

جایابی بهینه‌ی چندهدفه واحدهای اندازه‌گیری فازوری با در نظر گرفتن محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری و اثر شین تزریق صفر و ترانسفورماتورها

سجاد احمدی^۱ هامون پورروشنفکر عربانی^۲ دنیا آشتیانی حقیقی^۳ جوزپ ام گوئررو^۴
یزدان اشگواری^۵ عادل اکبری مجد^۶

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کونکوردیا - مونترال - کبک - کانادا

sajadahmadi2647@gmail.com

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد- گروه تکنولوژی انرژی - دانشگاه آلبورگ - آلبورگ شرقی ۹۲۲۰- دانمارک

pr.roshanfekr@gmail.com

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه ویکتوریا - ویکتوریا - کانادا

d.ashtiani.h@gmail.com

۴- استاد- گروه تکنولوژی انرژی - دانشگاه آلبورگ - آلبورگ شرقی ۹۲۲۰ - دانمارک

joz@et.aau.dk

۵- مربی- گروه مهندسی برق قدرت - واحد اردبیل - دانشگاه آزاد اسلامی - اردبیل - ایران

ashgevari.yazdan@gmail.com

۶- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران

akbarimajd@gmail.com

چکیده: در این مقاله، جایابی بهینه‌ی چندهدفه‌ی واحدهای اندازه‌گیر فازوری در سیستم قدرت ارائه می‌شود که دو هدف را به‌طور همزمان بهینه می‌کند. هدف اول کمینه‌کردن هزینه کلی نصب تجهیزات که معادل کمینه‌کردن تعداد واحدهای اندازه‌گیر فازوری نصب شده در شبکه، و هدف دوم بیشینه‌کردن شاخص افزونگی اندازه‌گیری سیستم که معادل بیشینه کردن قابلیت اطمینان سیستم است. همچنین در این تحقیق مسئله‌ی تأثیر محدودیت تعداد کانال‌های اندازه‌گیری واحدهای اندازه‌گیر فازوری و اثر شین تزریق صفر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سیستم‌های قدرت، تپ ترانسفورماتور به عنوان یکی از ابزارهای تنظیم ولتاژ شبکه بکار می‌رود که در اکثر مواقع سیگنال تغییر این پارامتر به مرکز کنترل شبکه ارسال نمی‌شود. این امر موجب اختلال جدی در عملکرد برنامه تخمین حالت می‌گردد. در نتیجه مشاهده‌پذیری تپ ترانسفورمر باید در مسئله‌ی جایابی واحدهای اندازه‌گیر فازوری در سیستم قدرت لحاظ گردد. بدین منظور یک شین مجازی به شبکه اضافه شده تا بتوان تپ متغیر ترانسفورمر را در آن مدل نمود. با توجه به مزایای روش‌های فراابتکاری از الگوریتم گرگ خاکستری با ساختار چندهدفه مبتنی بر مفهوم غلبه و بهینه‌ی پارتو برای حل مسئله استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: واحدهای اندازه‌گیری فازور، افزونگی اندازه‌گیری، محدودیت تعداد کانال، شین تزریق صفر، الگوریتم گرگ خاکستری

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.9

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۲/۳۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۴/۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عادل اکبری مجد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - اردبیل - خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ساختارهای زیربنایی مطرح هستند؛ عملکرد مطمئن و ایمن در سیستم‌های قدرت مدرن، علی‌رغم افزایش تقاضا و افزایش ارتباطات در شبکه میان مصرف‌کننده، سیستم‌های انتقال و تولید، افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و شرایط بازار انرژی تجدید ساختار یافته از مهم‌ترین نیازهای روزمره به شمار می‌رود. با توجه به گستردگی و به هم پیوستگی شبکه‌های قدرت و فاصله‌ی زیاد منابع تولید از مصرف، دسترسی لحظه به لحظه به اطلاعات کل شبکه در یک مرکز پایش متمرکز با دشواری‌های زیادی همراه است. همچنین با توجه به پیچیدگی آن، در بسیاری از مواقع، وقوع حادثه در بخشی از شبکه بر عملکرد سیستم تأثیر بسزایی دارد، از این رو پایش و داشتن اطلاعات به‌هنگام از مکان‌ها و اجزای مختلف سیستم قدرت، امری ضروری به نظر می‌رسد. با گسترش روزافزون شبکه‌ی قدرت در سال‌های اخیر و پیدایش مشکلات و محدودیت‌های جدید در کنترل و بهره‌برداری از آن، نیاز به سیستم‌های پایش و کنترل جدید در آن احساس می‌شود. سیستم‌های پایش موجود مانند SCADA/EMS به دلیل کندی، امکان پایش شرایط گذرای دینامیکی را ندارند. به همین دلیل از داده‌های آنها تنها در پایش حالت مانای شبکه استفاده می‌شود. واحدهای اندازه‌گیر فازوری (PMU) که فازور ولتاژ، فازور جریان، و فرکانس را با نرخ نمونه‌برداری و دقت بالا اندازه‌گیری می‌کنند، در راستای ارتقای ابزارهای موجود برای پایش و کنترل شبکه به‌وجود آمده‌اند. برای PMU می‌توان کاربردهای فراوانی را در نظر گرفت که مهم‌ترین آنها تخمین حالت، کنترل و حفاظت ناحیه وسیع، پایش و پیش‌بینی انواع ناپایداری‌ها و اعتبارسنجی مدل است [۱-۳]. شرکت‌های برق به این نتیجه رسیده‌اند که به یک سیستم دارای پایش، حفاظت و کنترل گسترده نیاز مبرم دارند. تکنولوژی اندازه‌گیری فازوری سنکرون این پتانسیل را داراست که استخوان‌بندی اصلی این سیستم را تشکیل دهد [۴،۵].

الف) ساختار واحدهای اندازه‌گیر فازوری

ساختار اصلی یک واحد اندازه‌گیری فازوری از یک پردازشگر سیگنال دیجیتال تشکیل شده است. این پردازشگر دیجیتالی از سیگنال‌های ولتاژ و جریان نمونه‌برداری می‌کند. کمیت‌های آنالوگ ولتاژ و جریان قبل از نمونه‌برداری از یک فیلتر ضد تداخل عبور داده می‌شود تا به این ترتیب فرکانس‌های گذرا از اطلاعات اصلی سیگنال‌های ولتاژ و جریان حذف شود. سپس توسط مبدل، اطلاعات آنالوگ به داده‌های دیجیتال تبدیل می‌شود. سایر کمیت‌های الکتریکی از قبیل توان اکتیو و راکتیو و غیره توسط پردازشگر دیجیتال محاسبه می‌شود و به پردازشگر محلی و یا منطقه‌ای ارسال می‌شود [۶].

ب) رویت پذیری سیستم قدرت

به‌طور کلی رویت‌پذیری سیستم قدرت به معنی محاسبه متغیرهای شبکه به‌منظور تخمین حالت سیستم است و در صورتی که تخمین

حالت شبکه با مشکل همراه باشد، شبکه رویت‌پذیر نخواهد بود. متغیرهای شبکه معمولاً فازور ولتاژ شین‌ها تلقی می‌شوند. بنابراین شین‌هایی که در آنها واحد اندازه‌گیری فازوری نصب شده است دارای رویت‌پذیری مستقیم هستند و شین‌هایی که به شین دارای واحد اندازه‌گیری فازوری متصل هستند دارای رویت‌پذیری غیرمستقیم هستند و شین‌هایی که ارتباطی با شین واحد اندازه‌گیری فازوری ندارند، غیر رویت‌پذیر هستند. دو رهیافت کلی در مورد تحلیل رویت-پذیری وجود دارد که عبارتند از رویت‌پذیر عددی و توپولوژیکی. در سیستم‌های اندازه‌گیری مبتنی بر PMU، رویت‌پذیری توپولوژیکی بسیار ساده و سریع انجام می‌گیرد و به این دلیل است که اغلب مقالات مرتبط از همین روش بهره‌برده‌اند [۷-۹]. در ادامه جنبه‌های مختلف مسئله جایابی بهینه PMU تشریح می‌شود. در مسئله‌ی جایابی بهینه PMU، تابع هدف مسئله کمینه‌کردن تعداد PMU ها و تعیین محل نصب آنها باتوجه به رویت‌پذیری کامل شبکه است. تعداد اندکی از منابع مسئله‌ی جایابی بهینه PMU را با طرح مفهوم رویت‌پذیری ناقص حل کرده‌اند [۷]. هدف آنها کاستن تعداد PMU مورد نیاز شبکه نسبت به حالت رویت‌پذیری کامل است؛ که دلیل این امر را هزینه‌ی بالای نصب PMU در سیستم عنوان کرده‌اند. این منابع جایابی بهینه PMU را به‌گونه‌ای انجام می‌دهند که رویت‌ناپذیری شبکه از مرتبه‌ی معینی بیشتر نباشد. رویت‌ناپذیری قسمتی از شبکه‌ی قدرت، امکان پایش و کنترل را برای بهره‌بردار سیستم در بخش مربوطه محدود کرده و ممکن است با وقوع پیشامدهای متوالی زمینه‌ساز خاموشی بخشی از شبکه یا خاموشی سراسری باشد. لذا شرایط رویت‌ناپذیری از دیدگاه بهره‌برداری نامطلوب بوده و ممکن است خسارات سنگینی به-همراه داشته باشد. ارزیابی امنیت یک سیستم قدرت بدون مدل‌سازی پیشامدهای مربوط به زیرساخت مخابراتی آن صحیح نبوده و نتایج آن دور از واقعیت است [۱۰، ۱۱، ۱۳]. اگر چه این مسئله جایابی از نظر تعداد PMU یک جواب بهینه سراسری دارد؛ لیکن طرح جاگذاری این PMU ها در غالب شبکه‌ها یکتا نبوده و به‌عبارت دیگر مسئله از نظر محل نصب PMU ها چندپاسخی است. اکثر مقالات جایابی بهینه PMU به این دشواری اشاره‌ای نمی‌کنند و تنها معدودی از مقالات برای تمایز بین این پاسخ‌ها، شاخص‌هایی بر اساس بیشینه‌بودن افزونگی اندازه‌گیری را ارائه کرده‌اند. این نوع شاخص‌ها پایه محاسباتی قطعی دارند و مطالعات عددی روش شبکه‌های مختلف آشکار می‌کنند که لزوماً نتایج حاصل از این نوع شاخص‌ها یکتا نیستند [۱۰].

