جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری برای رویت‌پذیری کامل شبکه با در نظر گرفتن مسیر مخابراتی به کمک الگوریتم ژنتیک

ابراهیم اسدی[۱]، رضا کی‌پور[۲]، محمدصادق رستمی[۳]

[۱] مدیر امور دیسپاچینگ و مخابرات، معاونت بهره‌برداری، شرکت برق منطقه‌ای سمنان
asadi@semrec.co.ir

[۲] دانشیار گروه قدرت، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان
rkeypour@semnan.ac.ir

[۳] کارشناس فیبرنوی، امور دیسپاچینگ و مخابرات، معاونت بهره‌برداری، شرکت برق منطقه‌ای سمنان
ms.rostami@semrec.co.ir

چکیده

پایداری و امنیت شبکه، ارتباط مستقیمی با پایش دقیق و سریع شبکه دارد. با گسترش شبکه‌های انتقال نیرو، تخمین حالتی مناسبت جهت انجام اقدامات اصلاحی و جلوگیری از اغتشاش در سیستم و خاموشی‌های گسترده، اهمیت پیدا کرده‌است. واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU) با اندازه‌گیری فازورهای ولتاژ و جریان بصورت سنکرون در شبکه، نقش مهمی در رویت‌پذیری و تحلیل وقایع در شبکه ایفا می‌کنند. یکی از مسائل مهم در رویت‌پذیری شبکه، جایابی بهینه PMUها است. عمده مطالعات پیشین در این زمینه با فرض وجود ارتباط مناسب مخابراتی بین تمامی باس‌ها در شبکه انجام شده‌است اما در شبکه‌های واقعی، برخی از خطوط مجهز به بستر مخابراتی بوده و برخی دیگر بستر مخابراتی مناسب ندارند. این موضوع سبب می‌شود تا برای نیل به رویت‌پذیری کامل شبکه، تعداد PMUها و محل نصب آن‌ها بر روی باس‌ها، اهمیت یابد. در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با هدف کمینه نمودن هزینه، به جایابی بهینه PMUها پرداخته‌ایم و روشی ارائه کرده‌ایم‌تا برای حالت‌های مختلف مانند مجهز بودن تمامی خطوط و یا برخی خطوط‌به بستر مخابراتی و یا فقدان بستر مخابراتی در شبکه، رویت پذیری شبکه با حداقل هزینه محقق شود. روش پیشنهادی را بر روی یک شبکه واقعی نیز شبیه‌سازی کرده‌ایم که نتایج نشان‌دهنده کارآیی آن است.

کلمات کلیدی

واحد اندازه‌گیری فازوری؛ جایابی بهینه؛ بستر مخابراتی؛ رویت‌پذیری کامل؛ الگوریتم ژنتیک؛ مرکزپایش فازوری؛ سیم گارد فیبرنوری.

۱- مقدمه

با توجه به رشد روزافزون مصرف انرژی در دنیا که منجر به افزایش تولید و گسترش شبکه‌های انتقال شده است، مسئله حفظ پایداری و امنیت شبکه بیش از گذشته اهمیت پیدا کرده است. در همین راستا پایش دقیق‌تر و سریع‌تر شبکه برای بهره‌برداری مناسب ازآن و به دست آوردن تخمین حالتی مناسبت جهت انجام اقدامات اصلاحی و جلوگیری از اغتشاش در سیستم و خاموشی‌های گسترده، مورد نیاز است. اسکادا[۱] یک سیستم مرکزی برای نظارت و پایش یک سیستم قدرت است. سیگنال‌های اسکادا شامل اندازه ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط است [۱].

در سیستم اسکادا، سیگنال‌های مختلف وضعیت، اندازه‌گیری و کنترلی تجهیزات از پست به مرکز کنترل ارسال می‌شود. بهره‌بردار شبکه با استفاده از اطلاعات دریافتی از این سیستم، دستورهای کنترلی مورد نیاز را صادر می‌نماید. سیگنال‌های اسکادا علاوه بر اینکه فاقد اندازه‌گیری زاویه بوده و فقط شامل اندازه ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط می‌گردد، کاستی‌هایی نظیر نرخ پایین بروزرسانی داده‌ها، عدم همزمانی سیگنال‌ها، تأخیر در اجرای تخمین حالت سیستم و ... نیز داشته‌اند. از آنجا که توان اکتیو عبوری از خطوط انتقال با تقریب خوبی تابعی از سینوس اختلاف زاویه ولتاژ باس‌های دو طرف خط است، اندازه‌گیری فازورها در شبکه اهمیت پیدا کرده است.

برای غلبه بر این مشکلات در سیستم قدرت و اهمیت پایش فازورها در مانیتورینگ و تحلیل‌های شبکه و در راستای تحقق شبکه‌های هوشمند در سطح شبکه انتقال، سیستم اندازه گیری، حفاظت و کنترل ناحیه گسترده[۲] بنیان نهاده شده است. واحد اندازه‌گیری فازوری[۳] جزء اجتناب ناپذیر این سیستم است [۱و۲].

واحد اندازه‌گیری فازوری تجهیزی است که به طور سنکرون، فازور – دامنه و فاز– و فرکانس مربوط به ولتاژ و جریان را با برچسب زمانی اخذ شده از سیستم موقعیت یابی جهانی (GPS) اندازه‌گیری و ثبت می‌کند. با استفاده از واحد اندازه‌گیری فازوری، تخمین و نمایش دقیق حالت شبکه در مرکز پایش فازوری امکان‌پذیر شده و می‌توان پدیده‌های دینامیکی سیستم را مشاهده و عملیات کنترلی مناسب را اعمال نمود. با استفاده از فناوری جدید، تحلیل دینامیکی و استاتیکی حوادث شبکه در زمان حقیقی، میسر شده است. حفاظت پیشرفته بر اساس اندازه‌گیری سنکرون کمیات فازوری امکان‌پذیر خواهد بود. از مهمترین توابع کاربردی در شبکه‌های پایش گسترده می‌توان به مانیتورینگ پایداری ولتاژ[۴]، مانیتورینگ پایداری فرکانس[۵]، مانیتورینگ زاویه فاز[۶]، تخمین حالت[۷]، مانیتورینگ توان[۸]، آرشیو اطلاعات[۹] و ارزیابی نوسان توان[۱۰] اشاره نمود.

