاله برای افزایش مشاهده‌پذیری احتمالی شبکه با نتایج [۱۹] در جدول (۱) مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در مرحله اول نصب واحدهای فازور در هر دو روش تعداد شین‌های مشاهده‌ناپذیر، یکسان و برابر با ۲۱ بوده؛ هر چند که مکان نصب واحدهای فازور یکسان نیست. همچنین، مشاهده می‌شود که میانگین مشاهده‌پذیری احتمالی شبکه در مرحله اول در هر دو روش برابر با $APO^1 = 0/6231$ است.

در مرحله دوم طبق روش پیشنهادی با نصب ۸ واحد فازوری دیگر تعداد شین‌های مشاهده‌ناپذیر شبکه از عدد ۲۱ به عدد ۵ کاهش می‌یابد. این در حالی است که طبق نتایج گزارش شده در [۱۹] این مقدار از عدد ۲۱ به عدد ۶ رسیده است. بر این اساس، انتظار می‌رود با کاهش تعداد شین‌های مشاهده‌ناپذیر در مقایسه با [۱۹]، شاخص احتمالی سیستم به نسبت افزایش یابد، همان‌طور که از نتایج پیداست، شاخص APO^2 با استفاده از روش پیشنهادی از مقدار $0/8867$ (گزارش شده در [۱۹]) به مقدار $0/9026$ ارتقا یافته است. با

کنار گذاشته و اعداد باقیمانده به ترتیب موقعیتشان در مکان‌های خالی بردار موقعیت جدید قرار می‌گیرند. برای مثال، چنانچه فرض شود $P2^{old} = 2,7,4,1,3,5,6$ بردار موقعیت قدیم یک خفاش مجازی باشد (که به منظور رعایت نمودن قید شماره ۱، هر یک از اعداد ۱ تا ۷ نماینده عضوی از مجموعه S^3 هستند) و پس از اجرای مراحل الگوریتم بهینه‌سازی، بردار موقعیت جدید به صورت $P2^{new} = 4,7,3,4,6,5,2$ باشد، اکنون به این دلیل که از عدد ۱ در بردار موقعیت جدید استفاده نشده و در عوض از عدد ۴ دو بار استفاده شده است، باید این موقعیت مطابق با گفته‌های بالا اصلاح شود. روند اصلاح این موقعیت در دو گام زیر تشریح شده است:

گام اول: ابتدا اعداد غیرتکراری در مکان‌هایشان ثابت و اعداد تکراری از این بردار به صورت $P2^{new} = -7,3,-6,5,2$ حذف می‌شوند.

گام دوم: با حذف اعداد ثابت شده از بردار موقعیت قدیم $P2^{old} = 2,7,4,1,3,5,6$ اعداد باقیمانده به ترتیب قرار گرفتند که در این مثال به ترتیب اعداد ۱ و ۴ هستند، در جای خالی بردار موقعیت به صورت $P2^{new} = 4,7,3,1,6,5,2$ قرار خواهند گرفت.

۵- مطالعات عددی و نتایج

۵-۱- معرفی

در این قسمت به منظور استفاده از مدل پیشنهادی مسئله مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای فازور برای شبکه‌های ۱۴، ۵۷ و ۱۱۸ شین IEEE و همچنین، شبکه انتقال 230 kv و 400 kv ایران بررسی شده و در ادامه با ارائه چند آزمون، نتایج به دست آمده از این روش با پاسخ‌های سایر روش‌ها مقایسه و ضمن نشان دادن کارایی مدل پیشنهادی نسبت به مدل مرسوم، نتیجه‌گیری لازم انجام شده است. همچنین، در انتها مقایسه‌ای در نظر گرفته شده است که توانمندی الگوریتم بهینه‌سازی خفاش را در مدل پیشنهادی نشان می‌دهد. شایان ذکر است که برنامه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار MATLAB 7 نوشته شده است. کامپیوتر استفاده شده در این مطالعه دارای مشخصات فنی شامل، 1GB رم و پردازنده 2GHz است.

توجه به نتایج عنوان شده در این شبکه نمونه، می‌توان دریافت اگر مکان‌یابی چندمرحله‌ای، مبتنی بر روش پیشنهادی و به صورت دینامیکی پذیرد، از مرحله دوم به بعد می‌توان از نظر مشاهده‌پذیری شبکه‌ای قویتر طراحی کرد.

جدول (۱): مکان‌یابی احتمالی واحدهای اندازه‌گیر فازوری (آزمون اول)