مشخصه افزونگی حالتی از سیستم است که در یکی از قطعات مانند واحدهای اندازه‌گیری فازور یا خطوط انتقال شبکه نقص فنی رخ دهد. در برخی مسائل وقوع چند رخداد به طور همزمان نیز بررسی می‌شود [۸، ۱۳]. در ادامه به بررسی مقالات اخیر در زمینه‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای اندازه‌گیری فازور با استفاده از روش حل مبتنی الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف خواهیم پرداخت. در [۱۴] تحقیقی کمینه‌سازی تعداد PMU ها به‌منظور دستیابی به رویت‌پذیری کامل

سیستم و بهینه‌سازی افزونگی اندازه‌گیری به علت تخمین حالت را به- عنوان یک بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی BBO چند هدفه ارائه داده است. از آنجا که هیچ راه‌حل بهینه‌ی تکی در این روش بهینه‌سازی وجود ندارد، از مرتب‌سازی غیرغالب و تابع تراکم به منظور فراهم کردن راه‌حل‌های بهینه‌ی پارتو استفاده شده است و از تصمیم- گیری مبتنی بر اپراتور فازی برای دستیابی به بهترین راه‌حل استفاده شده است. در [۱۵] روش مبتنی بر الگوریتم رقابت استعماری باینری را برای حل جایابی بهینه‌ی PMU به منظور دستیابی به رؤیت- پذیری کامل شبکه و همچنین بهینه‌سازی افزونگی اندازه‌گیری ارائه کرده- اند. رویکرد پیشنهادی موقعیت‌های مختلفی هم‌چون خارج شدن شاخه‌ی تکی یا خرابی PMU و همچنین شین‌های تزریق صفر در نظر گرفته است. قاعده‌ی جدیدی برای رؤیت‌پذیری توپولوژیکی ارائه شده است که رؤیت‌پذیری گروه شین‌های تزریق صفر را تضمین می‌کند که باعث رؤیت‌پذیری شبکه شده و به تعداد کمتری از PMU نیاز باشد. در [۱۶] رویکردی مبتنی بر تئوری اطلاعات را برای حل مسئله جا- یابی بهینه‌ی PMU با در نظر گرفتن دستیابی به رؤیت‌پذیری کامل شبکه و همچنین مدل‌سازی نامعینی‌ها در حالت‌های سیستم ارائه داده‌اند که از اطلاعات دوطرفه بین اندازه‌گیری PMU و حالت‌های شبکه استفاده می‌کند. از آنجایی که مدل DC تحلیلی سیستم قدرت مبنای ضابطه‌ی اطلاعات دوطرفه است، در این روش از این مدل بهره گرفته شده است. در [۱۷] تخمین‌گر حالت جدید برای کمینه‌کردن اندازه‌ی پیکربندی PMU ارائه داده‌اند که رؤیت‌پذیری کامل شبکه را فراهم می‌کند. رویکرد پیشنهادی ابتدا بهترین پیکربندی از PMUها برای رؤیت‌پذیری پیدا می‌کند سپس از الگوریتم بهینه‌سازی مگس میوه بهبودیافته برای حل مساله استفاده شده است. به علت در نظر نگرفتن شین‌های تزریق صفر و همچنین لحاظ نکردن خرابی PMU و خارج- شدن خط و تغییر توپولوژی سیستم پاسخ‌های بدست آمده نسبت به اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها مقاوم نیستند. در [۱۸] از الگوریتم جستجوی هارمونی باینری بهبود یافته برای جایابی بهینه‌ی PMU ها به منظور رؤیت‌پذیری کامل شبکه‌ی قدرت استفاده کرده‌اند. در رویکرد بهینه‌سازی پیشنهادی هزینه‌ی نصب PMUها در مکان‌های مختلف، متفاوت در نظر گرفته شده، که این تفاوت مربوط تعداد شاخه‌های متصل به محل شین نصب شده است. در [۱۹] الگوریتم بهینه‌سازی جدیدی را براساس ترکیب تئوری گراف و الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی PMU ارائه داده‌اند. رویکرد پیشنهادی به- منظور رؤیت‌پذیری کامل سیستم قدرت دارای هزینه محاسباتی کمی است. با توجه به چهار قاعده‌ی بازسازی توپولوژی و سه قاعده‌ی پیکربندی PMU براساس روابط گرافیکی بین PMUها، قیود جایابی PMU از طریق تحلیل قیود توپولوژی مطرح می‌کند، که به‌طور چشمگیری فضای حل ممکن را محدود می‌کند، در نتیجه سرعت همگرایی الگوریتم افزایش می‌یابد. همچنین الگوریتم ژنتیک ارتقا یافته مبتنی بر کدینگ عددی سری ارائه شده است که عملکرد کلی بهینه-

سازی را بهبود می‌دهد. در [۲۰] رویکردی دو مرحله‌ای را برای حل مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی PMU پیشنهاد داده‌اند. مرحله‌ی اول الگوریتم پیشنهادی سریعاً مجموعه‌ای از محل‌های منتخب PMUها را براساس رویکرد تجزیه تئوری گراف برای مسئله‌ی غلبه‌ی قدرت در گراف‌های نوع درخت شناسایی می‌کند. سپس، از روش فراابتکاری جستجوی محلی به منظور پیدا کردن کمترین تعداد PMU مورد نیاز به منظور رؤیت‌پذیری سیستم در مرحله‌ی دوم استفاده می‌شود. معایب روش پیشنهادی در نظر نگرفتن خرابی PMU ها و خارج شدن خطوط است که منجر می‌شود حساسیت روش نسبت به اغتشاشات افزایش یابد. در [۲۱] الگوریتم ژنتیک بهبود یافته‌ای را به منظور جا- یابی بهینه‌ی PMUها ارائه کرده‌اند. در رویکرد پیشنهادی فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی توسعه داده شده و مفاهیم جدید افزونگی اندازه- گیری و ارزیابی رؤیت‌پذیری تحت هر دو موقعیت عادی و اغتشاش، تعریف و به مدل اضافه شده است. در [۲۲] الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر PSO باینری برای تعیین تعداد کمینه و محل مناسب PMUها در شبکه‌ی قدرت به منظور رؤیت‌پذیری کامل ارائه داده‌اند. در رویکرد پیشنهادی شین‌های تزریق صفر و شین‌های شعاعی لحاظ شده است. اما شرایط اغتشاش و موارد خارج شدن خطوط و خرابی PMU در نظر گرفته نشده است. در [۲۳] یک فرمول جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری اصلاح شده و مؤثر با توجه به احتمالات و محدودیت‌های مختلف با هدف به حداقل رساندن تعداد مورد نیاز نصب PMU و دستیابی به حداکثر تعداد افزونگی اندازه‌گیری که در معرض دید کامل شبکه قرار دارد ارائه شده است. در دسترس بودن کانال‌ها در هر PMU و حضور شین تزریق صفر نیز در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، آسیب پذیری PMU به همراه احتمال قطع خط نیز در نظر گرفته شده است. در [۲۴] یک روش کلی برای حل مشکل مکانیابی واحد اندازه‌گیری فازور ارائه شده است. در این مطالعه، مسئله محل قرار گیری PMU مبتنی بر ماتریس اتصال ابتدا به صورت عدد صحیح باینری تنظیم شده است. در مرحله بعد، تغییرات پس از اختلال در سیستم‌های قدرت با مسئله قرارگیری متعارف یکپارچه می‌شوند تا از نظارت دقیق تر قبل و بعد از اغتشاش سیستم‌های قدرت اطمینان حاصل شود. علاوه بر این، این الگوریتم برای دستیابی به بالاترین قابلیت اطمینان ممکن برای خاموشی‌های خط انتقال، یعنی موارد احتمالی $N - 1$ ، به عنوان جنبه توپولوژی توسعه یافته است. سایر موضوعات مرتبط با توپولوژی، از جمله شین تزریق صفر، محدودیت کانال PMU و اندازه‌گیری از قبل موجود و در فرمول جدید نیز گنجانده شده است. در [۲۵] یک روش چند مرحله‌ای با استفاده از محل نصب حداکثر واحدهای اندازه‌گیری فازور با در نظر گرفتن در دسترس بودن کانال‌های اندازه‌گیری، برای قابلیت مشاهده کامل ارایه شده است. به منظور حل مسئله بهینه‌سازی، از یک روش بهینه دو مرحله استفاده شده است. در مرحله ۱، الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه برای یافتن تعداد بهینه و مکان‌های PMU

مطالعه تاکنون در کارهای پژوهشی بررسی نشده است. در تحقیقات پیشین فرض شده است که با نصب PMU در یک شین و با اندازه‌گیری جریان شاخه‌ی متصل به آن شین با استفاده از ماتریس امپدانس سیستم، فازور ولتاژ تمام شین‌های متصل به شینی که PMU در آن نصب شده، قابل مشاهده است به عبارت دیگر اثر محدودیت کانال PMU در نظر گرفته نشده است. در این تحقیق با تعریف متغیرهای کمکی که نشان‌دهنده‌ی مشاهده‌پذیر بودن شین‌ها از طریق نصب PMU در آنها است، محدودیت تعداد کانال PMU در مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی PMU در نظر گرفته خواهد شد. همچنین برای حل مسئله در هر دو حالت تک‌هدفه و دوهدفه از الگوریتم گرگ خاکستری استفاده شده است که ساختار چندهدفه‌ی آن مبتنی بر مفهوم غلبه و معیار پارتو پیاده‌سازی گشته و برای حل مساله استفاده شده است.