از اوایل دهه ۸۰ میلادی با استفاده از ماهواره‌های GPS ثبت لحظه به لحظه از شرایط سیستم قدرت میسر گردید. نمونه اولیه تحقیقاتی از واحدهای اندازه‌گیری فازوری در سال ۱۹۸۸ و در دانشگاه ویرجینیا ساخته شد. در سال ۱۹۹۵ نیز اولین استاندارد واحدهای اندازه گیری فازوری ایجاد شد. با توجه به اینکه ولتاژ باس و جریان خطوط انشعابی از آن توسط واحد اندازه‌گیری فازور محاسبه می‌گردد، ولتاژ باس‌های مجاور بر اساس قوانین مداری قابل محاسبه هستند. به همین دلیل نیاز به نصب واحدهای اندازه‌گیری فازوری بر روی تمامی باس‌های شبکه نبوده و اقتصادی هم نیست [۳]. لذا یکی از مسایل مهم برای رویت پذیری کامل شبکه، جایابی بهینه واحد اندازه‌گیری فازوری است.

اطلاعات واحدهای اندازه‌گیری فازوری باید به مرکز پایش فازوری ارسال گردد، لذا وجود یک بستر مخابراتی مناسب در شبکه ضروری است. در شبکه‌های انتقال نیروی کنونی، عمدتا از فیبرنوری که بر روی سیم گارد دکل‌های انتقال نیرو وجود دارد و معمولا با نام سیم گارد فیبرنوری[۱۱] یا OPGW شناخته شده است، به‌عنوان بستر مخابراتی ارسال اطلاعات واحدهای اندازه‌گیری فازوری استفاده می‌شود. در ادامه به تعدادی از پژوهش‌های مرتبط با این موضوع اشاره شده است.

در [۴] روش‌های مختلف جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری به همراه توضیح مختصری از هر روش و فواید آن بیان شده است. در این مقاله ابتدا فرمول‌بندی جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری بیان شده سپس دو روش عمده برای حل این مسایل بررسی شده است. دسته اول مربوط به روش‌های برنامه‌ریزی ریاضیاتی است و در آن به برنامه‌ریزی عدد صحیح[۱۲] اشاره شده است. در دسته دوم روش‌های اکتشافی[۱۳] مانند تبرید شبیه‌سازی شده[۱۴]، الگوریتم ژنتیک[۱۵]، جستجوی ممنوعه[۱۶]، ازدحام ذرات[۱۷] و ... معرفی شده و علمکرد این روش‌ها را برای حلت‌های متنوع استانداردهای ۱۴، ۳۰، ۳۱، ۳۷ و ۱۱۸ باس IEEE بررسی کرده است. برخی مقالات صرفا به موضوع جایابی PMU با استفاده از الگوریتم‌های متنوع پرداخته‌اند [۵]. نویسندگان این مقاله، با کمک یک تصویر، روش‌های متنوع حل مسایل بهینه‌سازی در جایابی را در دو دسته کلی (تکنیک‌های مرسوم و روش‌های غیرمتعارف) ارائه داده و در ادامه به پژوهش‌های مرتبط با هر روش اشاره کرده‌اند. در روش‌های مرسوم به تکنیک‌هایی مانند الگوریتم حریصانه، برنامه‌ریزی خطی و غیر خطی، روش‌های مبتنی بر جستجو و ... اشاره کرده و در روش‌های غیرمتعارف از روش‌هایی مانند یادگیری ماشینی، جستجوی ممنوعه، الگوریتم ژنتیک و ... نام برده‌اند. همچنین در [۶]، نویسندگان مانند دو مقاله قبلی، ابتدا یک دسته‌بندی از روش‌های مختلف حل مساله بهینه‌سازی مربوط به جایابی واحد اندازه‌گیری فازوری ارائه داده و طی آن به تکنیک‌های مختلف اشاره کرده و قابلیت اجرایی هرکدام را در شبکه استاندارد ۱۴ و ۳۰ باس IEEE آزموده‌اند. همچنین در شبکه‌های ۲۸ و ۵۲ باس واقعی در کشور نیجریه نیز این روش‌ها را پیاده‌سازی کرده و نتایج را مقایسه نموده‌اند.

در دسته دیگری از تحقیقات، با در نظر گرفتن برخی قیود در شبکه‌های واقعی، مساله بهینه‌سازی جایابی را مطرح کرده‌اند. در [۳] با وزن‌دهی خطوط انشعابی هر باس در حالت‌های مختلف تک پیشامد و همچنین در نظر گرفتن محل وقوع خطا در شبکه، در یک شبکه واقعی در کشور عمان و شبکه استاندارد ۳۰۰ باس IEEE مساله را بررسی کرده‌اند. در [۷] با روش ازدحام ذرات باینری نمایی و در نظر گرفتن قیود باس‌های حساس و دارای اولویت، مساله بهینه‌سازی را مطرح و بررسی نموده‌اند. در این پژوهش نتایج روش پیشنهادی بر روی شبکه‌های مختلف مانند ۱۴،

۵۷ و ۱۱۸ باس استاندارد IEEE و یک شبکه واقعی ۲۴۶ باس اعمال شده است. در [۲] با درنظر گرفتن هزینه تهیه PMU و بستر مخابراتی مناسب در دو حالتی که بستر موجود نباشد و یا موجود باشد، و نصب PMU بر روی باس‌های دارای اولویت وحساس و وقوع تک پیشامد در شبکه، با دو روش مختلف (که پیشنهاد نموده‌اند) بر روی شبکه‌های ۱۴، ۳۰ و ۱۱۸ باس استاندارد IEEE مساله را مطرح و بررسی کرده‌اند. همچنین تحقیقات دیگری مانند [۸و۹] با در نظر گرفتن قیودی مانند خروج خط یا PMU در شبکه در حالت تک پیشامد، مساله بهینه‌سازی جایابی را مطرح و بررسی و حل نموده‌اند.