مرحله سوم			مرحله دوم			مرحله اول			مراحل برنامه‌ریزی
۸			۸			۸			تعداد واحد قابل نصب
شاخص APO ³	شین‌های مشاهده نشده	مکان نصب واحد فازوری	شاخص APO ²	شین‌های مشاهده نشده	مکان نصب واحد فازوری	شاخص APO ¹	شین‌های مشاهده نشده	مکان نصب واحد فازوری	روش استفاده شده
۰/۹۹۵۲	-	۱۸، ۱۱، ۸ ۲۲ ۳۰، ۴۰، ۴۵ ۴۷	۰/۹۰۲۶	(۵ شین مشاهده‌ناپذیرند) ۳۰، ۱۸ ۴۵، ۴۰ ۴۷	۲۰، ۱۴، ۳ ۳۹، ۳۵، ۲۸ ۵۲، ۵۱	۰/۶۲۳۱	(۲۱ شین مشاهده‌ناپذیرند) ۲۰، ۱۹، ۱۸، ۱۴، ۳ ۲۱ ۳۵، ۳۰، ۲۹، ۲۸، ۲۷ ۳۶ ۴۷، ۴۶، ۴۵، ۴۰، ۳۹ ۵۰ ۵۷، ۵۲، ۵۱	۶، ۱ ۲۴، ۱۲ ۳۸، ۳۲ ۵۴، ۴۱	مدل پیشنهادی
۰/۹۹۵۲	-	۲۲، ۱۸، ۱۱ ۴۰، ۳۹، ۳۰ ۵۱، ۴۵	۰/۸۸۶۷	(۶ شین مشاهده‌ناپذیرند) ۳۰، ۱۸ ۴۰، ۳۹ ۵۱، ۴۵	۱۴، ۶، ۱ ۲۰ ۵۲، ۴۷، ۳۵ ۵۴	۰/۶۲۳۱	(۲۱ شین مشاهده‌ناپذیرند) ۲۰، ۱۹، ۱۸، ۱۴، ۵، ۱ ۳۹، ۳۶، ۳۵، ۳۰، ۲۱ ۴۰ ۵۱، ۵۰، ۴۷، ۴۶، ۴۵ ۵۲ ۵۵، ۵۴، ۵۳	۸، ۳ ۲۴، ۱۲ ۳۲، ۲۸ ۴۱، ۳۸	مرجع [۱۹]

جدول (۲): افق برنامه‌ریزی شبکه‌های نمونه به منظور نصب واحدهای فازوری در عدم حضور شین‌های تزریق صفر (آزمون دوم)

تعداد واحد فازوری قابل نصب در مرحله سوم	تعداد واحد فازوری قابل نصب در مرحله دوم	تعداد واحد فازوری قابل نصب در مرحله اول	تعداد کل واحدهای فازور به منظور مشاهده‌پذیری در مرحله آخر	شبکه مورد مطالعه
۱	۱	۲	۴	IEEE-14 Bus
۵	۶	۶	۱۷	IEEE-57 Bus
۱۰	۱۱	۱۱	۳۲	IEEE-118 Bus

(ب) آزمون دوم: مکان‌یابی چندمرحله‌ای دینامیکی واحدهای اندازه‌گیری فازوری بدون در نظر گرفتن اثر شین‌های تزریق صفر

در این آزمون، مکان‌یابی چندمرحله‌ای دینامیکی در سه مرحله بر روی شبکه‌های نمونه ۱۴، ۵۷ و ۱۱۸ شین IEEE صورت گرفته است. اطلاعات مربوط به افق برنامه‌ریزی برای شبکه‌های نمونه در هر مرحله در جدول (۲) آورده شده است. نتایج حاصل از این آزمون در جدول (۳) گزارش شده است.

همچنین، در این جدول نتایج روش پیشنهادی با نتایج [۱۶] مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، برای شبکه نمونه ۵۷ شین IEEE از مرحله دوم به بعد، مشاهده‌پذیری سیستم با افزایش تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر بهبود یافته است. همچنین، در شبکه نمونه ۱۱۸ شین IEEE در بازه زمانی مرحله اول تا دوم سیستم از نظر مشاهده‌پذیری عملکرد بهتری داشته است.

جدول (۳): پاسخ مکان‌یابی چندمرحله‌ای در عدم حضور شین‌های تزریق صفر (آزمون دوم)

شبکه مورد مطالعه	روش استفاده شده	مرحله اول		مرحله دوم		مرحله سوم	
		تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر	مکان نصب واحدهای فازور	تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر	مکان نصب واحدهای فازور	تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر	مکان نصب واحدهای فازور
IEEE-14 Bus	مدل پیشنهادی	۱۰	۹، ۶	۱۳	۲	۱۴	۷
	مرجع [۱۶]	۱۰	-	۱۳	-	۱۴	-
IEEE-57 Bus	مدل پیشنهادی	۳۱	۳۲، ۲۴، ۹، ۴، ۱، ۳۸	۵۰	۴۱، ۳۹، ۳۶، ۲۹، ۲۰، ۴۶	۵۷	۵۴، ۵۱، ۴۵، ۳۰، ۲۷
	مرجع [۱۶]	۳۱	-	۴۹	-	۵۷	-
IEEE-118 Bus	مدل پیشنهادی	۷۰	۲۳، ۱۷، ۱۲، ۸۰، ۵۶، ۳۷، ۴۹، ۱۱۰، ۱۰۵، ۹۵، ۸۵	۱۰۳	۶۲، ۴۵، ۵۳، ۳۴، ۲۸، ۵، ۱۱۴، ۷۷، ۷۵، ۷۱، ۶۸	۱۱۸	۲۱، ۲۶، ۴۱، ۱۳، ۹، ۱، ۱۰۱، ۹۰، ۸۶، ۶۳
	مرجع [۱۶]	۶۹	-	۱۰۳	-	۱۱۸	-

جدول (۴): افق برنامه‌ریزی شبکه‌های نمونه به منظور نصب واحدهای فازوری در حضور شین‌های تزریق صفر (آزمون سوم)

شبکه مورد مطالعه	مکان شین‌های تزریق صفر	تعداد کل واحدهای فازور به منظور مشاهده‌پذیری در مرحله آخر	تعداد واحد فازوری قابل نصب در مرحله اول	تعداد واحد فازوری قابل نصب در مرحله دوم	تعداد واحد فازوری قابل نصب در مرحله سوم
IEEE-57 Bus	۳۴، ۲۶، ۲۴، ۲۲، ۲۱، ۱۱، ۷، ۴، ۴۸، ۴۶، ۴۵، ۴۰، ۳۹، ۳۷، ۳۶	۱۱	۴	۴	۳
IEEE-118 Bus	۶۸، ۶۴، ۶۳، ۳۸، ۳۷، ۳۰، ۹، ۵، ۸۱، ۷۱	۲۹	۱۰	۱۰	۹