با توجه به مطالب بیان شده نوآوری‌های این پژوهش عبارتند از:

- ❖ تعریف مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای اندازه‌گیری فازوری به صورت دوهدفه به منظور کمینه‌سازی تعداد PMU‌های نصب شده برای مشاهده‌پذیری کامل سیستم مورد مطالعه و بیشینه‌کردن شاخص افزونگی اندازه‌گیری با در نظر گرفتن محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری، اثر شین تزریق صفر و رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور
- ❖ حل مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده به جای ارائه‌ی یک چیدمان از PMU‌ها، مجموعه‌ای از چیدمان‌ها با هزینه‌ی نصب مختلف از لحاظ تعداد PMU‌ها در سطوح مختلف شاخص افزونگی اندازه‌گیری را در اختیار تصمیم‌گیران و سیستم مدیریت و کنترل شبکه قدرت قرار می‌دهد.
- ❖ از الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری و به منظور حل مسئله و دستیابی به جواب‌های بهینه‌ی پارتو در حالت دوهدفه استفاده خواهد شد.

۲- تعریف ریاضی مساله و روش حل

هدف از مسئله‌ی جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور، یافتن کمترین تعداد لازم و چیدمان مناسب برای نصب این دستگاه روی شین‌های شبکه بوده به طوری که تضمین کند تمامی شبکه رؤیت‌پذیر گشته و تمامی شین‌ها حداقل از طریق یک واحد اندازه‌گیری فازور تحت پوشش قرار گرفته شده باشند به طوری که رؤیت‌پذیری کامل شبکه برآورده شود. در این تحقیق مدل چند هدفه جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور ارائه می‌شود. مدل ارائه شده، دو هدف را به طور همزمان بهینه می‌کند:

- ۱) کمینه‌کردن هزینه کلی که معادل کمینه کردن تعداد PMU های نصب شده در شبکه است.
 - ۲) بیشینه‌کردن افزونگی اندازه‌گیری سیستم که معادل بیشینه کردن قابلیت اطمینان سیستم است.
- در این ادامه یک مدل دوهدفه دیگر برای مسئله جایابی PMU

ها با توجه به کانال‌های اندازه‌گیری و به حداکثر رساندن اندازه‌گیری استفاده شده است. در مرحله ۲، حداقل تعداد کانال‌های اندازه‌گیری PMU با استفاده از استراتژی کاهش پیشنهادی با مشاهده کامل پیشنهاد شده است. در [۲۶] یک روش مبتنی بر کانال چند منظوره برای تخصیص بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری، کانال‌های اندازه‌گیری PMU و اندازه‌گیری جریان برای مشاهده‌پذیری سیستم قدرت ارائه شده است. عملکرد اصلی شامل هزینه واحدهای پایه PMU و کانال‌های اندازه‌گیری آنها و همچنین اندازه‌گیری جریان است. برخلاف روش‌های قبلی، کانال‌های PMU به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی باینری مدل سازی شده اند. تابع هدف دوم افزونگی اندازه‌گیری را در شین‌های انتخاب شده به روشی کنترل شده بیشتر می‌کند. در [۲۷] روش جایابی ارائه شده در درجه اول یک مشکل بهینه‌سازی خطی باینری است که محدودیت‌های مختلفی در آن تعریف شده است، در حالی که مشاهده کامل سیستم نیز تضمین می‌شود. برای در نظر گرفتن محدودیت تعداد کانال‌های PMU، یک رویکرد دو سطح جدید نیز در این مقاله ارائه شده است، که در آن سطح بالایی با هدف یافتن بهترین راه حل در بین ماتریس‌های مختلف وجود دارد، در حالی که سطح پایین بهترین PMU را پیدا می‌کند. در [۲۸] یک روش تعقیب تطبیق برای شناسایی پارامترهای مهم با دقت بسیار خوب و در زمان کوتاه تر ارائه شده است. به منظور نشان دادن اثربخشی الگوریتم پیشنهادی، این روش بر روی یک ژنراتور غیرخطی اعمال و سیگنال‌های مورد نیاز با استفاده از یک واحد اندازه‌گیری فازوری نمونه برداری شده است. در [۲۹] الگوی جامع برای جایابی خطا در خطوط دو مداره و چند پایانه‌ای، مبتنی بر اطلاعات فازوری واحدهای اندازه‌گیری فازوری و مدل گسترده خطوط نمونه شبکه انتقال ایران ارائه شده است. تمام عوامل تأثیرگذار از جمله وجود منبع در انشعابات، اختلاف فاز و تفاوت امپدانس منابع، تزویج متقابل، عدم جابجایی خط، بار نامتقارن، انواع خطا، خطاهای بین دو مدار، وقوع دو خطای همزمان و پیشامد عدم دسترسی به داده‌های یک واحد اندازه‌گیری فازوری در نظر گرفته شده است. در [۳۰] با استفاده از داده‌های واحد‌های اندازه‌گیری فازوری پارامترهای الکترومکانیکی ژنراتور و راکتانس آن با استفاده از روش‌های حداقل مربعات بازگشتی و فیلتر کالمن تخمین زده شده است. در [۳۱] اطلاعات بدست آمده از طریق ثبت کننده‌های موجود و واحدهای اندازه‌گیری فازوری جدید نصب شده در شبکه واقعی، از وقوع چندین حادثه بزرگ در شبکه با کمک روش‌های محاسباتی برای یافتن پارامترهای ذاتی شبکه سراسری ایران استفاده شده است. هدف اصلی این پژوهش حل مسأله جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازور به صورت دوهدفه به منظور کمینه‌کردن تعداد واحدهای اندازه‌گیری فازور لازم برای بیشینه‌کردن شاخص افزونگی اندازه‌گیری با در نظر گرفتن محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری، اثر شین تزریق صفر و رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور با شرط مشاهده‌پذیری کامل سیستم قدرت مورد

KCL روی شین مجهز به اندازه‌گیر تزریق صفر محاسبه شده و شین مذکور نیز رؤیت‌پذیر می‌گردد. بدین صورت با وجود اندازه‌گیر تزریق صفر کل شبکه می‌تواند با تعداد PMU های کمتری رؤیت‌پذیر گردد.

۲-۲- محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری

با توجه به اینکه واحدهای اندازه‌گیر فازرویی با تعداد کانال ورودی متفاوت ساخته می‌شوند، هزینه‌ی خرید آنها متفاوت خواهد بود. به طوری که هزینه افزایش کانال ورودی حدود ۲۰ درصد هزینه‌ی خود واحد PMU است [۲۴]. بنابراین برای جلوگیری از هزینه‌های خرید اضافی باید مسئله‌ی جایابی واحدهای اندازه‌گیر فازرویی با قید محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گیرد. اگرچه با افزایش تعداد کانال میزان مشاهده پذیری کامل افزایش می‌یابد، ولی PMU ها با تعداد محدودی کانال ساخته می‌شوند و قیمت آنها براساس تعداد کانال آنها متغیر است. با بررسی سایر مقالات می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نصب PMU هایی با بیش از چهار کانال باعث کاهش تعداد لازم PMU ها برای استفاده در شبکه نمی‌شود و در عوض هزینه تولید را افزایش می‌دهد. با این حال محدودیت تعداد کانال به دلیل وجود اندازه‌گیرهای پسیو، خرابی PMU ها و یا قطع خطوط در بیشتر مطالعات در نظر گرفته نشده است [۲۳]. بنابراین تابع هدف اول مسئله به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\min F_1 = \min \sum_{i \in I} (1+0.2nc_i)x_i \quad (4)$$

۳-۲- رویت پذیری تپ ترانسفورماتور

در سیستم‌های قدرت واقعی، سطوح ولتاژ زیادی وجود دارد و تنظیم تپ ترانسفورماتور بین ولتاژهای مختلف معمولاً نامشخص است. بنابراین، سطح ولتاژ مختلف از دیدگاه رؤیت‌پذیری متفاوت هستند. در یک شبکه‌ی قدرت، اکثر مواقع سیگنال تغییر این پارامتر به مرکز کنترل شبکه ارسال نمی‌شود؛ که این امر موجب اختلال جدی در عملکرد برنامه تخمین حالت می‌گردد. در نتیجه رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورمر باید در برنامه تخمین حالت دیده شود [۳۳، ۳۲]. فرض می‌شود که ترانسفورماتور با تپ متغیر در شاخه‌ی p-q وجود داشته باشد. شایان ذکر است که وقتی تنظیم تپ ترانسفورماتور موجود در شاخه‌ی p-q ثابت باشد، رؤیت‌پذیری ولتاژهای شین‌های p و q منجر به رؤیت‌پذیری جریان شاخه‌ی p-q می‌شود. اما، در صورت متغیر بودن تپ ترانسفورماتور، رؤیت‌پذیری جریان شاخه‌ی p-q، نمی‌تواند به‌طور مستقیم از رؤیت‌پذیری ولتاژ شین‌های p و q حاصل شود. به‌منظور در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری جریان شاخه‌ی p-q، یک شین مجازی p' بین شین‌های p و q در گراف شبکه قرار داده می‌شود. وقتی که جریان هر کدام از شاخه‌های $p - p'$ یا $q' - q$ رؤیت‌پذیر باشد، ولتاژ شین مجازی p' رؤیت‌پذیر خواهد شد و بالعکس. از آنجایی که جریان تزریق شده به شاخه‌ی p-q از شین p با جریان تزریقی از شین q متفاوت است، شین مجازی p' باید به‌عنوان یک شین تزریق غیرصفر در نظر

ارائه می‌شود. در این بخش فرمولاسیون ریاضی مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای اندازه‌گیر فازور به‌صورت دوهدفه توصیف می‌گردد. توابع هدف، محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم‌گیری، ثابت‌ها و نمایه‌های استفاده شده در مدل ریاضی نیز در این بخش معرفی می‌شوند [۱۴].

الف) کمینه‌کردن تعداد PMU ها

در این مطالعه تابع هدف اول هزینه بوده که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\min F_1 = \min \sum_{i \in I} x_i \quad (1)$$

که در آن F_1 تابع هدف اول و x_i همانطور متغیر باینری بوده که وجود یا عدم وجود PMU را روی شین i ام نشان می‌دهد. همچنین I نمایانگر مجموعه‌ی تمامی شین‌های شبکه بوده که بدین صورت می‌باشد $I = \{1, 2, \dots, N\}$ که N تعداد کل شین‌های شبکه است.