هدف این مقاله، جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری و مسیر مخابراتی آن‌ها با هدف کمینه نمودن هزینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. در این مقاله روشی ارائه شده که برای حالت‌های مختلف اعم از مجهز بودن تمامی خطوط و یا برخی خطوط به بستر مخابراتی و یا فقدان بستر مخابراتی در شبکه، رویت پذیری شبکه با حداقل هزینه محقق شده و نشان داده می‌شود که نیازی به وجود بستر مخابراتی برای تمامی خطوط شبکه برای نیل به رویت‌پذیری کامل شبکه نیست. با توجه به قابلیت‌هایی که فیبرنوری دارد، در این مقاله، این بستر مخابراتی انتخاب و لحاظ شده است.

۲- بیان مساله جایابی

بر اساس بررسی بعمل آمده، عمده مطالعات صورت گرفته در زمینه جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری، با فرض وجود ارتباط مناسب مخابراتی بین باس‌ها برای انتقال اطلاعات PMUها به مرکز پایش فازوری بوده است. در شبکه‌های واقعی، تمامی خطوط شبکه مجهز به بستر مخابراتی مناسب برای ارسال اطلاعات واحدهای اندازه‌گیری فازوری نبوده و ممکن است فقط برخی از خطوط مجهز به بستر مخابراتی مناسب باشند و یا حتی در برخی شبکه‌ها، هیچ خطی دارای بستر مخابراتی مناسب نباشد و در نتیجه ارتباط مخابراتی مناسب بین تمامی باس‌ها در شبکه وجود نداشته باشد و این موضوع، تعداد PMUها و محل نصب آن‌ها بر روی باس‌ها، برای رویت‌پذیری کامل شبکه را تحت تاثیر خواهد گذاشت. به عبارتی دیگر ممکن است شبکه با تعداد مشخصی PMU و استفاده از مسیر خطوطی که مجهز به بستر مخابراتی موجود در شبکه هستند، رویت‌پذیر گشته و یا این امر با استفاده همزمان از بستر مخابراتی موجود در خطوط شبکه و احداث بستر مخابراتی جدید برای چند خط در شبکه محقق گردد و هیچ الزامی برای وجود بستر مخابراتی بر روی تمامی خطوط شبکه جهت رویت‌پذیری کامل نباشد. لذا در صورت تحقق این امر و با توجه به هزینه‌های بسیار زیاد بستر مخابراتی در شبکه، منافع اقتصادی زیادی حاصل خواهد شد.

با توجه به کاربردهای مهم PMU در شبکه، مساله جایابی آن‌ها در شبکه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ولتاژ باس‌ها و جریان خطوط انشعابی از باس‌ها توسط واحد اندازه‌گیری فازوری محاسبه می‌گردند، و براساس قوانین مداری ولتاژ باس‌های مجاور قابل محاسبه است. لذا نصب واحدهای اندازه‌گیری فازوری بر روی تمامی باس‌های شبکه الزامی نبوده و به کمک روش‌های بهینه سازی ریاضیاتی، بایستی بهترین مکان‌های نصب واحدهای اندازه‌گیری فازوری به منظور دست یابی به بیشترین رویت پذیری و یا رویت پذیری کامل شبکه، صورت پذیرد.

با توجه به اینکه مسایل جایابی از نوع بهینه‌سازی است، یک تابع هدف در جهت مینیمم سازی یا ماکزیم سازی با در نظرگرفتن یکسری از قیود و شرایط در نظر گرفته می‌شود. از برخی توابع هدف می‌توان به رویت پذیری بیشینه، رویت پذیری کامل، کمینه نمودن تعداد PMUها، حداقل نمودن هزینه اجرای طرح و ... اشاره نمود. همچنین قیودی مانند محدودیت تعداد کانال‌های PMU، تعداد خطوط انشعابی هر باس، باس‌های حساس، مسیرهای ارتباطی بین PMUها، محدود بودن بودجه، پهنای باند اختصاص داده شده به واحد اندازه‌گیری فازوری و ... در مساله جایابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که برای جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری از چهار قاعده و شش شرط استفاده کرده‌ایم [۱۰].

ارتباط بین واحدهای اندازه‌گیری فازوری و مرکزپایش فازوری باید از طریق یک بستر مخابراتی مناسب برقرار شود. همانگونه که بیان شد، از آن‌جا که در شبکه‌های انتقال نیروی کنونی، عمدتا از فیبرنوری OPGW به‌عنوان بستر مخابراتی ارسال اطلاعات واحدهای اندازه‌گیری فازوری استفاده می‌شود، در این‌جا نیز از همین بستر استفاده شده است. در ادامه این مقاله، منظور از فیبرنوری، OPGW است.