جدول (۵): پاسخ مکان‌یابی چندمرحله‌ای در حضور شین‌های تزریق صفر (آزمون سوم)

مرحله سوم		مرحله دوم		مرحله اول		شبکه مورد مطالعه
تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر	مکان نصب واحدهای فازور	تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر	مکان نصب واحدهای فازور	تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر	مکان نصب واحدهای فازور	
۵۷	۵۴، ۵۱، ۳۲	۴۷	۲۹، ۲۵، ۲۰، ۱	۲۹	۵۶، ۳۸، ۱۳، ۴	IEEE-57 Bus
۱۱۸	۴۵، ۳۱، ۱۹، ۱۱، ۲، ۱۰۱، ۹۰، ۸۶، ۵۲	۱۰۴	۶۲، ۴۰، ۳۴، ۲۷، ۲۱، ۱۱۰، ۹۴، ۷۷، ۷۵، ۷۲	۶۸	۴۹، ۳۲، ۱۵، ۱۲، ۸، ۱۰۵، ۸۵، ۸۰، ۶۵، ۵۶	IEEE-118 Bus

در این مرجع نشان داده شده است. از این رو، در این آزمون نمی‌توان مقایسه‌ای با دیگر مطالعات انجام داد. در اینجا شایسته یادآوری است که روش مکان‌یابی چندمرحله‌ای استفاده شده در [۱۶]، [۱۹] و [۲۰] همگی یکسان و به صورت مستقل است (روش مرسوم).

د) آزمون چهارم: مکان‌یابی چندمرحله‌ای دینامیکی با در نظر گرفتن محدودیت کانال‌های اندازه‌گیری

آزمون پیش رو برای در نظر گرفتن محدودیت کانال‌های اندازه‌گیری در مسأله مکان‌یابی دینامیکی پیشنهادی انتخاب شده است. همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، در عمل واحدهای اندازه‌گیری فازوری توانایی اندازه‌گیری تعداد نامحدود فازورهای جریان خطوط متصل شده به شین محل نصب خود را ندارند. از این رو، در مسأله مکان‌یابی واحدهای فازوری قید محدودیت کانال اندازه‌گیری برای هر تجهیز مطرح می‌شود. در این قسمت آزمونی بر روی شبکه در طول یک افق سه مرحله‌ای در نظر گرفته شده است که هر تجهیز اندازه‌گیری حداکثر دارای سه کانال اندازه‌گیری بوده؛ در نتیجه هر واحد فازوری قادر است حداکثر سه شین را مشاهده‌پذیر سازد. علاوه بر این، در این آزمون اثر شین‌های توان تزریق صفر نیز در نظر گرفته شده است.

پیش از بررسی مکان‌یابی چندمرحله‌ای پیشنهادی بر روی شبکه نمونه فوق باید تعداد بهینه و مکان واحدهای فازوری برای مرحله آخر برنامه‌ریزی مشخص شود. بدین منظور، نتایج مکان‌یابی تک مرحله‌ای صورت گرفته با در نظر گرفتن

ج) آزمون سوم: مکان‌یابی چندمرحله‌ای دینامیکی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در حضور شین‌های تزریق صفر

بدیهی است با اعمال قاعده چهارم مشاهده‌پذیری به منظور در نظر گرفتن اثر شین‌های تزریق توان صفر تعداد واحدهای فازوری مورد نیاز شبکه کاهش می‌یابد. به منظور مکان‌یابی چندمرحله‌ای پیشنهادی در این آزمون، شبکه‌های نمونه ۵۷ و ۱۱۸ شین IEEE در نظر گرفته شده است که اطلاعات مربوط به افق برنامه‌ریزی و همچنین، تعداد و مکان واحدهای فازوری مورد نیاز برای مشاهده‌پذیر ساختن آنها در مرحله نهایی (فرضیات مسأله) در جدول (۴) آورده شده است. همچنین، تعداد و مکان واحدهای فازوری مورد نیاز در مرحله آخر برنامه‌ریزی برای شبکه‌های ۵۷ و ۱۱۸ شین به ترتیب برابر با ۱۱ و ۲۹ شین و مطابق با مدل ارائه شده در [۲۲] در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از این آزمون در جدول (۵) گزارش شده است. نکته‌ای که در اینجا لازم است بدان توجه نمود، این است که تاکنون مطالعات اندکی در زمینه مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای اندازه‌گیری فازوری با در نظر گرفتن اثر شین‌های تزریق صفر صورت پذیرفته است. در [۱۶] برخلاف در نظر گرفتن اثر شین‌های تزریق صفر در مکان‌یابی تک مرحله‌ای، اثر این نوع شین‌ها در نتایج مکان‌یابی چندمرحله‌ای لحاظ نشده است. همچنین، در [۲۰] مکان‌یابی چندمرحله‌ای با در نظر گرفتن واحدهای فازوری بر روی شبکه‌های نمونه مشابه بررسی شده است که اخیراً در [۲۲] عدم مشاهده‌پذیری کامل برخی از شبکه‌های مطالعه شده و در نتیجه عدم جامعیت مدل ارائه شده