ب) بیشینه‌کردن افزونگی اندازه‌گیری

تابع هدف دوم مربوط به افزونگی اندازه‌گیری سیستم است. مشخصه افزونگی برای حالتی از سیستم تعریف می‌شود که در یکی از قطعات مانند واحدهای اندازه‌گیری فازور یا خطوط انتقال شبکه نقص فنی رخ دهد. در این پژوهش، مشخصه افزونگی اندازه‌گیری، به قابل رؤیت بودن یک شین در صورت خروج یک PMU و یک خط انتقال به طور همزمان اطلاق می‌شود. یعنی اگر شین i ام پس از خروج یک به یک PMU ها و خطوط انتقال شبکه به طور همزمان، باز هم رؤیت‌پذیر بود، مشخصه افزونگی برای این شین یک بوده و در غیر این صورت صفر می‌گردد. اگر مشخصه افزونگی مربوط به شین i ام را با r_i نشان دهیم، هدف دوم مسئله بیشینه‌کردن این مشخصه برای تمامی شین‌ها است.

$$\max F_2 = \sum_{i \in I} r_i \quad (2)$$

که این امر معادل کمینه‌کردن تعداد شین‌های بدون افزونگی است:

$$\min F_2 = N - \sum_{i \in I} r_i \quad (3)$$

که در آن N تعداد کل شین‌های شبکه است.

۲-۱- تاثیر شین تزریق صفر

با در نظر گرفتن تأثیر اندازه‌گیر تزریق صفر مسئله از حالت خطی به غیر خطی تبدیل می‌شود [۲۲]. این اندازه‌گیر به صورت موازی روی شین‌ها نصب شده و باعث کاهش تعداد PMU های مورد نیاز می‌شود. هنگامی که یک شین دارای اندازه‌گیر تزریق صفر باشد از قانون کیرشلف جریان می‌توان در روی آن شین استفاده نمود، چرا که مجموع جریان های ورودی و خروجی از آن شین صفر خواهد بود. اگر شین مجهز به اندازه‌گیر تزریق صفر و تمامی شین‌های مجاور آن در یک مجموعه قرار گیرند و از این مجموعه تمامی شین‌ها به جز یکی از آن‌ها از طریق PMU های نصب شده در شبکه رؤیت‌پذیر باشند، جریان آن یک شین که از طریق PMU رؤیت‌پذیر نیست هم از طریق

اعضای گروه را دارد و می‌تواند به سایر گرگ‌های گروه دستور بدهد. گرگ بتا دستورات آلفا را بین گروه در میان گذاشته و بازخوردها را به گرگ آلفا باز می‌گرداند. امگاها پایین‌ترین سطح گرگ‌های خاکستری را تشکیل می‌دهند و همواره مجبورند تا درمقابل همه‌ی گرگ‌های غالب سر فرود آورند. آنها آخرین گرگ‌هایی هستند که مجاز به تغذیه هستند. به نظر می‌رسد که امگا یک فرد مهم در گروه نباشد، اما مشاهده شده است که یک گروه کامل در مواردی که امگا را از دست می‌دهد با جنگ داخلی روبرو بوده است. اگر یک گرگ، آلفا، بتا یا امگا نباشد، زیرمجموعه‌ی دلتا نامیده می‌شود. گرگ‌های دلتا مجبور هستند تا گرگ‌های آلفا و بتا را اطاعت کنند اما از گرگ‌های امگا غالب‌تر هستند. دیده‌بان‌ها، نگهبان‌ها، گرگ‌های مسن، گرگ‌های شکارچی و گرگ‌های سرپرست متعلق به این مجموعه هستند. علاوه بر سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌ها، شکار گروهی یکی دیگر از رفتار اجتماعی جالب گرگ‌های خاکستری است. این رفتار به عنوان راهنمای اصلی برای مدل کردن الگوریتم GWO مورد استفاده قرار گرفته است. در این مساله برای رسیدن به پاسخ مناسب هر چه مقادیر اندازه جمعیت اولیه و تعداد تکرارهای الگوریتم گرگ خاکستری را افزایش بدهیم امید ریاضی رسیدن به جواب بهینه سراسری افزایش می‌یابد. از این رو در اجرای برنامه ابتدا مقادیری برای این دو پارامتر فرض شده و سپس این دو مقدار را تا هنگامی که خروجی برنامه در اجرای های مختلف به یک مقدار ثابت شود، افزایش می‌دهیم. مقادیر آخرین اجرای برنامه قبل از ثابت شدن خروجی برنامه به یک مقدار بهینه ثابت را به عنوان مقادیر مطلوب برای اندازه جمعیت اولیه و تعداد تکرار الگوریتم گرگ خاکستری انتخاب می‌کنیم.

جدول (۱): توابع هدف معیار به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

تابع	تابع هدف	تعداد متغیر	فرمول
۱	f_1	Sphere	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$
۲	f_2	Sum of Different Power	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i ^{i+1}$
۳	f_3	Step	$f(x) = \sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5])^2$

برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، عملکرد آن در مسائل بهینه‌سازی غیرمقیذ به ازای سه تابع هدف معیار آرایه شده در جدول ۱ با الگوریتم ازدحام ذرات استاندارد مقایسه و نتایج آن در جدول ۲ آرایه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود در هر سه مسئله بهینه‌سازی با توابع هدف معیار و به ازای تعداد متغیرهای مختلف الگوریتم خاکستری عملکرد بهتری را نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات استاندارد ارائه می‌کند.

گرفته شود. هیچ واحد PMU در شین مجازی نمی‌تواند نصب شود، زیرا این شین وجود فیزیکی ندارد و یک قید تساوی به مسئله‌ی بهینه‌سازی جایابی واحدهای PMU اضافه می‌شود. از این رو به تعداد شین‌های مجازی به بردار متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله، صفر اضافه می‌کنیم مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU با در نظر گرفتن تپ ترانسفورماتور و اضافه‌شدن شین مجازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min F = \min \sum_{i \in I} x_i \quad (5)$$

به طوری که:

$$\begin{cases} f(X) \geq 1 \\ g(X) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

که $G(X)$ مربوط به شین مجازی اضافه شده است $(x_{p'} = 0)$.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

عموم الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده به منظور حل مسائل بهینه‌سازی بر مبنای ساختار مشابهی پایه‌گذاری شده‌اند. هر یک از این الگوریتم‌ها در ابتدا یک جواب اولیه را بر مبنای یک روش تقریباً تصادفی ارائه می‌دهند و سپس در گام بعدی به روشی که اساس آن جستجوی همسایگی به کمک روشی متفاوت است سعی در بهبود جواب ارائه شده، دارند. در هر تکرار، سعی بر آن خواهد بود تا به بهترین روش جواب‌های حاصل را ارزیابی نمایند. این الگوریتم‌ها همچنین روش‌هایی نیز برای فرار از جواب‌های بهینه‌ی محلی ارائه کرده‌اند که مبنای مشابهی برای آنها در نظر گرفته شده است. در ادامه به تشریح الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری می‌پردازیم.

این الگوریتم از سلسله مراتب رهبری و مکانیزم طبیعی شکار گرگ‌های خاکستری تبعیت می‌کند. در این روش چهار مدل گرگ، آلفا، بتا، دلتا و امگا برای شبیه‌سازی سلسله مراتب رهبری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین در این الگوریتم سه مرحله اصلی شکار یعنی، جستجو برای طعمه؛ احاطه کردن طعمه و حمله به طعمه استفاده شده است. این روش جزء دسته‌ای از روش‌های فراابتکاری است که از رفتار اجتماعی جمعیت تبعیت می‌کند [۳۴].

۳-۱- چگونگی الهام گرفتن از الگوریتم

گرگ‌های خاکستری به عنوان شکارچی در بالای زنجیره غذایی قرار دارند که عموماً بصورت گروهی زندگی می‌کنند و اندازه جمعیت گروه به طور میانگین ۵ تا ۱۲ عدد است. رهبر گروه (آلفا) که از یک نر و یک ماده تشکیل شده است عمدتاً تصمیمات را به گروه تحمیل می‌کند. گرگ آلفا قدرتمندترین عضو گروه نیست، اما بهترین انتخاب برای مدیریت گروه است که نشان دهنده اهمیت سازمان و نظم گروه است. دومین سطح از سلسله مراتب گرگ‌های خاکستری، بتا است. بتاها در تصمیم‌گیری‌های گرگ‌های آلفا و سایر فعالیت‌های گروه مشارکت می‌کنند. این گرگ نقش یک مشاور برای آلفا و یک ناظم برای سایر

جدول (۲): مقایسه عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری با الگوریتم ازدحام ذرات استاندارد در مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر توابع هدف معیار

تابع هدف	تعداد متغیرها	الگوریتم ازدحام ذرات استاندارد				الگوریتم گرگ خاکستری			
		بهترین	بدترین	میانگین	انحراف معیار	بهترین	بدترین	میانگین	انحراف معیار
f_1	10	3.70e-01	2.03e-00	7.90e-01	3.49e-01	5.24e-07	5.34e-05	4.79e-06	1.06e-05
	20	1.04e+0	3.20e+01	1.76e+01	4.67e-00	3.35e-02	1.48e-01	7.16e-02	2.82e-02
	30	2.23e+0	5.34e+01	3.92e+01	7.70e-00	7.80e-01	2.13e-00	1.32e-00	3.15e-01
f_2	10	1.92e-04	1.46e-02	2.72e-03	2.66e-03	6.18e-07	2.12e-05	3.33e-06	5.42e-06
	20	2.66e-04	9.74e-03	2.74e-03	2.11e-03	8.42e-05	4.85e-03	3.84e-04	1.06e-03
	30	1.96e-04	1.83e-02	7.89e-03	4.61e-03	5.20e-04	3.61e-02	6.48e-03	7.33e-03
f_3	10	1.78e+02	2.71e+03	1.08e+03	7.92e+02	0	1.00e-00	0	3.05e-01
	20	3.56e+03	9.57e+03	6.66e+03	1.37e+03	0	5.00e-00	1.00e-00	1.58e-00
	30	8.59e+03	2.62e+04	1.37e+04	3.89e+03	4	1.56e+02	1.40e+01	2.74e+01

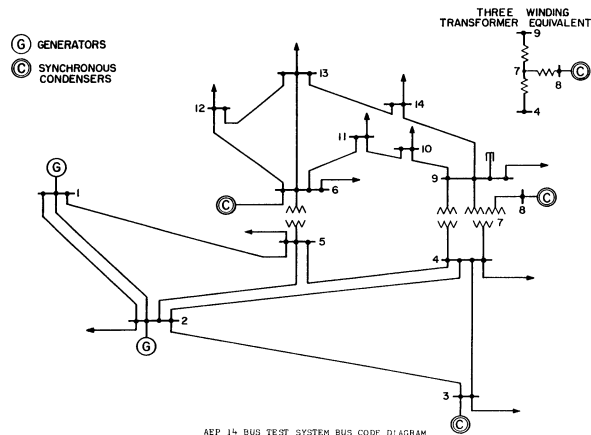
واحد تولیدکننده وجود دارد و نه مصرف‌کننده (ZIB) و شین شماره- ۸ شین شعاعی سیستم (اتصال به سیستم فقط از طریق شین شماره ۷) هستند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود ماکزیمم تعداد خطوط که به یک شین وصل شده‌اند در شین ۴ رخ داده است که پنج خط به آن وصل شده‌اند، از این رو در دو حالت تک-هدفه و دوهدفه مسئله برای تعداد محدودیت کانال برابر با یک ($nc=1$) تا چهار ($nc=4$) بررسی می‌گردد.