هدف این مقاله یافتن تعداد PMU و مناسب‌ترین مسیر مخابراتی بین آن‌ها با حداقل هزینه، برای رویت‌پذیری کامل شبکه است. برای نیل به این هدف، تعداد PMUها و محل نصب آن‌ها بر روی باس‌های شبکه در جهت رویت‌پذیری کامل شبکه باید محاسبه، و ارتباط مخابراتی بین این باس‌ها در حالت‌های مختلف با یکدیگر بررسی و هزینه هر حالت با در نظر گرفتن اثر فیبرنوری موجود (چنانچه در شبکه به صورت OPGW و یا هر شکل دیگری موجود باشد) و یا اجرای فیبرنوری مورد نیاز خطوط انتقال، محاسبه شود.

در شبکه‌هایی که برخی خطوط آن‌ها مجهز به فیبرنوری هستند، اگر ارتباط بین PMUهای مشخص شده برای رویت پذیری کامل شبکه با همان فیبرنوری موجود برقرار شود، نیازی به احداث فیبرنوری جدید بر روی سایر خطوط شبکه نیست و فقط هزینه تامین و نصب PMU به عنوان هزینه رویت‌پذیری شبکه لحاظ می‌شود و در غیر اینصورت حالتی

که شامل کمترین هزینه نصب PMU و استفاده همزمان از مسیرهای فیبرنوری موجود و احداث کمترین فیبرنوری جدید بر روی خطوط برای برقراری مسیر ارتباطی بین PMU ها است، باید انتخاب شود.

۳- فرم‌بندی مساله بهینه‌سازی جایابی

برای شبکه‌هایی که برخی خطوط آن مجهز به فیبرنوری هستند، ممکن است یافتن کوتاهترین مسیر بین PMUها جهت ارتباط آن‌ها با یکدیگر و احداث فیبرنوری بین آن‌ها، راه‌حل بهینه برای رویت‌پذیری نبوده و نیاز است تا روشی ارائه شود که همزمان با مشخص نمودن تعداد PMUها برای رویت‌پذیری کامل شبکه، از فیبرنوری موجود بر روی خطوط شبکه استفاده نماید و یا در صورت نیاز، مسیری با کمترین هزینه اجرای فیبرنوری جدید پیشنهاد شود.

چنانچه تمامی خطوط شبکه فاقد بستر مخابراتی باشند، علاوه بر محاسبه تعداد PMU برای رویت‌پذیری کامل شبکه، باید کوتاهترین مسیر ارتباطی بین آن‌ها برای احداث فیبرنوری جدید طوری انتخاب شود که هزینه کمینه باشد. در این گونه مسائل، طول خطوط و وجود یا عدم وجود فیبرنوری بین باس‌های شبکه، جهت محاسبه هزینه مهم است.

شبکه‌ای با I باس و K خط در نظر بگیرید. برای رویت‌پذیری کامل شبکه، تعداد مشخصی PMU مورد نیاز است که از طریق رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$f_i = \sum_{j=1}^{I} a_{ij}\, u_j \;\geq 1 \qquad (۱)$$

که در این رابطه، a_{ij} درایه‌های ماتریس ارتباط بین باس j و i است و مقادیر آن به شرح رابطه ذیل تعیین می‌شود:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{اگر باس i با j متصل باشد} \\ 1 & \text{اگر i=j باشد} \\ 0 & \text{اگر باس i با j متصل نباشد} \end{cases} \qquad (۲)$$

و u_j باس‌های شبکه هستند که اگر PMU بر روی آن‌ها نصب گردد برابر ۱ شده و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.

هزینه رویت‌پذیری شبکه، بستگی به تعدادPMU، طول مسیرهای ارتباطی بین آن‌ها و همچنین وجود یا عدم وجود فیبرنوری روی خطوط دارد. لذا تابع هزینه مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود و شامل دو بخش است: هزینه تامین و نصب و راه‌اندازی PMUها، و هزینه مسیر (یعنی احداث فیبرنوری جدید برای برقراری مسیر ارتباطی بین PMUها).

$$\text{Total Cost} = \text{Cost}_{\text{PMU}} + \text{Cost}_{\text{path}} \qquad (۳)$$

$$\text{Cost}_{\text{PMU}} = \text{N} \times \text{C}_{\text{PMU}} \qquad (۴)$$

$$\text{Cost}_{\text{path}} = \sum_{\text{i}\in\text{p}} \text{C}_{\text{OPGW}} \times (1 - g_i)\, \text{l}_i \;.\, \text{p} \in \text{r} \qquad (۵)$$

در رابطه (۳)، Cost_{PMU} هزینه مرتبط با PMU و $\text{Cost}_{\text{path}}$ هزینه مرتبط با برقراری مسیرهای ارتباطی بین واحدهای اندازه‌گیری فازوری است. در رابطه (۴)، N تعداد PMUها است که برابر با مجموع باس‌های انتخاب شده برای رویت پذیری در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای مورد استفاده در رابطه (۵) نیز بدین شرح است:

- r : با استفاده از ماتریس ارتباط بین باس‌ها، به هر خط بین دو باس در شبکه ، یک شماره تخصیص داده می‌شود و این شماره‌ها مجموعه r را تشکیل می‌دهند و بیانگر تعداد خطوط شبکه است. بنابراین: r={1,2,…,K}.
- P: زیرمجموعه‌ای از مجموعه r است که خطوط این مجموعه، ارتباط بین باس‌های انتخاب شده برای نصب PMU را برقرار می‌کند.
- g: وجود یا عدم وجود فیبرنوری هر خط متناظر با مجموعه r را مشخص می‌کند. اگر یک خط مجهز به فیبرنوری باشد مقدار این متغیر برای آن خط، برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ است.
- l: مجموعه متناظر با طول خطوط بین باس‌ها.