در ادامه این آزمون، مقصود این است که با استفاده از نتایج به‌دست آمده از جدول (۶) به عنوان ورودی مسأله، مکان‌یابی سه مرحله‌ای دینامیکی پیشنهادی بر روی شبکه ۵۷ شین IEEE بررسی شود. بدین منظور، تعداد واحدهای قابل نصب در مراحل اول تا آخر برنامه‌ریزی به ترتیب برابر با ۵، ۴ و ۵ واحد اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. در این صورت نتایج به‌دست آمده مطابق جدول (۷) است. همان‌گونه که از این جدول مشخص است، در مرحله اول با نصب پنج واحد فازوری با کدهای مشخصه N, M, F, E, C (مطابق با جدول (۶)) که به ترتیب بر روی شین‌های ۱۲، ۱۸، ۲۲، ۵۱ و ۵۴ قرار می‌گیرند می‌توان تعداد ۳۰ شین از ۵۷ شین سیستم را قابل رؤیت ساخت. در مرحله دوم نیز با مجهز نمودن شین‌های ۸، ۱۴، ۲۵، ۲۹ و ۳۶ به واحد اندازه‌گیری فازوری می‌توان به مشاهده‌پذیری ۴۵ شین دست یافت، اما باید توجه نمود که نصب واحدهای فازوری بر روی این پنج باس باید مطابق با کدهای مشخص مربوطه صورت پذیرد. برای نمونه، در صورت نصب واحد فازوری بر روی شین شماره ۸ باید توجه نمود تا سه کانال اندازه‌گیری این تجهیز مطابق کد مشخصه B شین‌های ۷، ۸ و ۹ را رصد کند (جدول (۶)).

محدودیت حداکثر کانال اندازه‌گیری برابر ۳ برای هر واحد اندازه‌گیری فازوری در حضور شین‌های توان تزریق صفر مطابق با جدول (۶) است. بر اساس نتایج گزارش شده در جدول (۶) لازم است در مرحله آخر برنامه‌ریزی ۱۴ واحد فازوری در این شبکه نصب گردد تا شبکه مشاهده‌پذیر کامل گردد (نتایج به‌دست آمده از نظر تعداد بهینه واحدهای فازوری مورد نیاز با آنچه در [۱۳] گزارش شده است، همخوانی دارد). شایان ذکر است که در جدول (۶) علاوه بر ذکر مکان‌های نصب تجهیزات اندازه‌گیری، مشخص شده است هر واحد فازوری بر اساس محدودیت حداکثر کانال اندازه‌گیری خود، کدام یک از شین‌های شبکه را مشاهده‌پذیر می‌سازد. برای مثال، از اولین ردیف این جدول پیداست که واحد اندازه‌گیری نصب شده بر روی شین ۲ با کد مشخصه A تنها قادر است شین‌های ۱، ۲ و ۳ را مشاهده‌پذیر سازد؛ و این تعداد دقیقاً برابر با حداکثر تعداد کانال اندازه‌گیری از پیش مشخص شده است. شایان ذکر است که مطالعات انجام شده در زمینه مکان‌یابی تک مرحله‌ای واحد فازوری با در نظر گرفتن محدودیت کانال‌های اندازه‌گیری، حداکثر تعداد کانال اندازه‌گیری برای این شبکه نمونه را برابر با ۲، ۳، ۴ و ۵ در نظر می‌گیرند [۱۳]. در این آزمون این عدد برابر با ۳ در نظر گرفته شده است.

جدول (۶): مکان‌یابی تک مرحله‌ای واحدهای فازوری برای شبکه ۵۷ شینه با در نظر گرفتن محدودیت حداکثر سه کانال اندازه‌گیری

کد مشخصه واحد فازوری	محل نصب واحد فازوری (شین i)	شین‌های قابل رؤیت توسط واحد نصب شده بر روی شین i	کد مشخصه واحد فازوری	محل نصب واحد فازوری (شین i)	شین‌های قابل رؤیت توسط واحد نصب شده بر روی شین i
A	۲	۱، ۲، ۳	H	۲۹	۲۸، ۲۹، ۵۲
B	۸	۷، ۸، ۹	I	۳۲	۳۱، ۳۳، ۳۴
C	۱۲	۱۲، ۱۶، ۱۷	J	۳۶	۳۵، ۳۷، ۴۰
D	۱۴	۱۳، ۱۴، ۱۵	K	۳۸	۴۴، ۴۸، ۴۹
E	۱۸	۴، ۱۸، ۱۹	L	۴۱	۴۱، ۴۲، ۴۳
F	۲۲	۲۲، ۲۳، ۳۸	M	۵۱	۱۰، ۵۰، ۵۱
G	۲۵	۲۴، ۲۵، ۳۰	N	۵۴	۵۳، ۵۴، ۵۵

*شین‌های ۵، ۶، ۱۱، ۲۰، ۲۱، ۲۶، ۲۷، ۳۲، ۳۶، ۳۹، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۵۶، ۵۷ به صورت غیرمستقیم و بر اثر شین‌های تزریق صفر قابل رؤیت هستند