۴- نتایج

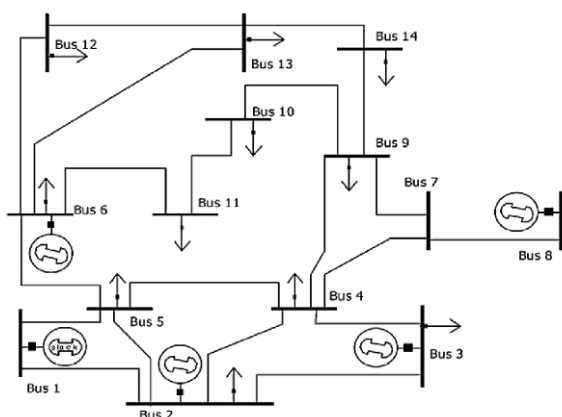
با توجه به مدل ریاضی ارائه شده برای مسئله‌ی جایابی بهینه واحدهای PMU، در این بخش نتایج شبیه‌سازی و حل مسئله بر روی سیستم تست مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. ابتدا مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU به صورت تک‌هدفه به‌منظور کمینه‌کردن تعداد واحدهای PMU لازم برای رؤیت‌پذیری کامل سیستم مورد مطالعه با و بدون در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر، محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری و رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتورها بررسی می‌شود. سپس جواب‌های پارتوی بهینه‌ی مسئله‌ی جایابی واحدهای PMU به‌صورت دوهدفه به‌منظور کمینه‌کردن تعداد واحدهای PMU لازم با در نظر گرفتن مشاهده‌پذیری کامل و بیشینه‌کردن افزونگی اندازه‌گیری با لحاظ کردن اثر شین تزریق صفر، محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری و رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور ارائه خواهد شد. با استفاده از مفهوم غلبه و معیار پارتو در حالت دوهدفه بجای ارائه‌ی یک جواب و یک چیدمان مناسب برای واحدهای PMU چندین جواب با چیدمان‌های مختلف ارائه می‌شود که از لحاظ هر دو تابع هدف متضاد، پارتوی بهینه هستند.

۴-۱- سیستم مورد مطالعه

در این بخش سیستم تست ۱۴ شینه IEEE معرفی و نحوه‌ی تغییرات لازم برای در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور شرح داده می‌شود. سپس در بخش‌های بعدی به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری، نتایج عددی بدست آمده از حل مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU در هر دو حالت تک‌هدفه و دوهدفه با و بدون در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتورها ارائه می‌شود. گراف سیستم ۱۴ شینه IEEE با و بدون در نظر گرفتن ترانسفورماتورها به‌ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. در هر دو حالت شین شماره ۷ شین تزریق صفر (شین که نه در آن



شکل (۵): سیستم ۱۴ شینه IEEE در حضور ترانسفورماتورها



شکل (۶): سیستم ۱۴ شینه IEEE بدون در نظر گرفتن ترانسفورماتورها

$$A_Tap = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

با مشخص شدن ماتریس‌های اتصال شین‌های سیستم مورد مطالعه برای دو حالت با و بدون در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور در ادامه نتایج شبیه‌سازی برای دو حالت تک‌هدفه و دوهدفه ارائه خواهد شد.

۴-۱-۱- جایابی تک هدفه

در این بخش مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی PMUها به صورت تک‌هدفه و بدون در نظر گرفتن شاخص افزونگی اندازه‌گیری ارائه می‌شود. در جدول ۳ کمترین تعداد واحدهای PMU لازم به منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم ۱۴ شینه IEEE، همچنین محل نصب آنها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالتی که اثر شین تزریق صفر در مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU لحاظ شده است، تعداد واحدهای PMU لازم بیشتر است.

جدول (۳): جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU در سیستم ۱۴ شینه IEEE با و

بدون در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر

	تعداد PMUها	محل نصب PMUها
بدون در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر	4	2,6,8,9
با در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر	3	2,6,9

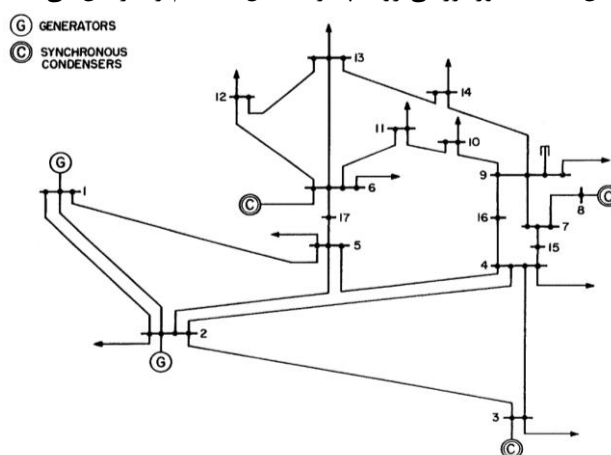
با توجه به جدول ۳، در حالتی که اثر شین تزریق صفر در نظر گرفتن نشود، علاوه بر نصب PMU در شین‌های ۲، ۶ و ۹ لازم است که در شین ۸ نیز یک واحد PMU نصب گردد، تا مشاهده‌پذیری کامل سیستم برآورده شود.

در جدول ۴ کمترین تعداد واحدهای PMU لازم و هزینه نصب به منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن تعداد محدودیت کانال مختلف و همچنین محل نصب PMUها و همچنین شین‌هایی که بوسیله نصب PMU در یک شین از طریق آن مشاهده‌پذیر می‌شوند، آورده شده است. در جدول اعداد خارج پرانتز که بولد شده‌اند شین‌هایی هستند که واحدهای اندازه‌گیر فازور PMUها در آنجا نصب شده‌اند و اعداد داخل پرانتز شین‌هایی هستند

ماتریس A که نشان‌دهنده‌ی اتصال سیستم است، برای سیستم ۱۴ شینه بدون در نظر گرفتن ترانسفورماتورها با توجه به شکل ۶ به صورت زیر است:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در سیستم ۱۴ شینه سه ترانسفورماتور در شاخه‌های ۴-۷، ۹-۴ و ۶-۵ وجود دارد، IEEE فرض می‌شود که هر سه ترانسفورماتور دارای تپ متغیر باشند. به منظور در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری تپ این ترانسفورماتورها در مسئله‌ی جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیر فازور در سیستم قدرت به جای هر یک از ترانسفورماتورها با تپ متغیر، یک شین مجازی قرار داده می‌شود. توپولوژی سیستم ۱۴ شینه استاندارد بعد از اضافه کردن این شین‌های مجازی در شکل ۷ نشان داده شده است. شین‌های شماره ۱۵ (بجای ترانسفورماتور شاخه ۴-۷)، ۱۶ (بجای ترانسفورماتور شاخه ۹-۴) و ۱۷ (بجای ترانسفورماتور شاخه ۶-۵) شین‌های مجازی اضافه شده هستند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این شین‌ها هیچ واحد قرار نمی‌گیرد، زیرا در واقعیت وجود ندارند و تنها در گراف PMU سیستم به منظور لحاظ کردن رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتورها در لحاظ شده‌اند و این مورد PMU مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای محدودیت تساوی را به مسئله‌ی بهینه‌سازی اضافه می‌کند و تعداد شین‌ها به منظور بررسی رؤیت‌پذیری کامل سیستم را افزایش می‌دهد.



شکل (۷): توپولوژی سیستم ۱۴ شینه بعد از اضافه شدن شین‌های مجازی همچنین ماتریس اتصال این توپولوژی A_Tap با در نظر گرفتن شین‌های مجازی ۱۵، ۱۶ و ۱۷ به صورت زیر خواهد بود:

که بوسیله‌ی قرارگیری PMU در شین متناظر با مقدار بولدشده‌ی خارج پراوتر، مشاهده‌پذیر شده‌اند. مثلاً $(4,3,2)$ یعنی PMU در شین ۳ نصب شده و جریان شین‌های ۲ و ۳ و ۴ از طریق آن مشاهده‌پذیر است.

جدول (۴): جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU در سیستم ۱۴ شینه

IEEE با در نظر گرفتن محدودیت تعداد کانال

محل نصب PMUها	تعداد PMUها و هزینه نصب	تعداد کانال مجاز
1(1,2), 3(3,4), 5(5,6), 8(7,8) 11(10,11), 12(12), 14(13,14)	7(8.4)	1
3(2,3,4), 4(4,7,9), 5(1,4,5) 11(6,10,11), 13(12,13,14)	5(7)	2
2(1,2,3,4), 6(5,6,11,12) 9(7,9,10,14), 12(6,12,13)	4(6.4)	3
2(1,2,3,4,5), 6(5,6,11,12,13) 9(4,7,9,10,14)	3(5.4)	4

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، به ازای تعداد محدودیت کانال کمتر، به PMUهای بیشتری به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم ۱۴ شینه IEEE نیاز است و متعاقباً هزینه‌ی نصب و چیدمان به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. به‌طور مثال، اگر تعداد محدودیت کانال برابر یک در نظر گرفته شود ($nc=1$) یعنی PMU نصب شده در هر شین بتواند ولتاژ شینی که در آن قرار دارد و جریان یکی از شاخه متصل به شین نصب شده را مشاهده‌پذیر کند، تعداد PMUهای لازم به‌منظور رؤیت‌پذیری کامل برابر هفت خواهد بود. همچنین در جدول ۵ کمترین تعداد واحدهای PMU لازم به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم ۱۴ شینه IEEE، همچنین محل نصب آنها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالتی که رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتورها در مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU لحاظ شده است، تعداد واحدهای PMU لازم به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم بیشتر است.