با توجه به توضیحات فوق، تابع هدف به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$\text{Min}\ \{\text{Total Cost}\} \qquad (۶)$$

$$= \text{Min}\ \{\ \text{N} \times \text{C}_{\text{PMU}} \ + \sum_{\text{i}\in\text{p}} \text{C}_{\text{OPGW}} \times (1 - g_i)\, \text{l}_i\ \}$$

s.t:

$$f_i = \sum_{j=1}^{\text{I}} a_{ij}\, u_j \;\geq 1 \;.\, i \in \text{I}$$

۴- بیان روش حل با کمک الگوریتم ژنتیک

برای بیان مفهوم روش پیشنهادی، یک شبکه ۷ باس واقعی همانند شکل (۱) که برخی از خطوط آن (خطوط ۳-۱ ، ۷-۱ ، ۶-۷) مجهز به فیبر نوری می باشند، درنظر گرفته شده است. خطوط مجهز به فیبرنوری موجود در شبکه، با رنگ قرمز در شکل نشان داده شده است. از روی ماتریس ارتباط به هر خط یک شماره به شرح ذیل تخصیص داده می‌شود:

1: line1,2	4: line2,3	7: line4,5
2: line1,3	5: line2,4	8: line5,6
3: line1,7	6: line3,4	9: line6,7

مجموعه‌هایr ، g ، l به شرح ذیل خواهند بود:

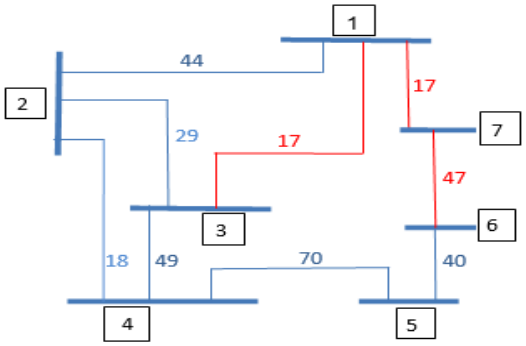
r = {1 ,2 ,3 ,4 ,5 ,6 ,7 ,8 ,9}

g= {0 ,1 ,1 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,1}

l = {44 ,17 ,17 ,29 ,18 ,49 ,70 ,40 ,47}

برای رویت پذیری کامل این شبکه، چهار حالت جهت نصب PMU روی باس های مختلف وجود دارد که عبارتند از:

- نصب دو PMU بر روی باس‌های ۱ و ۵
- نصب دو PMU بر روی باس‌های ۳ و ۶
- نصب دو PMU بر روی باس‌های ۲ و ۶
- نصب دو PMU بر روی باس‌های ۴ و ۷



شکل (۱): شبکه ۷ باس نمونه

شبکه ۷ باس نمونه با هر یک از حالت های فوق رویت‌پذیر می‌شود و در هر حالت مسیرهای مختلف با طول های متفاوت برای ارتباط PMUها وجود دارد. لذا علاوه بر این که هزینه حالت‌های مختلف، متفاوت خواهد بود، هزینه هر حالت نیز بسته به مسیرهای مختلف ارتباط بین PMUها در آن حالت، متفاوت است.

نتیجه رویت‌پذیری کامل این شبکه با کوتاه‌ترین مسیر ارتباطی بین PMUها و همچنین رویت‌پذیری کامل این شبکه با کمترین هزینه مسیر ارتباطی بین PMUها در جدول (۱) نشان داده شده است.

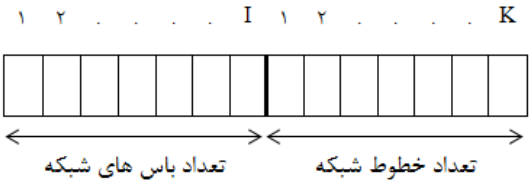
جدول۱: نتیجه رویت پذیری شبکه ۷ باس نمونه

وضعیت نصب رویت پذیری	باس‌های نصب PMU	شماره خطوط ارتباطی PMU	مجموع مسیر (km)	فیبرنوری جدید مورد نیاز (km)
کوتاهترین مسیر	۷ ،۴	۵ ،۳ ،۱	۷۹	۶۲
کمترین هزینه	۶ ،۳	۹ ،۳ ،۲	۸۱	۰

شبکه ۷ باس نمونه با دو دستگاه PMU رویت‌پذیر خواهد شد. کوتاه‌ترین مسیر ارتباطی برای رویت‌پذیری شبکه فوق، مربوط به نصب PMU بر روی باس‌های ۴ و ۷ با مجموعه p شامل شماره خطوط ۳، ۵ و ۱ است ولی چون برخی خطوط این مسیر مجهز به فیبرنوری نیستند، برای ارتباط بین PMUها، باید فیبرنوری جدید احداث شود و مستلزم صرف هزینه است. در حالیکه در همین شبکه، با نصب PMU بر روی باس‌های ۳ و ۶ با مجموعه p شامل شماره خطوط ۳، ۹ و ۲ نیز رویت‌پذیر می‌شود و علیرغم اینکه طول مسیر ارتباطی بین PMUها بیشتر است، از آنجا که کل مسیر مجهز به فیبرنوری است، نیاز به احداث فیبرنوری جدید برای ارتباط PMUها با یکدیگر نبوده و در نتیجه دارای کمترین هزینه است. لذا نصب PMU روی باس‌های ۳ و ۶ با مسیر مشخص شده در جدول (۱)، بهترین حالت برای رویت‌پذیری شبکه فوق است.

برای حل مسئله در شبکه‌های بزرگ‌تر، از الگوریتم ژنتیک در نرم افزار متلب استفاده کرده‌ایم. برای هر جمعیت در این الگوریتم، دو بخش مطابق شکل (۲) و شرح ذیل در نظر گرفته‌ایم:

- بخش اول: شامل تعداد کل باس‌های شبکه است و چنانچه PMU در یک باس نصب شود، مقدار آن یک و در غیر این صورت مقدار آن صفر می‌شود؛
- بخش دوم: شامل تعداد کل خطوط شبکه برای برقراری مسیر ارتباطی بین PMUها است. خطوطی که ارتباط بین باس‌های انتخاب شده برای نصبPMU را برقرار می‌کند، مقدار آن‌ها برابر با ۱ و در غیر اینصورت مقدار آن‌ها ۰ در نظر گرفته می‌شود.