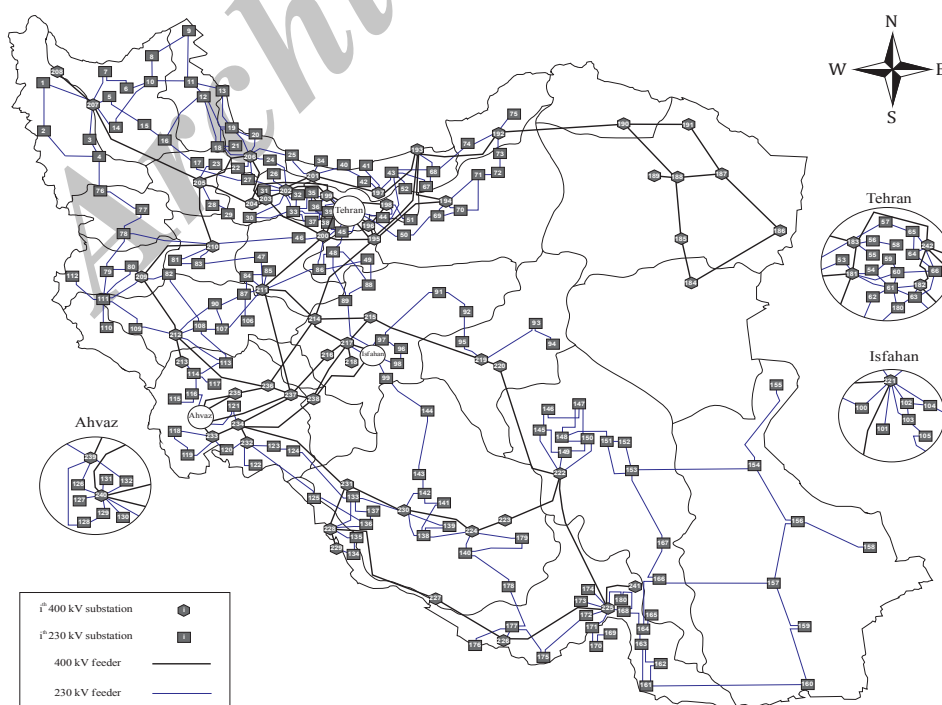
(قانون چهارم مشاهده‌پذیری).

جدول (۷): مکان‌یابی سه مرحله‌ای دینامیکی برای شبکه ۵۷ شینه با در نظر گرفتن محدودیت حداکثر سه کانال اندازه‌گیری

مرحله سوم		مرحله دوم		مرحله اول		مراحل برنامه‌ریزی
۴		۵		۵		تعداد واحد قابل نصب
تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر	کد مشخصه واحد نصب شده	تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر	کد مشخصه واحد نصب شده	شین‌های مشاهده‌پذیر	کد مشخصه واحد نصب شده	مکان‌یابی چند مرحله‌ای دینامیکی
تمامی شین‌ها مشاهده‌پذیر هستند	A, I, K, L	(۴۵ شین قابل رؤیت است) ۱۵, ۱۳, ۱۴, ۴, ۵, ۶, ۷, ۸, ۹, ۱۰, ۱۱, ۱۲, ۲۳, ۲۲, ۲۱, ۲۰, ۱۹, ۱۸, ۱۷, ۱۶, ۳۳, ۳۰, ۲۹, ۲۸, ۲۷, ۲۶, ۲۵, ۲۴, ۴۶, ۴۵, ۴۰, ۳۹, ۳۸, ۳۷, ۳۶, ۳۵, ۵۶, ۵۵, ۵۴, ۵۳, ۵۲, ۵۱, ۵۰, ۴۷, ۵۷	B, D, G, H, J	(۳۰ شین قابل رؤیت است) ۱۲, ۱۱, ۱۰, ۶, ۵, ۴, ۲۰, ۱۹, ۱۸, ۱۷, ۱۶, ۲۷, ۲۶, ۲۳, ۲۲, ۲۱, ۴۵, ۳۹, ۳۸, ۳۶, ۳۲, ۵۳, ۵۱, ۵۰, ۴۷, ۴۶, ۵۷, ۵۶, ۵۵, ۵۴	C, E, F, M, N	

یادگیر سلولی، مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در این شبکه صورت گرفته است. طبق مطالعات انجام شده در این مقاله، کمترین تعداد واحد فازوری که شبکه مذکور را در حالت عادی مشاهده‌پذیر کامل می‌سازد، بر اساس تابع هدف رابطه (۱) برابر ۶۵ واحد است که این تعداد قبلاً در [۲] و [۲۲]، ۷۱ واحد گزارش شده است. نتایج مربوط به این مکان‌یابی مطابق با جدول (۸) است.

(و) آزمون پنجم: مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای فازوری شبکه سراسری ۲۳۰ kv و ۴۰۰ kv انتقال ایران شبکه مورد مطالعه استفاده شده در این آزمون، شبکه واقعی سراسری ۲۳۰ kv و ۴۰۰ kv انتقال ایران در سال ۱۳۸۵ است که شامل ۲۴۲ شین و ۳۶۴ مسیر خط انتقال است. در شکل (۴) دیگرام تک خطی شبکه مذکور نشان داده شده است. در مرجع [۲] و [۲۲] با استفاده از روشی مبتنی بر اتوماتای



شکل (۴): شبکه انتقال ۲۳۰ kv و ۴۰۰ kv ایران (در سال ۱۳۸۵)

جدول (۸): مکان‌یابی واحد اندازه‌گیری فازوری به منظور مشاهده‌پذیری کامل در شبکه انتقال ایران (در سال ۱۳۸۵)

