

طراحی هم‌زمان اجزای سیستم اندازه‌گیری فراگیر در شبکه‌های قدرت مدرن با هدف کمینه‌سازی هزینه کل

مصطفی بگ‌محمدی^۱، رحمت‌الله هوشمند^۲، فریبرز حقیقت‌دار فشارکی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

mbmohammadi186@yahoo.com

۲- استاد تمام، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

r_hooshmand@yahoo.com

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

fr_haghighat@yahoo.com

چکیده

افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و مطرح‌شدن پدیده تجدید ساختار در شبکه‌های قدرت و مشکلات حاصل از آن‌ها، باعث افزایش تمایل بهره‌برداران شبکه‌های قدرت به استفاده از WAMS (Wide Area Measurement System) به جای SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) شده است. یکی از مباحث مهم در WAMS کاهش هزینه‌ی جابجایی بهینه PMU (Phasor Measurement Unit) و هزینه ساختار ارتباطی مربوط به آن‌ها است. در این مقاله روش جدیدی برای طراحی WAMS با هدف کاهش هزینه‌های آن ارائه شده است. برای این منظور با استفاده از الگوریتم حریصانه، مکان‌های بهینه برای PMUها تعیین شده است و هم‌زمان با استفاده از الگوریتم Bellman-Ford مینیمم ساختار ارتباطی مورد نیاز طراحی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که هزینه کل طراحی WAMS کاهش یابد. همچنین با استفاده از الگوریتم Bellman-Ford مکان بهینه PDC (Phasor Data Concentrator) نیز مشخص می‌شود. این روش در شرایط عملکرد عادی سیستم و در شرایط خروج تکی PMU و خروج تکی هر یک از خطوط سیستم نیز مطرح شده است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در شبکه‌های ۳۰ و ۱۱۸ شین IEEE و شبکه ۲۳۰kV و ۴۰۰kV استان اصفهان نشان‌دهنده کارایی مناسب روش مطرح‌شده در این مقاله است.

واژه‌های کلیدی: جابجایی بهینه، سیستم ارتباطی، سیستم اندازه‌گیری فراگیر، واحد اندازه‌گیری فازور، واحد جمع‌آوری داده‌های فازوری.

۱- مقدمه

امنیت سیستم، نمایش شرایط بهره‌برداری فعلی آن بوده است؛ به‌نحوی که پس از بررسی آن، تصمیم‌های احتمالی لازم جهت حفظ شرایط عملکرد مطلوب گرفته شود. سیستم SCADA به علت هم‌زمان‌نبودن اندازه‌گیری‌ها نمی‌تواند شرایط بهره‌برداری فعلی سیستم را به خوبی نمایش دهد. از طرف دیگر، افزایش مصرف انرژی الکتریکی و مطرح‌شدن بازار در سیستم قدرت باعث شده است که شبکه‌های قدرت در حدود خود بهره‌برداری شود؛ به‌گونه‌ای که باعث به‌وجودآمدن مشکلاتی در عملکردهای پیشی،

یکی از مسائل مهم در بُعد بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، حفظ امنیت آن است. اولین قدم در راه ارزیابی

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۷/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۱

نام نویسنده مسئول: مصطفی بگ محمدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان -

دانشکده مهندسی برق

نماید، نقشی اساسی در دستیابی به پاسخ بهینه مسئله ایفا می‌کند. بنابراین، تفاوت میان این روش‌ها در چگونگی بیان قیود مورد نیاز مسئله بهینه‌سازی است. این قیود در [۶] در قالب مجموعه‌ای از نامعادلات خطی مطرح می‌شود. در [۷]، جایابی بهینه PMUها با حضور اندازه‌گیری‌های مرسوم به صورت برنامه‌ریزی صحیح خطی مدل شده است. در [۸] جایابی بهینه PMUها به صورت مرحله‌ای و در چندین مرحله مطرح شده است. جایابی بهینه PMUها در شرایط عملکرد عادی سیستم و در شرایط خروج یک خط در [۹] در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح دودویی مدل شده است. در [۱۰] نیز جایابی بهینه PMUها با در نظر گرفتن محدودیت برای تعداد کانال‌های PMU، به صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح دودویی مدل شده است. از میان روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نیز که تاکنون برای حل مسئله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازور استفاده شده است، می‌توان به اتوماتای یادگیری سلولی [۱۱]، جستجوی دودویی [۱۲] جستجوی تابو [۱۳] و بهینه‌سازی گروهی ذرات [۱۴] اشاره کرد. تمامی این روش‌ها، تنها به مسئله جایابی بهینه PMUها می‌پردازند؛ بنابراین توجهی به سایر بخش‌ها و طراحی WAMS ندارند. به ندرت در مقالات دیده می‌شود که به طور هم‌زمان همه بخش‌های WAMS در نظر گرفته شده باشد و بهینه‌سازی در آن‌ها انجام شود [۲]. در برخی روش‌ها کاهش تعداد مکان‌های PMU به عنوان کاهش هزینه‌های ارتباطی در نظر گرفته شده است [۱۵، ۱۶]. تنها در [۲] مسئله جایابی PMUها و ساختار ارتباطی آن، به گونه‌ای که هزینه‌های مجموع مینیمم شود، مطرح شده است. در این روش از الگوریتم ژنتیک چندمنظوره برای دستیابی به این هدف استفاده شده است. البته این روش بسیار زمان‌بر بوده و در شبکه‌های بزرگ ممکن است نتواند به جواب برسد. در آنجا مکان مرکز جمع‌آوری داده‌های فازوری و ساختار ارتباطی آن نیز ارائه نشده است.

در این مقاله، سیستم اندازه‌گیری و ارتباطی WAMS به طور هم‌زمان در نظر گرفته شده است و روش جدیدی

کنترلی و حفاظتی سیستم SCADA شده‌اند. در نتیجه یک علاقه بین‌المللی، هم در صنعت و هم در آکادمی‌ها، برای استفاده از تکنولوژی‌های کنترل و مانیتور بر مبنای PMU وجود دارد [۱]. این تکنولوژی‌ها به عنوان سیستم اندازه‌گیری وسیع شناخته می‌شوند.

کل شبکه WAMS می‌تواند در سه تابع مختلف تعریف شود: ۱. دستیابی به اطلاعات؛ ۲. انتقال اطلاعات؛ ۳. پردازش اطلاعات. وسایل اندازه‌گیری و سیستم ارتباطی به همراه سیستم مدیریت انرژی این توابع را انجام می‌دهند [۲]. در بخش اول، PMUها که در کل شبکه توزیع شده‌اند مسئول آماده‌کردن اطلاعات خام شبکه هستند [۳]. در بخش دوم، یک سیستم ارتباطی باید در کل شبکه ایجاد شود تا اطلاعاتی که PMUها مهیا کرده‌اند را جمع‌آوری کند. تأخیر و کیفیت داده‌هایی که از PMUها منتقل می‌شوند، بستگی به قابلیت و ساختار زیر ساخت ارتباطی دارد [۴]. سیستم‌های جدید بر مبنای مدل لایه‌ای سیستم باز به هم پیوسته^۱ (OSI) طراحی شده‌اند. در این ساختار لایه بالایی فرض می‌کند که لایه پایینی به طور کامل کار می‌کند، بدون اینکه در مورد عملکرد آن چیزی بدانند. این موضوع باعث کاهش پیچیدگی‌های استانداردسازی آن‌ها می‌شود. مدل مرجع OSI دربردارندهٔ هفت لایه است: لایه فیزیکی، لایه لینک داده، لایه شبکه، لایه انتقال، لایه جلسه^۲، لایه ارائه^۳ و لایه کاربرد [۲]. آخرین بخش WAMS که عمدتاً با بسته‌های نرم‌افزاری سروکار دارد، به عنوان سیستم مدیریت انرژی شناخته می‌شود. در این بخش تخمین حالت به عنوان مهم‌ترین تابع است [۵].