شکل(۲): بخش‌های جمعیت در الگوریتم ژنتیک

بعد از انتخاب تعدادPMU و باس‌های محل نصب آن‌ها که از شرط تابع رویت‌پذیری -رابطه (۱)- بدست می‌آید، یک مسیر که شامل تعدادی خط از مجموعه خطوط شبکه است، برای برقراری ارتباط بین PMUها پیشنهاد می‌شود. در صورتی که مسیر پیشنهادی، ارتباط بین باس‌های انتخاب شده را برقرار نماید، هزینه آن مسیر توسط تابع هزینه -رابطه (۳)- محاسبه می‌شود و در صورتی که مسیر پیشنهادی ارتباط بین باس‌های انتخاب شده را برقرار ننماید، مسیر پیشنهادی تایید نمی‌شود و در تابع هزینه نیز لحاظ نمی‌شود. برای هر جمعیت تشکیل داده شده، هزینه مربوطه محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌شود. از آن‌جا که کمینه نمودن هزینه، به عنوان هدف مساله بهینه‌سازی تعریف شده است، جمعیت‌های جدید با کمک جمعیت‌های قبلی و جهش‌های انجام شده، تشکیل شده و این فرایند مجددا تکرار شده تا جواب بهینه بدست آید. شرط توقف تکرار در این مقاله مقدار ۳۰۰ تکرار (به صورت تجربی) و یا تغییرات کمتر از ۰.۱ درصد در تابع برازندگی درنظر گرفته شده است.

۵- شبیه‌سازی عددی

برای نشان دادن کارایی الگوریتم ارائه شده، چند شبکه واقعی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. توجه شود که در این مطالعات، هزینه احداث

یک کیلومتر فیبرنوری را a واحد، و هزینه‌ی تامین و نصب یک دستگاه PMU را برابر با 10*a فرض کرده‌ایم.

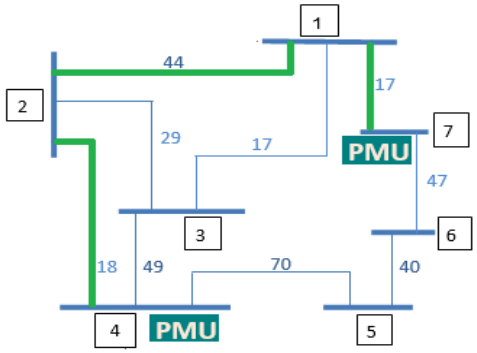
۵-۱- شبکه ۷ باس فاقد فیبرنوری

شبکه ۷ باس نمونه شکل (۱) با فرض این‌که هیچ خط آن مجهز به فیبرنوری نیست، در نظر گرفته شده است. نتیجه الگوریتم با استفاده از اجرای روش پیشنهادی، در جدول(۲) آمده است.

جدول(۲): نتیجه رویت پذیری شبکه ۷ باس نمونه فاقد فیبرنوری

تعداد PMU	باس نصب PMU	شماره خطوط ارتباطی PMU	مجموع مسیر (km)	فیبرنوری جدید (km)	مجموع هزینه
۲	۷ ، ۴	۵،۳،۱	۷۹	۷۹	۲۰a+۷۹a

همان‌طور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود، این شبکه با دو دستگاه PMU بر روی باس‌های۴ و ۷ رویت‌پذیر شده و کوتاهترین مسیر بین دو دستگاه واحد اندازه‌گیری فازوری در این شبکه که همان خطوط ۱،۳و ۵ هستند، برای احداث فیبرنوری جدید بعنوان بستر ارتباطی PMUها انتخاب شده است. نتیجه نصب PMU، در شکل(۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): نتیجه نصب PMU در شبکه ۷ باس نمونه فاقد فیبرنوری

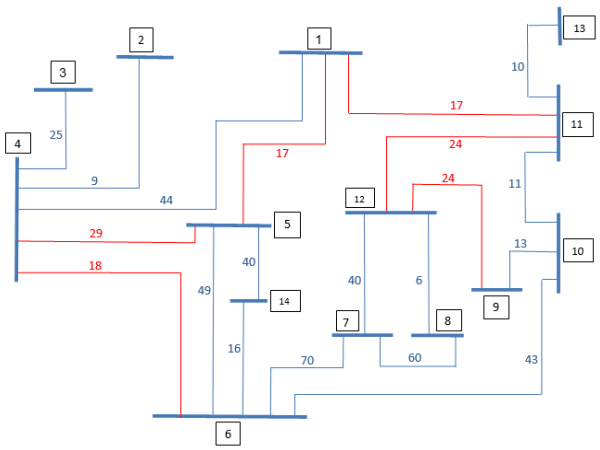
۵-۲- شبکه ۱۴ باس

شبکه ۱۴ باس شکل (۴) که برخی از خطوط آن مجهز به فیبر نوری می‌باشند درنظر گرفته شده است. نتیجه حاصل از اجرای روش پیشنهادی بر روی شبکه ۱۴ باس در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): نتیجه رویت پذیری شبکه ۱۴ باس

تعداد PMU	باس نصب PMU	شماره خطوط ارتباطی PMU	مجموع مسیر (km)	فیبرنوری جدید (km)	مجموع هزینه
۴	۵ ، ۴ ۱۲ ، ۱۱	۱-۱۱،۱۱-۱۲ ۴-۵،۱-۵	۸۷	۰	۴۰a

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، این شبکه با ۴ دستگاه PMU رویت پذیر می‌گردد و چون ارتباط این PMUها از طریق مسیری که همگی مجهز به فیبر نوری موجود شبکه هستند، برقرار گشته است، هزینه‌ای برای مسیر مخابراتی بین PMUها مورد نیاز نمی‌باشد و فقط هزینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری در هزینه طرح لحاظ شده است.