تعداد PMU	محل نصب واحدهای اندازه‌گیر فازوری	روش حل
۶۵	۴، ۱۰، ۱۱، ۱۶، ۲۱، ۲۸، ۳۳، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۰، ۵۴، ۵۶، ۶۱، ۷۱، ۷۸، ۸۷، ۸۸، ۹۲، ۹۳، ۹۸، ۹۹، ۱۰۸، ۱۱۱، ۱۱۴، ۱۱۶، ۱۳۳، ۱۳۵، ۱۳۸، ۱۴۰، ۱۴۲، ۱۴۷، ۱۵۳، ۱۵۴، ۱۵۶، ۱۶۰، ۱۶۳، ۱۶۴، ۱۷۰، ۱۷۷، ۱۸۳، ۱۸۴، ۱۸۸، ۱۹۰، ۱۹۲، ۱۹۷، ۲۰۱، ۲۰۲، ۲۰۵، ۲۰۶، ۲۰۷، ۲۱۰، ۲۱۱، ۲۱۴، ۲۱۷، ۲۲۱، ۲۲۲، ۲۲۵، ۲۲۸، ۲۳۲، ۲۳۳، ۲۳۹، ۲۴۰، ۲۴۲	روش پیشنهادی
۷۱	۴، ۹، ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۲۳، ۲۸، ۳۶، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۶، ۵۷، ۶۰، ۶۱، ۶۲، ۷۲، ۷۸، ۸۸، ۹۳، ۹۵، ۹۷، ۹۸، ۹۹، ۱۰۱، ۱۰۲، ۱۰۶، ۱۰۸، ۱۱۱، ۱۱۵، ۱۱۷، ۱۲۶، ۱۲۹، ۱۳۳، ۱۳۴، ۱۳۸، ۱۴۳، ۱۴۷، ۱۵۳، ۱۵۴، ۱۵۶، ۱۶۰، ۱۶۳، ۱۶۴، ۱۶۹، ۱۷۷، ۱۷۹، ۱۸۳، ۱۸۵، ۱۸۷، ۱۸۸، ۱۹۲، ۱۹۵، ۱۹۷، ۱۹۸، ۲۰۱، ۲۰۲، ۲۰۳، ۲۰۶، ۲۰۷، ۲۱۰، ۲۱۱، ۲۱۲، ۲۱۷، ۲۲۲، ۲۲۵، ۲۲۸، ۲۳۳، ۲۳۹، ۲۴۰	نتایج [۲] و [۲۲] (اتوماتای یادگیر سلولی)

جدول (۹): مکان‌یابی سه مرحله‌ای واحدهای فازوری برای شبکه سراسری انتقال ایران مبتنی بر روش پیشنهادی

مرحله سوم	مرحله دوم	مرحله اول	مراحل برنامه‌ریزی
۲۱	۲۲	۲۲	تعداد واحد قابل نصب
۱۰، ۲۱، ۲۸، ۳۳، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۰، ۵۴، ۵۶، ۷۸، ۸۷، ۸۸، ۹۸، ۱۱۶، ۱۳۳، ۱۳۵، ۱۵۴، ۱۶۳، ۱۷۰، ۱۹۰، ۱۹۷، ۲۰۱	۴، ۱۶، ۳۹، ۴۵، ۹۲، ۹۳، ۹۸، ۹۹، ۱۰۸، ۱۳۸، ۱۴۰، ۱۴۷، ۱۵۶، ۱۶۰، ۱۶۴، ۱۷۷، ۱۸۳، ۱۸۴، ۲۰۵، ۲۱۴، ۲۱۷، ۲۳۳، ۲۳۹	۱۱، ۴۳، ۶۱، ۷۱، ۱۱۱، ۱۱۴، ۱۴۲، ۱۵۳، ۱۸۸، ۱۹۲، ۲۰۲، ۲۰۶، ۲۰۷، ۲۱۰، ۲۱۱، ۲۲۱، ۲۲۲، ۲۲۵، ۲۲۸، ۲۳۲، ۲۴۰، ۲۴۲	مکان نصب واحدهای فازوری
۲۴۲	۲۱۲	۱۴۸	تعداد شین‌های مشاهده‌پذیر

جدول (۱۰): مکان‌یابی پنج مرحله‌ای واحدهای فازوری برای شبکه سراسری انتقال ایران مبتنی بر روش پیشنهادی

مرحله پنجم	مرحله چهارم	مرحله سوم	مرحله دوم	مرحله اول	مراحل برنامه‌ریزی
۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	تعداد واحد قابل نصب
۲۸، ۳۳، ۳۹، ۴۳، ۴۵، ۵۰، ۵۴، ۵۶، ۷۸، ۱۱۶، ۱۳۵، ۱۴۰، ۱۶۳، ۱۸۴، ۱۹۰، ۲۳۳	۲۱، ۲۸، ۳۳، ۳۹، ۴۵، ۵۰، ۵۴، ۵۶، ۷۸، ۸۷، ۹۸، ۱۱۶، ۱۳۳، ۱۳۵، ۱۵۴، ۱۶۰، ۱۷۰، ۲۳۳، ۲۳۹، ۲۴۰، ۲۴۲	۴، ۱۰، ۱۶، ۷۱، ۸۸، ۹۳، ۹۸، ۹۹، ۱۰۸، ۱۴۲، ۱۵۶، ۱۸۳، ۲۰۵، ۲۱۷	۱۱، ۳۹، ۴۳، ۹۲، ۱۱۴، ۱۳۸، ۱۴۷، ۱۵۳، ۱۷۷، ۱۶۴، ۲۲۲، ۲۱۰، ۱۸۸	۲۰۲، ۱۹۲، ۱۱۱، ۶۱، ۲۱۱، ۲۰۷، ۲۰۶، ۲۲۸، ۲۲۵، ۲۲۱، ۲۴۲، ۲۴۰، ۲۳۲	مکان نصب واحدهای فازوری
۲۴۲	۲۲۶	۲۰۱	۱۶۲	۱۰۵	شین‌های مشاهده‌پذیر

ارائه شده است.