تاکنون تحقیقات درباره WAMS، بیشتر معطوف به بحث جایابی بهینه PMU بوده است که از روش‌های مختلفی نیز برای این منظور استفاده شده است [۱۴-۶]. این روش‌ها را می‌توان در دو دسته کلی، روش‌های قطعی^۴ و روش‌های بهینه‌سازی تکاملی تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های قطعی، مسئله جایابی بهینه PMUها در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح بیان می‌شود. این روش، تعریف مناسب قیودی که ارضای هدف مد نظر مسئله را تضمین

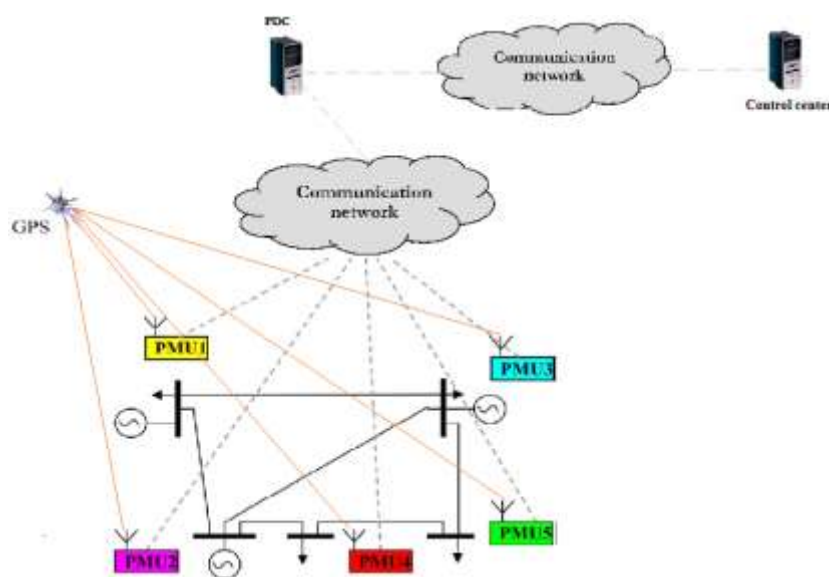
۲- طراحی WAMS

شکل (۱)، یک نمونه از سیستم WAMS را نشان می‌دهد. در این شکل، PMUها که در شین‌های مختلف شبکه قرار دارند، داده‌های فازوری را جمع‌آوری کرده است و آن‌ها را از طریق سیستم ارتباطی به یک مرکز جمع‌آوری داده‌های فازوری (PDC) انتقال می‌دهند. PDCها نیز بعد از یک پردازش اولیه بر روی این داده‌ها، آن‌ها را به مرکز کنترل انتقال می‌دهند تا تصمیم‌های عملکردی و کنترلی لازم اتخاذ شود.

در سیستم‌های WAMS، هزینه‌های مربوط به سیستم اندازه‌گیری و سیستم ارتباطی مورد نیاز آن، در مقایسه با بخش سوم WAMS که بیشتر مربوط به بسته‌های نرم‌افزاری است، بسیار شایان توجه است.

برای بهینه‌سازی در طراحی آن‌ها براساس هزینه مطرح شده است. این روش قادر است علاوه بر جایابی PMUها، مکان بهینه PDC و نیز مینیمم ساختار ارتباطی مورد نیاز از هر PMU به PDC را مشخص کند. این روش با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثر وجود شین‌هایی با توان تزریقی صفر و در حالت خروج تکی خطوط و خروج تکی PMU نیز مطرح شده است. نتایج شبیه‌سازی، توانایی الگوریتم پیشنهادی در کاهش هم‌زمان هزینه‌های نصب PMU و طراحی سیستم ارتباطی آن‌ها را به خوبی نشان می‌دهد.

ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است. در بخش ۲ طراحی WAMS مطرح می‌شود. سپس در بخش ۳ روش پیشنهادی در شرایط مختلف سیستم ارائه می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. مقاله در بخش ۵ با نتیجه‌گیری پایان یافته است.