جدول (۵): جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU در سیستم ۱۴ شینه IEEE با و بدون در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور

محل نصب PMUها	تعداد PMUها	با در نظر گرفتن تپ متغیر
2,4,6,8,9	5	بدون در نظر گرفتن تپ متغیر
2,6,8,9	4	

با توجه به جدول ۵، در حالتی که رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور مورد نیاز باشد، علاوه بر نصب PMU در شین‌های ۲، ۶، ۸ و ۹ لازم است که در شین ۴ نیز یک واحد PMU نصب گردد، تا مشاهده‌پذیری کامل سیستم برآورده شود. بنابراین در سیستم ۱۴ شینه‌ی IEEE وقتی اطلاعات تپ ترانسفورماتور نامعلوم باشد و به مراکز کنترل ارسال نگردد، تعداد PMUهای مورد نیاز برای پایش سیستم برابر چهار است. در جدول ۶ تعداد PMUهای لازم به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر، رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور و تعداد محدودیت کانال مختلف آورده شده است.

با توجه به مقادیر جدول ۶ مشاهده می‌شود که وقتی به‌طور هم‌زمان اثر شین تزریق صفر، رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور و محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری در مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی PMUها در سیستم قدرت در نظر گرفته شود به تعداد PMUهای بیشتری به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم مورد مطالعه نیاز است. در نتیجه اگر این موارد در حل مسئله به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته نشود، جواب‌های بدست آمده به‌منظور تعیین مکان قرارگیری و نصب PMUها بهینه نخواهد بود و در پیاده‌سازی عملی نتایج مورد انتظار و مشاهده‌پذیری کامل سیستم که هدف اصلی از حل مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی PMUها در سیستم قدرت است، برآورده نخواهد شد.

جدول (۶): جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU در سیستم ۱۴ شینه

IEEE با در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر، رؤیت‌پذیری تپ

ترانسفورماتور و تعداد محدودیت کانال مختلف

محل نصب PMUها	تعداد PMUها و هزینه نصب	تعداد کانال مجاز
1(1,5), 2(2,4), 3(3), 6(6,17), 8(7,8), 9(9,16), 10(10,11), 12(12), 14(13,14)	9(10.8)	1
1(1,2,5), 4(3,4,15), 6(6,13,17), 9(7,9,16), 11(10,11), 12(12,13), 14(14)	7(9.8)	2
2(2,3,4,5), 5(1,2,5,17), 6(6,11,12,13), 7(7,8,15), 9(9,10,14,16)	5(8)	3
2(1,2,3,5), 4(3,4,15,16), 6(6,11,12,13,17), 9(7,9,10,14,16)	4(7.2)	4

در جدول ۷ نتایج برای جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری با اثر شین تزریق صفر و محدودیت کانال اندازه‌گیری بصورت اتوماتیک ارایه شده است. همچنین در جدول ۸ نتایج علاوه بر موارد ذکر شده در جدول ۷، تپ ترانسفورماتور نیز لحاظ شده است.

جدول (۷): جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU در سیستم ۱۴ شینه IEEE با در

نظر گرفتن محدودیت تعداد کانال

نحوه‌ی رؤیت‌پذیری شین‌های سیستم	تعداد PMUها و هزینه نصب	محل نصب PMUها و تعداد کانال اندازه‌گیری
2(1,2,3,4,5), 6(5,6,11,12,13) 9(4,7,9,10,14)	3(5.4)	2(4), 6(4), 9(4)

جدول (۸): جایابی بهینه‌ی واحدهای PMU در سیستم ۱۴ شینه IEEE با در

نظر گرفتن محدودیت تعداد کانال

نحوه‌ی رؤیت‌پذیری شین‌های سیستم	تعداد PMUها و هزینه نصب	محل نصب PMUها و تعداد کانال اندازه‌گیری
1(1,2), 4(3,4,5,15), 6(6,11,12,13,17), 9(7,9,10,14,16)	4(6.4)	1(1), 4(3), 6(4), 9(4)

۴-۱-۲- جایابی دو هدفه

در این حالت مسئله‌ی مکان‌یابی بهینه‌ی PMU به‌صورت دوهدفه به-منظور کمینه‌کردن تعداد PMUهای لازم برای مشاهده‌پذیری کامل و بیشینه‌کردن افزونگی اندازه‌گیری بررسی شده است. در جداول ۹ تا

که در تمام شین‌های سیستم واحدهای PMU نصب گردد. مشاهده می‌شود که با یک درجه آزادی بیشتر برای محدودیت تعداد کانال، مقدار افزونگی اندازه‌گیری به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و متعاقباً قابلیت اطمینان سیستم بهبود می‌یابد.

با توجه به جدول ۱۲ مشاهده می‌شود که وقتی $nc=4$ ، تعداد جواب‌های پارتوی بهینه‌ی بدست آمده برای مسئله‌ی جایابی PMU برابر با ۹ است، که بهترین جواب از لحاظ تعداد PMUها (پنج عدد PMU) است که دارای مقدار افزونگی اندازه‌گیری ۱۷ است و بهترین جواب از لحاظ مقدار افزونگی اندازه‌گیری ۱۳ است که نیازمند ۱۳ عدد PMU به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم است. در جدول ۱۳ نتایج برای جایابی دوهدهای اندازه‌گیری فازوری با اثر شین تزریق صفر و محدودیت کانال اندازه‌گیری بصورت اتوماتیک ارایه شده است.

جدول (۱۰): جایابی بهینه‌ی PMUها بصورت دو هدفه در سیستم ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر، رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور و محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری $nc=2$

Pareto number	F1	F2	محل نصب PMUها
1	6(8.4)	16	1(1,2,5), 4(3,4,16), 6(6,12,17), 7(7,8,15), 10(9,10,11), 14(9,13,14)
2	7(9.8)	14	1(1,2,5), 4(3,4,16), 6(6,12,17), 7(7,8,15), 9(7,9,14), 10(9,10,11), 14(9,13,14)
3	8(11.2)	13	1(1,2,5), 2(2,4,5), 4(3,4,16), 5(2,5), 6(6,12,17), 7(7,8,15), 10(9,10,11), 14(9,13,14)
4	9(12.6)	11	1(1,2,5), 2(2,4,5), 4(3,4,16), 5(2,5), 6(6,12,17), 7(7,8,15), 9(7,9,14), 10(9,10,11), 14(9,13,14)
5	10(14)	10	1(1,2,5), 2(2,4,5), 4(3,4,16), 5(2,5), 6(6,12,17), 7(7,8,15), 8(8), 9(7,9,14), 10(10,11), 14(9,13,14)
6	11(15.4)	9	1(1,2,5), 2(2,4,5), 4(3,4,16), 5(2,5), 6(6,12,17), 7(7,8,15), 9(7,9,14), 10(10,11), 12(6,12), 13(6,13), 14(9,14)
7	12(16.8)	8	1(1,2,5), 2(2,4,5), 4(3,4,16), 5(2,5), 6(6,12,17), 7(7,8,15), 8(8), 9(7,9,14), 10(10,11), 12(6,12), 13(6,13), 14(9,14)
8	14(19.6)	7	1(1,2,5), 2(2,4,5), 3(2,3,4), 4(4,16), 5(2,5), 6(6,12,17), 7(7,8,15), 8(8), 9(7,9,14), 10(9,10), 11(11), 12(6,12,13), 13(6,13), 14(13,14)

جدول (۱۱): جایابی بهینه‌ی PMUها بصورت دو هدفه در سیستم ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر، رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور و محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری $nc=3$

Pareto number	F1	F2	محل نصب PMUها
1	6(9.6)	14	1(1,2), 4(3,4,5,15), 6(6,11,12,17), 9(7,9,14,16), 11(6,10,11), 12(6,12,13)
2	7(11.2)	13	1(1,2), 4(3,4,5,16), 6(6,11,13,17), 7(8), 9(7,9,14), 11(6,10,11), 12(6,12,13)
3	8(12.8)	11	1(1,2), 4(3,4,5,16), 6(6,11,13,17), 7(7,8), 9(7,9,14), 11(6,10,11), 12(6,12,13), 14(13,14)
4	9(14.4)	10	1(1,2), 4(3,4,5,15), 6(6,11,12,17), 7(7,8), 8(7,8), 9(9,10,14,16), 10(9,10), 11(6,10,11), 12(6,12,13)
5	10(16)	9	1(1,2), 4(3,4,5,15), 6(6,11,12,17), 7(7,8), 8(7,8), 9(9,10,14,16), 10(9,10), 11(6,10,11), 12(6,12), 14(14)
6	11(17.6)	7	1(1,2,5), 2(1,2,4), 3(3), 4(2,4,5,15), 5(1,4,5,17), 6(6,11,12,13), 7(7,8,9,15), 8(7,8), 9(9,10,14,16), 12(6,12), 13(6,12,13), 14(13,14)
7	12(19.2)	6	1(1,2,5), 2(1,2,4,5), 3(3), 4(2,4,5,15), 5(1,4,5,17), 6(6,11,12,13), 7(7,8,9,15), 8(7,8), 9(9,10,14,16), 12(6,12), 13(6,12,13), 14(13,14)
8	13(20.8)	5	1(1,2,5), 2(1,2,4,5), 3(3), 4(2,4,5,15),

۱۳ جواب‌های بهینه‌ی پارتو به با در نظر اثر شین تزریق صفر، رؤیت-پذیری تپ ترانسفورماتور و تعداد محدودیت کانال مختلف آورده شده است.