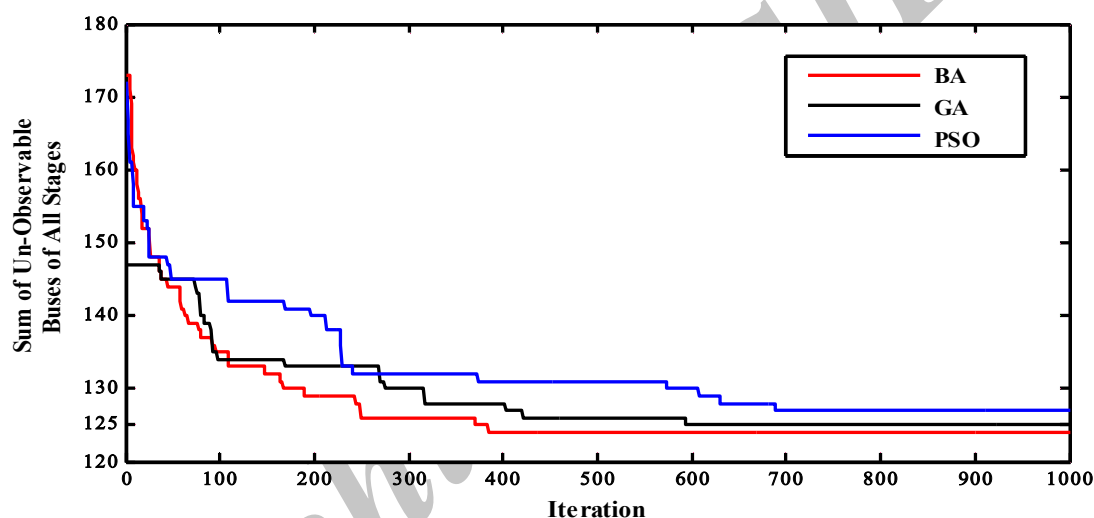
به منظور تحقیق درستی و توانمندی الگوریتم خفاش در دستیابی به پاسخ بهینه در رهیافت چندمرحله‌ای پیشنهادی، مکان‌یابی چندمرحله‌ای برای شبکه انتقال سراسری ایران در سه بازه زمانی، بار دیگر با استفاده از الگوریتم تجمع ذرات و ژنتیک

با توجه به قابل ملاحظه بودن هزینه این تعداد واحد فازوری و محدودیت‌های اقتصادی و ملاحظات فنی، مسأله مکان‌یابی چند مرحله‌ای دینامیکی در قالب دو طرح پیشنهادی که افق برنامه‌ریزی سه مرحله‌ای و پنج مرحله‌ای را شامل می‌شود، حل و نتایج مربوطه به ترتیب در جداول (۹) و (۱۰)

خفاش کمتر از ژنتیک و تجمع ذرات است؛ اما واضح است که این تمایز را نمی‌توان در این زمینه یک برتری دانست؛ چراکه مسأله مکان‌یابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در فاز طراحی مطرح می‌شود و عملاً یک برنامه‌ریزی آفلاین است. از این رو، دقت در دستیابی به پاسخ بهینه بسیار پراهمیت‌تر از زمان اجرای شبیه‌سازی است. شکل (۵) بهترین پاسخ به‌دست آمده از هر الگوریتم را از میان ۳۰ اجرای انجام شده نمایش می‌دهد. شایان ذکر است که محور افقی این شکل تکرارهای الگوریتم است که این تعداد برای هر الگوریتم ۱۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. همچنین، محور عمودی این شکل مجموع شین‌های رؤیت نشده در طول تمامی مراحل برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.

بررسی شده است. در این شبیه‌سازی، مکان‌یابی چندمرحله‌ای برای این شبکه با تعداد جمعیت اولیه و کدبندی یکسان مطابق با آزمون انجام شده توسط الگوریتم خفاش صورت گرفته است. در این مقایسه، مکان‌یابی انجام شده توسط هر الگوریتم ۳۰ مرتبه اجرا شده است که در نهایت نتایج به‌دست آمده از این شبیه‌سازی‌ها در جدول (۹) آمده است.

همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است، الگوریتم خفاش در دستیابی به جواب بهینه نسبت به دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری داشته است؛ چراکه علاوه بر پاسخ بهینه میانگین پاسخ‌های به‌دست آمده نیز از دو الگوریتم دیگر بهتر است. شایان ذکر است که زمان اجرای برنامه نیز توسط الگوریتم



شکل (۵): مقایسه بهترین پاسخ‌های به‌دست آمده از الگوریتم‌های خفاش، ژنتیک و تجمع ذرات از میان ۳۰ اجرای انجام شده به منظور مکان‌یابی سه مرحله‌ای شبکه سراسری انتقال ایران

جدول (۹): مقایسه نتایج مکان‌یابی سه مرحله‌ای واحدهای فازوری برای شبکه سراسری انتقال ایران توسط الگوریتم‌های خفاش، ژنتیک و تجمع ذرات در ۳۰ اجرا

مجموع شین‌های رؤیت نشده در طول تمامی مراحل برنامه‌ریزی			الگوریتم بهینه‌سازی
بدترین	میانگین	بهترین	
۱۲۸	۱۲۵/۹	۱۲۴	الگوریتم خفاش BA
۱۳۰	۱۲۷/۶	۱۲۵	الگوریتم ژنتیک GA
۱۳۶	۱۳۰/۶	۱۲۷	الگوریتم تجمع ذرات PSO

نیز افزایش مشاهده‌پذیری احتمالی سیستم قدرت بررسی شد. تاکنون در پژوهش‌های انجام شده در زمینه مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای فازوری، مکان‌یابی به ترتیب برای

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسأله مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحدهای فازوری به صورت دینامیکی به منظور افزایش مشاهده‌پذیری و