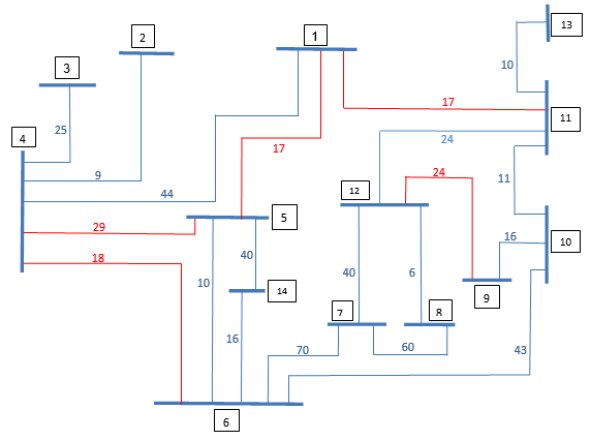


شکل(۴): شبکه ۱۴ باس

۵-۳- شبکه ۱۴ باس تغییر یافته

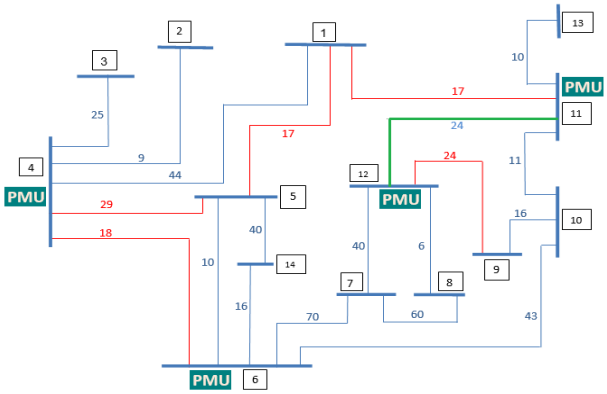
برای نشان دادن صحت کارآیی روش ارائه شده که یافتن تعداد و مسیر مخابراتی PMUها با کمترین هزینه برای رویت‌پذیری کامل شبکه است، تغییراتی به شرح ذیل در شبکه ۱۴ باس شکل (۴) داده می‌شود. این تغییرات در شکل (۵) نشان داده شده است.

- حذف فیبرنوری مسیر ۱۲-۱۱
- کاهش طول مسیر ۶-۵ از ۴۹ به ۱۰ کیلومتر
- افزایش طول مسیر ۱۰-۹ از ۱۳ به ۱۶ کیلومتر



شکل (۵): شبکه ۱۴ باس تغییر یافته

نتیجه حاصل از اجرای روش پیشنهادی برای رویت‌پذیری شبکه ۱۴ باس تغییر یافته، در جدول (۴) آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که رویت‌پذیری این شبکه، با ۴ دستگاه PMU و استفاده از پنج مسیر فیبرنوری موجود شبکه و یک مسیر مورد نیاز برای احداث فیبر نوری جدید، محقق شده است. شکل (۶) نصب PMU را بر روی باس‌های انتخابی شبکه مورد بحث نمایش می‌دهد.



شکل (۶): شبکه ۱۴ باس تغییر یافته بعد از نصب PMU و فیبرنوری

نکات قابل توجه برای ارتباط PMUهای انتخاب شده در این حالت به شرح ذیل است:

الف) مسیر مستقیم باس‌های ۱۱ و ۱۲ با طول ۲۴ کیلومتر که از سایر مسیرهای ارتباطی این دو باس کوتاه‌تر است، برای احداث فیبرنوری جدید، در جهت کمینه نمودن هزینه، انتخاب شده است.

ب) مسیر مستقیم بین باس‌های ۵ و ۶، علیرغم داشتن طول کوتاه‌تر نسبت به سایر مسیرهای ارتباطی این دو باس، به دلیل لزوم صرف هزینه فیبرنوری جدید، انتخاب نشده و به جای آن مسیرهای ۴-۵ و ۶-۴ که مجهز به فیبرنوری بوده و هزینه‌ای برای فیبرنوری ندارند و باعث تحقق بخشیدن به هدف مساله می‌شوند، انتخاب شده‌اند.

جدول (۴): نتیجه رویت پذیری شبکه ۱۴ باس تغییر یافته

تعداد PMU	باس نصب PMU	شماره خطوط ارتباطی PMU	مجموع مسیر (km)	فیبرنوری جدید (km)	مجموع هزینه
۴	۶ ،۴ ۱۲ ،۱۱	۴-۵،۴-۶ ۱-۵،۱-۱۱ ۱۱-۱۲،۹-۱۲	۱۲۹	۲۴	۴۰a+۲۴a

۵-۴- شبکه‌های ۱۴ و ۵۷ باس استاندارد IEEE

برای نشان دادن صحت کارکرد روش ارائه شده و همچنین مقایسه با سایر مقالات در زمینه جایابی واحدهای اندازه‌گیری فازوری [۱۳-۱۱] که بستر مخابراتی در شبکه را کامل فرض نموده‌اند، شبکه‌های ۱۴ و ۵۷ باس استاندارد IEEE با فرض مجهز بودن تمامی خطوط شبکه به فیبر نوری، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و تعداد PMU برای رویت پذیری این شبکه‌ها محاسبه شده است.