جدول (۹): جایابی بهینه‌ی PMUها بصورت دو هدفه در سیستم ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر، رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور و محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری $nc=1$

Pareto number	F1	F2	محل نصب PMUها
1	9(10.8)	17	1(1,5), 2(2,4), 3(3), 6(6,17), 8(7,8), 9(9,16), 10(10,11), 12(12), 14(13,14)
2	10(12)	16	1(1,5), 2(2,4), 3(3), 6(6,17), 8(7,8), 9(9,16), 10(10,11), 12(6,12), 13(6,13), 14(14)
3	11(13.2)	15	1(1,5), 2(2,4), 3(3,4), 4(4), 6(6,17), 8(7,8), 9(9,16), 10(10,11), 12(6,12), 13(6,13), 14(13,14)
4	12(14.4)	14	1(1,5), 2(2,4), 3(3,4), 4(4), 6(6,17), 7(7,8), 8(8), 9(9,16), 10(10,11), 12(12,13), 13(12,13), 14(13,14)
5	13(15.6)	13	1(1,5), 2(2,4), 3(3,4), 4(4), 6(6,17), 7(7,8), 8(8), 9(9,16), 10(10,11), 11(6,11), 12(12,13), 13(6,13), 14(13,14)

همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود پنج جواب پارتوی بهینه برای مسئله‌ی بهینه‌سازی دوهدهای بدست آمده است. از آنجایی‌که دو تابع هدف در نظر گرفته شده با یکدیگر متضاد هستند، به ازای $nc=1$ ، بهترین جواب از لحاظ تعداد PMUها (نه عدد PMU) دارای مقدار افزونگی اندازه‌گیری ۱۷ و بهترین جواب از لحاظ مقدار افزونگی اندازه‌گیری، سیزده است که نیازمند بیشترین تعداد PMU (سیزده عدد PMU) به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم است. با توجه به جدول ۶، به ازای $nc=2$ هشت جواب پارتوی بهینه‌ی بدست آمده است. که بهترین جواب از لحاظ تعداد PMUها (شش عدد PMU) دارای مقدار افزونگی اندازه‌گیری شانزده است و بهترین جواب از لحاظ مقدار افزونگی اندازه‌گیری هفت است که نیازمند بیشترین تعداد PMU (چهار عدد PMU) به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم است. در واقع برای اینکه در هنگام از دست رفتن هر یک از PMUها به همراه قطع شدن هر یک از خطوط تعداد حالاتی که سیستم به‌طور کامل مشاهده‌پذیر نباشد به عدد ۷ برسد لازم است که در تمام شین‌های سیستم واحدهای PMU نصب گردد. البته همان‌طور که قبلاً ذکر شد در شین‌های مجازی هیچ واحد PMU قرار نمی‌گیرد، ولی اثر آنها در مشاهده‌پذیری کامل سیستم مورد مطالعه لحاظ می‌شود.

به ازای $nc=3$ ، ۹ جواب پارتوی بهینه بدست آمده است که مقادیر دو تابع هدف و محل نصب PMUها و جزئیات هر جواب پارتوی بهینه در جدول ۱۱ نشان داده شده است. چون از لحاظ محدودیت تعداد کانال در این مورد آزادی بیشتری وجود دارد، بهترین جواب از لحاظ تعداد PMUها شش است که دارای مقدار افزونگی اندازه‌گیری چهارده است و در مقایسه با حالتی که $nc=2$ مقدار افزونگی کمتر است. بهترین جواب از لحاظ مقدار افزونگی اندازه‌گیری ۴ است که نیازمند بیشترین تعداد PMU (چهار عدد PMU) به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم است. به ازای $nc=3$ ، برای اینکه در هنگام از دست رفتن هر یک از PMUها به همراه قطع شدن هر یک از خطوط تعداد حالاتی که سیستم به‌طور کامل مشاهده‌پذیری نباشد به عدد ۴ برسد لازم است

				9(7,9,10,14,16),11(0),12(0)
8	9(12.4)	10	1(1),3(2),4(2),5(2),6(4),7(2),9(4),10(0),13(0)	1(1,5),3(2,3,4),4(2,4,5),5(2,4,5),6(6,11,12,13,17),7(7,9,15),9(7,9,10,14,16),10(10),13(13)
9	6(12.4)	10	1(1),4(3),6(4),7(1), 9(4),11(0)	1(1,2),4(3,4,5,15),6(6,11,12,13,17),7(7,9),9(7,9,10,14,16),11(0)
10	5(7.4)	16	1(1),4(3),6(4),7(0), 9(4)	1(1,2),4(3,4,5,15),6(6,11,12,13,17),7(7,9),9(7,9,10,14,16)
11	5(7.6)	15	1(1),4(3),6(4),7(1), 9(4)	1(1,2),4(3,4,5,15),6(6,11,12,13,17),7(7,9),9(7,9,10,14,16)
12	4(6.4)	17	1(1),4(3),6(4),9(4)	1(1,2),4(3,4,5,15),6(6,11,12,13,17),9(7,9,10,14,16)
13	7(10.4)	12	1(2),3(2),4(1),5(2),6(4),7(2),9(4)	1(1,2,5),3(2,3,4),4(4,5),5(2,4,5),6(6,11,12,13,17),7(7,9,10,14,16)

۵- نتیجه‌گیری

واحد اندازه‌گیر فازوری (PMU) با کمک سیستم موقعیت یاب جهانی سیگنال‌های زمانی بسیار دقیقی از اطلاعات شبکه‌های قدرت را جمع‌آوری و استفاده می‌نماید. جایابی بهینه PMU نقش بسیار مهمی در مدیریت سیستم قدرت دارد. این مسأله به جایابی بهینه این واحدها به منظور رؤیت‌پذیری کامل سیستم قدرت و با حداقل تعداد PMUها و افزایش افزونگی اندازه‌گیری سیستم مربوط می‌شود. مسأله جایابی بهینه PMU یک مسأله بهینه‌سازی با قیود زیاد، گسسته و غیر خطی است که تمام حالات و ترکیبات ممکن برای انتخاب‌های مورد نظر باید آزمایش شود تا بتوان به یک جواب بهینه رسید. سه عامل مهم و تأثیرگذار بر مسئله‌ی جایابی PMUها عبارتند از: محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری، اثر شین تزریق صفر و رؤیت‌پذیری تب ترانسفورماتور در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستای حل مسأله جایابی، ابتدا مسأله جایابی بهینه‌ی PMUها به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مدل‌سازی گردید. و نحوه‌ی تعیین رؤیت‌پذیری سیستم بیان شد. همچنین در مدل‌سازی اثر شین‌های تزریق صفر در نظر گرفته شد. به‌منظور در نظر گرفتن اثر خروج PMU و خطوط انتقال مسئله بهینه‌سازی به‌صورت چندهدفه با تابع هدف دوم شاخص افزونگی اندازه‌گیری معرفی شد. سپس نحوه‌ی در نظر گرفتن محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری و رؤیت‌پذیری تب ترانسفورماتور بعد از بازنویسی و باز تعریف، در مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی PMUها ارائه گردید. در گام بعدی، جهت تعیین جواب‌های پارتو، ساختار چندهدفه‌ی الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری پیاده‌سازی گردید. در بخش نتایج شبیه‌سازی در سیستم ۱۴ شینه IEEE به صورت تک‌هدفه به‌منظور کاهش تعداد PMUهای لازم برای مشاهده پذیری کامل سیستم مورد مطالعه با و بدون در نظر گرفتن اثر شین تزریق، محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری PMUها و رؤیت‌پذیری تب ترانسفورماتور با استفاده از ساختار تک‌هدفه‌ی الگوریتم گرگ خاکستری ارائه شد. مشاهده شد که در صورت در نظر گرفتن رؤیت‌پذیری تب ترانسفورماتور، برای مشاهده‌پذیری کامل سیستم نیاز به تعداد PMUهای بیشتری داریم، از این رو هزینه نصب تجهیزات افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که هر چه تعداد کانال در دسترس PMUها کمتر باشد به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل سیستم

			5(1,4,5,17), 6(6,11,12,13), 7(7,8,9,15), 8(7,8), 9(9,10,14,16), 10(9,10,11), 12(6,12), 13(6,12,13), 14(13,14)
9	14(22.4)	4	1(1,2,5),2(1,2,4,5), 3(3), 4(2,4,5,15), 5(1,4,5,17), 6(6,11,12,13), 7(7,8,9,15), 8(7,8), 9(9,10,14,16), 10(9,10,11), 11(10,11), 12(6,12), 13(6,12,13), 14(13,14)

جدول (۱۲): جایابی بهینه‌ی PMUها به‌صورت دو هدفه در سیستم ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر، رؤیت‌پذیری تب ترانسفورماتور و محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری $nc=4$

Pareto number	F1	F2	محل نصب PMUها
1	5(9)	17	3(2,3,4), 5(1,2,5), 6(6,11,12,13,17), 8(7,8), 9(7,9,10,14,16)
2	6(10.8)	14	3(2,3,4), 5(1,2,4,5,17), 6(6,11,12), 7(7,8,9), 9(7,9,10,14,16), 12(12,13)
3	7(12.6)	11	1(1,2,5), 2(1,2,3,5), 5(1,2,4,5,17), 6(6,11,12), 7(7,8,9), 9(7,9,10,14,16), 12(6,12,13)
4	8(14.4)	9	1(1,2,5), 2(1,2,3,4,5), 5(1,2,4,5,17), 6(6,11,12,13), 7(7,8,9,15), 9(7,9,10,14,16), 12(6,12,13), 13(6,12,13)
5	9(16.2)	8	1(1,2,5), 2(1,2,3,4,5), 5(1,2,5,17), 6(6,11,12,13), 7(7,8,9,15), 9(7,9,10,14,16), 12(6,12,13), 13(6,12,13), 14(13,14)
6	10(18)	7	1(1,2,5), 2(1,2,3,4,5), 5(1,2,5,17), 6(6,11,12,13,17), 7(7,8,9,15), 9(7,9,10,14,16), 11(11), 12(6,12,13), 13(6,12,13), 14(13,14)
7	11(19.8)	5	1(1,2,5), 2(1,2,3,4,5), 4(2,4,5,16), 5(1,4,5,17), 6(6,11,12,13,17), 7(7,8,9), 9(7,9,10,14,16), 10(10), 11(6,10,11), 12(6,12,13), 13(6,12,13), 14(13,14)
8	12(21.6)	4	1(1,2,5), 2(1,2,3,4,5), 4(2,3,4,5,16), 5(1,4,5,17), 6(6,11,12,13,17), 7(7,8,9), 8(8), 9(7,9,10,14,16), 10(10), 11(6,10,11), 12(6,12,13), 14(13,14)
9	13(23.4)	3	1(1,2,5), 2(1,2,3,4,5), 3(2,3,4), 4(2,3,4,5,16), 5(1,4,5,17), 6(6,11,12,13,17), 7(7,8,9), 8(8), 9(7,9,10,14,16), 10(9,10), 11(6,11), 12(6,12,13), 14(13,14)