شکل (۱): یک نمونه از سیستم WAMS

کامل رؤیت‌پذیر شود. این مسئله به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$\min \sum_{i=1}^N c_i x_i \quad (1)$$

$$\text{S.t. } AX \geq \hat{1} \quad (2)$$

که در آن X بردار جایابی PMUها است که x_i مؤلفه

در سیستم اندازه‌گیری، با ابداع PMU، امکان سنکرون‌سازی اندازه‌گیری‌های کل شبکه با استفاده از سیگنال‌های ماهواره‌ای سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) فراهم شد. در این بخش بحث جایابی بهینه PMU مطرح است. هدف در مسئله جایابی PMUها، یافتن مینیمم تعداد آن‌ها و همچنین مکان آن‌ها است؛ به گونه‌ای که شبکه به‌طور

\hat{a}_m آن است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x_i = \begin{cases} 1; & \text{if a PMU is installed at bus } i \\ 0; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۳)$$

همچنین $N \times N$ تعداد شین‌های شبکه است و A ماتریس

تعریف می‌شود:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j \\ 1, & \text{if buses } i \text{ and } j \text{ are connected} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۴)$$

$\hat{1}$ یک بردار به طول N که تمام درایه‌های آن یک است و C_i هزینه مربوط به نصب PMU در شین \hat{a}_m است. هزینه PMUها بستگی به چندین فاکتور از جمله: تعداد کانال‌ها، اتصالات CTها و PTها، اتصالات قدرت، اتصالات زمین و گیرنده GPS دارد [۹].

سیستم ارتباطی نقش بسیار مهمی در سیستم قدرت دارد و می‌توان آن را به شبکه عصبی در بدن انسان تشبیه کرد. همان گونه که نقص و عیب در شبکه عصبی ممکن است باعث فلج شدن فرد شود، نقص و عیب هم در سیستم ارتباطی ممکن است باعث فروپاشی بخشی و یا حتی کل سیستم قدرت شود؛ زیرا همه فعالیت‌های کنترلی، عملکردی و حفاظتی به شدت وابسته به عملکرد و مشخصه‌های سیستم ارتباطی است. در لایه اول سیستم‌های ارتباطی که بر مبنای مدل لایه‌ای طراحی شده‌اند، رسانه ارتباطی و ارتباط فیزیکی بین فرستنده و گیرنده را برقرار می‌کند. مشخصه‌های رسانه ارتباطی به شدت مشخصه‌های سیستم ارتباطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به علت مزایایی که فیبر نوری دارد، از جمله: پهنای باند بالا، تلفات کم انتشار نور، تضعیف کم، ایمن بودن در مقابل تداخل الکترومغناطیسی و امنیت زیاد آن، باعث شده است که به عنوان تکنولوژی اصلی شبکه ستون فقراتی^۶ WAMS در بسیاری از شرکت‌های بهره‌برداری پذیرفته شود [۱۷].

در این بخش، هدف یافتن مینیمم طول شبکه فیبر نوری و تعداد شین‌هایی که در مسیر از PMUها به PDC هستند، جهت مینیمم کردن هزینه ساختار ارتباطی است. این باید به گونه‌ای باشد که همه PMUها را به یک مرکز جمع‌آوری فازورها متصل کند. این مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر

تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^m (C_{oi} \cdot L_{oi} + w \cdot CI \text{ Node Path}_i) & (۵) \\ \text{St. OPGW Network connect all pmu to PDC} & (۶) \end{cases}$$

که m تعداد PMUهای نصب شده است و L_{oi} طول لینک فیبر نوری بین PDC تا \hat{a}_m PMU است. C_{oi} کل هزینه نصب یک کیلومتر کابل OPGW است. $CI \text{ Node Path}_i$ نوعی کابل فیبر نوری است. نشان‌دهنده مجموع شین‌هایی است که در مسیر شبکه ارتباطی از \hat{a}_m PMU به PDC است. در واقع، هر $CI \text{ Node}$ نشان‌دهنده شینی است که در آن سوئیچ و روتر نصب می‌شود. واضح است که هرچه تعداد $CI \text{ Node}$ ها کمتر باشد، هزینه شبکه ارتباطی نیز کاهش می‌یابد. w هزینه نصب یک سوئیچ و روتر است. ممکن است لینک‌های ارتباطی چندین PMU از یک مسیر عبور کنند که ما آن‌ها را یکبار در نظر می‌گیریم؛ زیرا که فیبر نوری پهنای باند کافی برای انتقال اطلاعات را دارد. قید (۶) نیز تضمین می‌کند که شبکه ارتباطی به گونه‌ای باشد که همه PMUها به PDC متصل باشند.