بر اساس شبیه‌سازی انجام شده، برای شبکه با ۱۴ باس، تعداد ۴ دستگاه PMU مورد نیاز است که این تعداد، برابر با نتایج مطالعات پیشین است. همچنین برای شبکه ۵۷ باس، تعداد ۱۷ دستگاه PMU مورد نیاز خواهد بود که در مطالعات گذشته نیز این تعداد محاسبه و گزارش شده است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری با در نظر گرفتن مسیر مخابراتی بین آن‌ها و همچنین توجه به مسائل اقتصادی، در رویت‌پذیری شبکه نقش مهمی دارد. در این مقاله به جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری و مناسب‌ترین مسیر ارتباطی بین آن‌ها برای ارسال اطلاعات به مرکز پایش و با هدف کمینه نمودن هزینه در شبکه پرداخته شده است. ابتدا مساله جایابی به صورت یک مساله بهینه‌سازی فرمبندی شده و در ادامه برای حل آن مساله از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌ایم.

برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، چند شبکه مختلف (واقعی یا استاندارد) را برای جایابی بهینه محل نصب PMU انتخاب کرده‌ایم. برخی از این شبکه‌ها از نظر بستر مخابراتی، تمام متصل هستند و در برخی دیگر بین PMUها، ارتباط مخابراتی برقرار نیست. در چند حالت مختلف، روش پیشنهادی را بررسی کرده‌ایم.

نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی روش پیشنهادی، نشان می‌دهد که در شبکه‌هایی که برخی از خطوط آن‌ها مجهز به بستر مخابراتی است، رویت‌پذیری شبکه با استفاده از تعدادی واحد اندازه‌گیری فازوری و بستر مخابراتی موجود و یا استفاده از بستر مخابراتی موجود و احداث کوتاهترین مسیر مخابراتی جدید، حاصل می‌شود و لزومی به مجهز کردن تمامی خطوط شبکه به بستر مخابراتی برای رویت‌پذیری شبکه نیست و در شبکه‌هایی که فاقد بستر مخابراتی باشند، کوتاهترین مسیر برای احداث بستر مخابراتی جهت ارتباط با واحدهای اندازه‌گیری فازوری انتخاب شده، محاسبه و پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[1] A. Enshaee, R.A. Hooshmand, and F.H. Fesharaki, “A new method for optimal placement of phasor measurement units to maintain full network observability under various contingencies.,” *Electric Power Systems Research*. vol. 89, pp. 1–10, 2012.

[2] C.D. Patel, T.K. Tailor, S.K. Shukla, S. Shah, and S.N. Jani, “Steiner Tree-Based Design of Communication Infrastructure With Co-Optimizing the PMU Placement for Economical Design of WAMS.,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. vol. 71, pp. 1–11, 2022.

[3] A. Al-Hinai, A.R. Karami-Horestani, and H.H. Alhelou, "A multi-objective optimal PMU placement considering fault-location topological observability of lengthy lines: A case study in OMAN grid.," *Energy Reports*. vol. 9, pp. 1113–1123, 2023.
[4] A. Dixit, A. Chowdhury, and P. Saini, "A review on optimal placement of phasor measurement unit (PMU).," In: *System Assurances: Modeling and Management*. pp. 513–530. *Elsevier* (2022).
[5] P. Riyas and S.A. Lakshmanan, "Comparative Analysis of Algorithms for the Optimum Placement of PMUs in Power Systems.," *IEEE IAS Global Conference on Renewable Energy and Hydrogen Technologies (GlobConHT)*, 2023, pp. 1–7.
[6] A. Abdulkareem, D. Ogbe, and T. Somefun, "Review of different methods for optimal placement of phasor measurement unit on the power system network.," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. vol. 5, no. 6, pp. 1071–1081, 2020.
[7] T.K. Maji and P. Acharjee, "Multiple Solutions of Optimal PMU Placement Using Exponential Binary PSO Algorithm for Smart Grid Applications.," *IEEE Transactions on Industry Applications*. vol. 53, no. 3, pp. 2550–2559, 2017.
[8] R. Bhattacharjee and A. De, "A Novel Bus-Ranking-Algorithm-Based Heuristic Optimization Scheme for PMU Placement.," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. vol. 19, no. 9, pp. 9921–9932, 2023.
[9] S. Ghosh, Y.J. Isbeih, S.K. Azman, M.S. El Moursi, and E. El-Saadany, "Optimal PMU Allocation Strategy for Completely Observable Networks With Enhanced Transient Stability Characteristics.," *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 37, no. 5, pp. 4086–4102, 2022.
[10] 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.
[11] M.K.D. Chejarla and S.K. Matam, "Multiple Solutions for Optimal PMU Placement Using a Topology-Based Method.," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*. vol. 102, no. 2, pp. 249–259, 2021.
[12] A.A.A. El-Ela, M.T. Mouwafi, and A.A. Elbaset, "Optimal Placement of PMUs in Smart Power Systems.," In: *Modern Optimization Techniques for Smart Grids*. pp. 57–106. *Springer International Publishing*, Cham (2023).
[13] S. Kundu, M. Alam, B.K. Saha Roy, and S.S. Thakur, "Allocation of Optimal PMUs for Power System Observability Using PROMETHEE Approach.," *International Transactions on Electrical Energy Systems*. vol. 2022, pp. 1–16, 2022.

زیرنویس‌ها

[1] SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition
[2] WAMPAC: Wide Area Monitoring, Protection And Control
[3] PMU: Phasor Measurement Unit
[4] VSM: Voltage Stability Monitoring
[5] FSM: Frequency Stability Monitoring
[6] PAM: Phase Angle Monitoring
[7] SE: State Estimation
[8] PM: Power Monitoring
[9] EDA: Event Data Archiving
[10] POA: Power Oscillation Assessment
[11] OPGW: Optical Ground Wire
[12] Integer Programing
[13] Heuristic
[14] Simulating Anneling
[15] Genetic Algorithm (GA)
[16] Tabu Search (TS)
[17] Particle Swarm (PS)