جدول (۱۳): جایابی بهینه‌ی PMUها به‌صورت دو هدفه در سیستم ۱۴ شینه IEEE با در نظر گرفتن اثر شین تزریق صفر، رؤیت‌پذیری تب ترانسفورماتور و محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری

Pareto number	F1	F2	محل نصب PMUها
1	13	6	1(1),3(2),4(2),5(2),6(4),7(2),8(0),9(4),10(0),11(0),12(0),13(0),14(0)
2	14(18)	5	1(1),2(1),3(1),4(4),5(2),6(4),7(1),8(0),9(4),10(1),11(0),12(0),13(0),14(1)
3	12(15.4)	7	1(1),3(2),4(2),5(2),6(4),7(2),9(4),10(1),11(1),12(1),13(1),14(1)
4	10(13.4)	9	1(1),3(2),4(2),5(2),6(4),7(2),9(4),10(0),12(0),13(0)
5	11(14.4)	8	1(1),3(2),4(2),5(2),6(4),7(2),9(4),10(0),11(0),12(0),13(0)
6	8(11.4)	11	1(2),3(2),4(1),5(2),6(4),7(2),9(4),12(0)
7	7(9.6)	13	1(1),4(3),6(4),7(1),9(4),11(0),12(0)

- [10] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, and A. Safdarian, "Optimal PMU placement based on probabilistic cost/benefit analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 566-567, 2013.
- [11] Z. Zhao, "Sensitivity Constrained PMU Placement Utilizing Multiple Methods", Master of Science Thesis, Clemson University, pp. 1-69, May 2010.
- [12] D. Dua, S. Dambhare, R. 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, October 2008.
- [13] M. Nazari-Heris and B. Mohammadi-Ivatloo, "Application of heuristic algorithms to optimal PMU placement in electric power systems: An updated review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 214-228, 2015.
- [14] K. Jamuna and K. Swarup, "Multi-objective biogeography based optimization for optimal PMU placement," *Applied Soft Computing*, vol. 12, pp. 1503-1510, 2012.
- [15] A. Mahari and H. Seyedi, "Optimal PMU placement for power system observability using BICA, considering measurement redundancy," *Electric Power Systems Research*, vol. 103, pp. 78-85, 2013.
- [16] Q. Li, T. Cui, Y. Weng, R. Negi, F. Franchetti, and M. D. Ilic, "An information-theoretic approach to PMU placement in electric power systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 446-456, 2013.
- [17] B. Ramachandran and G. T. Bellarmine, "Improving observability using optimal placement of phasor measurement units," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 56, pp. 55-63, 2014.
- [18] M. Nazari-Heris and B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal placement of phasor measurement units to attain power system observability utilizing an upgraded binary harmony search algorithm," *Energy Systems*, vol. 6, pp. 201-220, 2015.
- [19] Y. Zhao, P. Yuan, Q. Ai, and T. Lv, "Optimal PMU placement considering topology constraints," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 240-248, 2015.
- [20] C.-S. Liao, T.-J. Hsieh, X.-C. Guo, J.-H. Liu, and C.-C. Chu, "Hybrid search for the optimal PMU placement problem on a power grid," *European Journal of Operational Research*, vol. 243, pp. 985-994, 2015.
- [21] H. H. Müller and C. A. Castro, "Genetic algorithm-based phasor measurement unit placement method considering observability and security criteria," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, pp. 270-280, 2016.
- [22] R. Babu and B. Bhattacharyya, "Optimal allocation of phasor measurement unit for full observability of the connected power network," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 79, pp. 89-97, 2016.
- [23] Md Shafiullah, Md Ismail Hossain, M.A. Abido, Taher Abdel-Fattah, A.H.Mantawy, "A modified Optimal PMU Placement Problem Formulation Considering Chanel Limits Under Various Contingencies," *Measurement*, vol. 135, pp. 875-885, 2018.
- [24] Mohammad Hossein Rezaeian Koochi, Mohammad Hasan Hemmatpour, "A general PMU Placement approach considering both topology and system aspects of Contingencies," *International Journal of Electrical Power & Energy System*, vol. 118, 2020.
- [25] M.T.Mouwafi, Ragab A.El-Sehiemy, A.A.Abou El-Ela, A.M.Kinawy, "Optimal placement of phasor measurement units with minimum availability of

نیاز به تعداد PMU ها بیشتری داریم، از این رو هزینه نصب تجهیزات افزایش می‌یابد. سپس جواب‌های پارتوی بهینه به همراه جزئیات برای مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی PMU به‌منظور کمینه‌کردن تعداد PMU های لازم (کمینه کردن تابع هدف اول) و بیشینه‌کردن شاخص افزونگی اندازه‌گیری (کمینه کردن تابع هدف دوم) با شرط مشاهده-پذیری کامل سیستم مورد مطالعه با در نظر گرفتن اثر شین تزریق، محدودیت تعداد کانال اندازه‌گیری PMU ها و رؤیت‌پذیری تپ ترانسفورماتور ارائه شد. همان‌طور که مشاهده شد، دو تابع هدف در نظر گرفته شده متضاد یکدیگر هستند، یعنی با کاهش تعداد PMU ها و کم‌شدن تابع هزینه نصب اول، شاخص افزونگی اندازه‌گیری کاهش می‌یابد (تابع هدف دوم افزایش می‌یابد) و از طرف دیگر به‌منظور دست-یابی به شاخص افزونگی بهتر نیاز به نصب تعداد PMU بیشتر است که این امر موجب افزایش هزینه نصب (افزایش تابع هدف اول) می‌شود.

سیاسگذاری: این مقاله توسط بخش تحقیق و توسعه شرکت ماه آذین انرژی هور (ماهرور) تامین مالی شده است.

مراجع

- [1] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements-a historical overview," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*. IEEE/PES, 2002, pp. 476-479.
- [2] N.-c. CHANG, Z. Lan, D.-q. GAN, and Y.-x. NI, "A Survey on Applications of Wide-area Measurement System in Power System Analysis and Control [J]," *Power System Technology*, vol. 10, p. 010, 2005.
- [3] S.-k. Xu, X.-r. Xie, and Y.-z. XIN, "Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system [J]," *Power System Technology*, vol. 2, p. 009, 2005.
- [4] R. O. Burnett, M. M. Butts, and P. S. Sterlina, "Power system applications for phasor measurement units," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 7, pp. 8-13, 1994.
- [5] N. Manousakis, G. Korres, and P. Georgilakis, "Optimal placement of phasor measurement units: A literature review," in *Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, 2011 16th International Conference on, 2011, pp. 1-6.
- [6] P. Zhang and K. W. Chan, "Reliability evaluation of phasor measurement unit using Monte Carlo dynamic fault tree method," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, pp. 1235-1243, 2012.
- [7] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 2381-2388, 2005.
- [8] J. London, S. A. R. Piereti, R. Benedito, and N. Bretas, "Redundancy and observability analysis of conventional and PMU measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 1629-1630, 2009.
- [9] R. Sodhi, S. Srivastava, and S. Singh, "Optimal PMU placement method for complete topological and numerical observability of power system," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 1154-1159, 2010.

- measuring channels in smart power system," Electric Power Systems Research, vol. 141, pp. 421-431, 2016.
- [26] Masoud Esmaili, Mohammad Ghamsari-Yazdel, Reza Sharifi, "Enhancing observability in MILP-based optimal joint allocation of PMU channels and conventional measurements with new security concepts," Energy System, vol. 10, pp. 791-819, 2019.
- [27] Mohammad Hossein Rezaeian Koochi; Pooria Dehghanian; Saeid Esmaeili, "PMU Placement with Channel Limitation for Faulty Line Detection in Transmission Systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 135, pp. 1-9, 2019.
- [28] Zaker B, Karrari M, Mirsalim M, B. Gharehpetian G, Moaddabi N, "PMU-Based Matching Pursuit Method for Black-Box Modeling of Synchronous Generator," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2016; 12 (3):33-40 URL: <http://jiaeee.com/article-1-96-fa.html>
- [29] Khazaei M H, Haghjoo F, "A Comprehensive PMU-Based Fault Location Algorithm for Double Circuit and Multi-Terminal Transmission Lines," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2017; 14 (1):1-10 URL: <http://jiaeee.com/article-1-323-fa.html>
- [30] Torkashvand A, Ghasemi H, Aminifar F, "Parameters Estimation of Classical Model of Generator Using PMU Data," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2017; 14 (1):73-82 URL: <http://jiaeee.com/article-1-330-fa.html>
- [31] Ghasemi M A, Parniani M, "Determination of Effective Parameters in Frequency Control of Iran Electric Grid by Processing and Optimization of Recorded Data," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2017; 14 (3):55-68 URL: <http://jiaeee.com/article-1-449-fa.html>
- [32] M. Shiroie and S. Hosseini, "Observability and estimation of transformer tap setting with minimal PMU placement," in Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 2008, pp. 1-4.
- [33] R. C. Pires, L. Mili, and F. A. B. Lemos, "Constrained robust estimation of power system state variables and transformer tap positions under erroneous zero-injections," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, pp. 1144-1152, 2014.
- [34] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," Advances in engineering software, vol. 69, pp. 46-61, 2014.