برای بهینه‌سازی مذکور نیاز به طول خطوط انتقال شبکه است که ما آن را به صورت ماتریسی و شبیه ماتریس اتصالات نشان داده‌ایم که درایه \hat{a}_m آن نشان‌دهنده فاصله بین شین \hat{a}_m و شین \hat{a}_m است. و درایه‌های قطری آن صفر هستند.

با بررسی نتایج به دست آمده از مقالات مختلف که در بخش ۱ مرور شده‌اند، مشخص می‌شود که این مقالات می‌توانند به نتایج خوبی در مسئله جایابی بهینه PMUها برسند. این مقالات با یک تابع هدف خطی روبه‌رو هستند که می‌توان آن را به صورت یک روش قطعی بیان کرد؛ در حالی که در این مقاله مسئله جایابی بهینه PMUها و PDC و سوئیچ‌ها و طراحی مسیرهای ارتباطی به طور هم‌زمان در نظر گرفته شده است که در نتیجه تابع هدف آن یک تابع هدف غیرخطی است؛ بنابراین نمی‌توان آن را به صورت یک روش قطعی بیان کرد. از طرفی دیگر، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، اغلب زمان‌بر بوده است و ممکن

شبکه است. در این روش از الگوریتم حریصانه برای جایابی بهینه PMUها و از الگوریتم Bellman-Ford برای جایابی بهینه PDC و طراحی سیستم ارتباطی مورد نیاز استفاده شده است. در این روش علاوه بر تأمین رؤیت پذیری شبکه، هزینه کلی طراحی WAMS نیز بهینه می‌شود. این روش در پنج مرحله به صورت زیر انجام می‌شود:

مرحله اول: در شین‌هایی که شبکه از آنجا شعاعی می‌شود، PMU نصب می‌شود تا شین‌های شعاعی را رؤیت پذیر کنند؛ زیرا برای رؤیت پذیر کردن شین‌های شعاعی یا باید PMU در خود شین شعاعی نصب شود یا در باس متصل به آن. از آنجایی که با نصب PMU در باس متصل به شین شعاعی می‌توان تعداد بیشتری از باس‌های شبکه را رؤیت پذیر کرد، در روش پیشنهادی PMU در این باس‌ها نصب می‌شود.

مرحله دوم: در این مرحله یک PMU به شبکه اضافه می‌شود. برای این منظور با استفاده از الگوریتم حریصانه، مکان شینی که با نصب PMU در آنجا تعداد بیشتری از شین‌های شبکه رؤیت پذیر می‌شوند، مشخص می‌شود. ممکن است بیش از یک مکان به دست آید که در این صورت به مرحله بعدی بروید (با توجه به ساختار شبکه-های قدرت، در این مرحله، معمولاً بیش از یک مکان به دست می‌آید)؛ اما اگر یک مکان به دست آید، PMU را در آنجا نصب کنید و به مرحله پنجم بروید.

مرحله سوم: در این مرحله از الگوریتم Bellman-Ford برای به دست آوردن مینیمم طول شبکه ارتباطی و تعداد CI Nodes استفاده می‌شود. فرض کنید در مرحله قبل، n شین وجود دارد که با قرارگیری PMU در آن‌ها رؤیت پذیری یکسانی از شبکه به دست آید. حال m جایابی^۷ متفاوت را تشکیل داده است؛ به طوری که هر جایابی علاوه بر اختصاص PMU به مکان‌های به دست آمده از مراحل قبل، در یکی از n شین کاندید نیز یک PMU قرار می‌دهد. بنابراین m جایابی به جز در یک مکان، PMU در مکان‌های یکسان دارند. آن یک مکان نیز همان مکان شین‌های کاندید است. حال برای هر جایابی، هر شین شبکه را به عنوان شین شروع (که در واقع همان مکان PDC باشد) در نظر گرفته می‌شود و از آن شین با استفاده از الگوریتم Bellman-ford