- Meeting, Vol. 2, pp. 943-946, 2004.
- [9] A. Enshae, R. A. Hooshmand, F. H. Fesharaki, "A new method for optimal placement of phasor measurement units to maintain full network observability under various contingencies," *Electric Power System Research*, Vol. 89, pp. 1-10, August 2012.
- [10] C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, N.R. Watson, "An optimal PMU placement method against measurement loss and branch outage," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 1, pp. 101-107, 2007.
- [11] R. Emami, A. Abur, "Robust Measurement Design by Placing Synchronized Phasor Measurements on Network Branches," *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 38 - 43, February 2010.
- [12] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, and A. Khodaei, "Observability enhancement by optimal PMU placement considering random power system outages," *Energy System*, Vol. 2, pp. 45-65, 2011.
- [13] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, "Contingency-Constrained PMU Placement in Power Networks," *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 25, No. 1, pp. 516-523, February 2010.
- [14] Q. Li, R. Negi, M. D. Ilic, "Phasor measurement units placement for power system state estimation- A greedy approach," *IEEE Conference, Power and Energy Society General Meeting*, pp 1 – 8, 2011.
- [15] A. Abur and A. G. Exposito, *Power system state estimation: theory and implementation*, New York, Marcel Dekker, 2004.
- [16] Devesh Dua, Sanjay Dambhare, Rajeev Kumar Gajbhiye, S. A. Soman, "Optimal Multistage Scheduling of PMU Placement- An ILP Approach," *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 23, No. 4, pp.1812-1820, January 2008.
- [17] R. Sodhi, S. C. Srivastava, S. N. Singh, "Multi-criteria decision-making approach for multistage optimal placement of phasor measurement units," *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 5, No. 2, pp. 181-190, 2011.
- [18] W. Bo, Q. Jiang, Y. Cao, "Transmission network fault location using sparse PMU measurements", *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, pp. 543-549, Nanjing, China, 6-7 April, 2009.
- [19] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, "Probabilistic Multistage PMU Placement in Electric Power Systems," *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 26, No. 2, pp. 841-849, April 2011.
- مراحل اول تا آخر صورت گرفته است. در این مقاله با ارائه یک تابع هدف جدید مسأله مکان‌یابی چندمرحله‌ای واحد فازوری به صورت همزمان و دینامیک فرمول‌بندی شد. از سوی دیگر، با توجه به پیچیدگی این مدل نسبت به مدل مرسوم از الگوریتم بهینه‌سازی خفاش برای بهبود تابع هدف پیشنهادی استفاده گردید. در پایان، با حل مسأله برای شبکه انتقال ایران و چندین شبکه نمونه نیز مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل ارائه شده با نتایج روش‌های دیگر در دو حوزه قطعی و احتمالی، کارایی مدل پیشنهادی نشان داده شد.

مراجع:

- [1] N. M. Manousakis, G. N. Korres, P. S. Georgilakis, "Taxonomy of PMU Placement Methodologies," *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 27, No. 2, pp. 1070-1077, May, 2012.
- [2] S. M. Mazhari, H. Monsef, H. Lesani, and A. Fereidunian, "A multi-objective PMU placement method considering measurement redundancy and observability value under contingencies," *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 28, No. 3, pp. 2136-2146, Aug, 2013..
- [3] Z. Zhao and E. B. Makram, "Optimal PMU Placement Considering Number of Analog Channels," *North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-5, 2011.
- [4] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 28, pp. 223-231, 2006.
- [5] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen, Jr., and R. Adapa, "Power system observability with minimal phasor measurement placement," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 707-715, May 1993.
- [6] F. Aminifar, C. Lucas, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units Using Immunity Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 24, No. 3, pp. 1014-1020, July 2009.
- [7] B. Gou, "Generalized Integer Linear Programming Formulation for Optimal PMU Placement," *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 23, No. 3, pp. 1099-1104, August 2008.
- [8] R. Xu and A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for system with PMUs", *IEEE Power Engineering Society General*

- Inspired Algorithm”. In: Gonz’alez, J. R., Pelta, D. A., Cruz, C., Terrazas, G., Krasnogor, N. (eds.) NCSO. Springer, Heidelberg, Vol. 284, pp. 65-74 2010.
- [25] X. S. Yang, Artificial Intelligence, Evolutionary Computing and Metaheuristic Studies in Computational Intelligence, Springer Publishing Vol 427, pp. 421-434, 2013.
- [26] Power Systems Test Case Archive. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/index.html>.
- [27] M. O. Buygi, G. Balzer, H. M. Shanechi, and M. Shahidehpour, “Market-based transmission expansion planning,” IEEE Transactions on power Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 2060–2067, 2004.
- [20] S. M. Mahaei, M. T. Hagh, “Minimizing the number of PMUs and their optimal placement in power systems,” Electric Power System Research, Vol. 83, No. 1, pp. 66–72, 2012.
- [21] R. E. Kalman, “Mathematical Description of Linear Dynamical System,” SIAM Journal on Control and Optimization, vol. 1. No. 2, pp. 152-192, 1963.
- [22] S. M. Mazhari, H. Monsef, H. Lesani, A. Fereidunian, “A Multi-Objective PMU Placement Method Considering Measurement Redundancy and Observability Value Under Contingencies,” Transactions on power systems, Vol. 28, No. 3, pp. 2136–2146, Aug. 2013.
- [23] X. S. Yang, Nature-Inspired Metaheuristic algorithms, 2nd edn. Luniver Press, UK (2010).
- [24] X. S. Yang, “A New Metaheuristic Bat-

¹ Supervisory Control and Data Acquisition

² Remote Terminal Units

³ Global Positioning System

⁴ Wide Area Monitoring Protection and Control

⁵ Phasor Measurement Unit

⁶ Tie Line

⁷ Sparse Location

⁸ Analytic Hierarchy Process

⁹ Solver

¹⁰ Bat Algorithm

Archive of SID