است در شبکه‌های قدرت با ابعاد واقعی نتواند به جواب برسند. از این رو، در این مقاله از الگوریتم حریصانه برای جایابی PMUها استفاده شده است. الگوریتم حریصانه، یک روش تکراری برای پیدا کردن راه‌حل‌های بهینه در مسائل بهینه‌سازی است. این الگوریتم در هر لحظه نگاه می‌کند که کدام انتخاب می‌تواند بهترین باشد و بر مبنای آن تصمیم می‌گیرد [۱۸]. همچنین برای بهینه‌سازی و طراحی شبکه ارتباطی از الگوریتم Bellman-Ford استفاده شده است. الگوریتم Bellman-Ford یکی از روش‌های حل مسائل طراحی شبکه در گراف‌های جهت‌دار با یال‌های وزن‌دار است. در اینجا، وزن هر یال برابر با طول آن در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم، مینیمم مسیر از یک گره به عنوان گره شروع به تمامی گره‌های گراف پیدا می‌شود [۱۸] که در بحث ما، گره شروع همان مکان PDC است و وزن هر یال برابر طول آن در نظر گرفته می‌شود. در این الگوریتم از ماتریس فاصله شبکه برای پیدا کردن مینیمم مسیر استفاده شده است. جزئیات بیشتر درباره این الگوریتم‌ها در [۱۸] موجود است.

۳- روش پیشنهادی

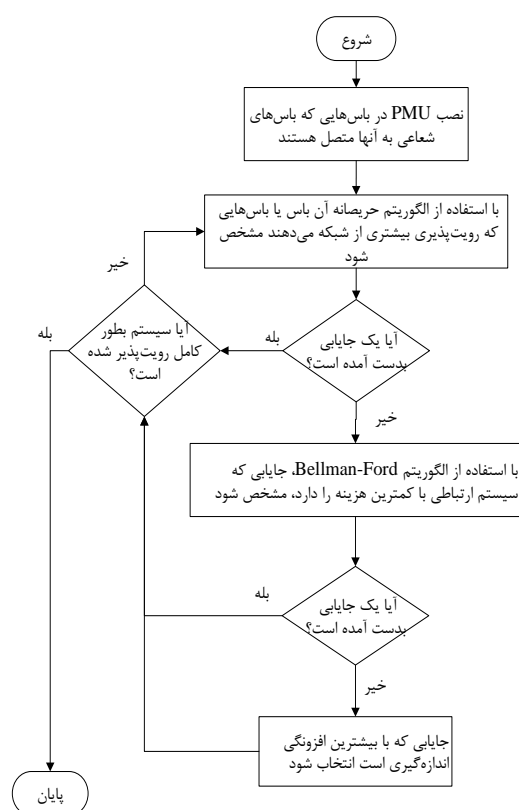
بررسی نتایج به دست آمده از مقالات مختلف (که در بخش ۱ مرور شدند) نشان می‌دهد که تعداد و مکان‌های به دست آمده برای PMU جهت رؤیت پذیر کردن شبکه‌ها یکسان نیست. از طرفی همان‌طور که از معادلات (۵) و (۶) در بخش ۲ مشخص است، طراحی ساختار شبکه ارتباطی، وابسته به مکان قرارگیری PMUها است؛ در نتیجه بهینه‌سازی جداگانه این دو، همواره نمی‌تواند باعث مینیمم کردن هزینه‌های کل شود. بنابراین در روش پیشنهادی این دو مسئله بهینه‌سازی به نحوی با هم ترکیب و به طور هم زمان حل می‌شوند تا هزینه‌های طراحی WAMS کاهش یابد.

۳-۱- روش پیشنهادی در شرایط عملکرد عادی

شبکه

روش پیشنهادی بر مبنای رؤیت پذیری توپولوژیکی

شین با توان تزریقی صفر، رؤیت‌پذیر می‌شود. وقتی که چند شین تزریق صفر رؤیت‌پذیر نشده متصل به هم باشند و تمامی شین‌های متصل به آن‌ها رؤیت‌پذیر باشند، شین‌های تزریق صفر با به‌کاربردن KCL در آن‌ها رؤیت‌پذیر می‌شوند. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. این فلوچارت شرایط عملکرد عادی سیستم را مطابق با مراحل ارائه‌شده روش پیشنهادی در بخش ۳-۱ نشان می‌دهد.



شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی

۳-۲- روش پیشنهادی با در نظر گرفتن اثر خروج

تکی خطوط یا خروج تکی PMU

در این قسمت باید روش پیشنهادی در بخش ۳-۱ با وجود خروج تکی خطوط یا خروج تکی PMU اصلاح شود. در حالت خروج خط به این صورت عمل می‌شود که یک‌به‌یک خطوط انتقال شبکه قطع می‌شود و رؤیت‌پذیری شبکه بررسی می‌شود. اگر شبکه رؤیت‌پذیر بود، آن خط را

مینیمم مسیر به تمامی شین‌های PMU دار معین می‌شود. بعد از آنکه تمامی شین‌های شبکه به‌عنوان شین شروع در نظر گرفته شد، آن شین شروعی که با کمترین هزینه مجموع به تمامی شین‌های PMU دار متصل شده باشد، به‌عنوان مکان PDC جایابی انتخاب می‌شود. هزینه مجموع در بردارنده هزینه طول فیبر نوری به اضافه هزینه تعداد CI Nodes در مسیر از PMU ها به PDC است. وقتی که برای n جایابی متفاوت این کار انجام شد، جایابی که شبکه ارتباطی با کمترین هزینه مجموع را دارد انتخاب می‌شود. با این روش مکان PDC نیز در هر مرحله جایابی می‌شود و شبکه ارتباطی متناظر با آن نیز با کمترین هزینه به دست می‌آید. حال اگر یک جایابی دارای شبکه ارتباطی با کمترین هزینه مجموع بود، جایابی انتخاب می‌شود و به مرحله پنجم بروید؛ اما اگر چند جایابی دارای شبکه ارتباطی با کمترین هزینه مجموع بودند، به مرحله چهارم بروید.

مرحله چهارم: در این مرحله آن جایابی‌هایی که هم رؤیت‌پذیری یکسانی از شبکه و هم شبکه ارتباطی با هزینه مجموع یکسانی دارند، از نظر افزودنی اندازه‌گیری^۱ مقایسه می‌شوند؛ و آن جایابی که بیشترین افزودنی اندازه‌گیری را داشته است، انتخاب می‌شود و سپس به مرحله پنجم بروید. مرحله پنجم: در این مرحله با استفاده از رابطه (۲) رؤیت‌پذیری شبکه قدرت بررسی می‌شود. اگر شبکه به‌طور کامل رؤیت‌پذیر بود، کار پایان یافته است؛ در غیر این صورت به مرحله دوم برگردید.

گفتنی است برای در نظر گرفتن اثر شین‌های با توان تزریقی صفر، فقط مراحل دوم و پنجم باید اصلاح شود و سایر مراحل بدون تغییر می‌ماند؛ بنابراین در این مراحل، اثر شین‌های با توان تزریقی صفر طبق قوانین پیشنهادی زیر در بررسی رؤیت‌پذیری شبکه لحاظ می‌شود.

۱) وقتی که همه شین‌هایی (به‌جز یکی) که به یک شین با توان تزریقی صفر رؤیت‌پذیر متصل شده‌اند، رؤیت‌پذیر باشند، شین رؤیت‌پذیر نشده با به‌کاربردن KCL در شین با توان تزریقی صفر، رؤیت‌پذیر می‌شود.

۲) وقتی که همه شین‌هایی که به یک شین با توان تزریقی صفر رؤیت‌پذیر نشده متصل هستند، رؤیت‌پذیر باشند، شین با توان تزریقی صفر با به‌کاربردن KCL در خود

جدول، تعداد و مکان PMUها، مکان PDC، CI Node و نسبت طول شبکه ارتباطی به طول کل خطوط انتقال به صورت درصد نشان داده شده است. در جدول (۲) نتایج روش ارائه شده با نتایج مرجع [۲]، (که تنها مرجع موجود در این زمینه است) مقایسه شده است. برای این مقایسه قیمت هر واحد اندازه گیری و هزینه واحد طول خط ارتباطی مطابق با [۲] انتخاب شده است. در مرجع [۲] هزینه سویچها در طراحی WAMS لحاظ نشده است. در مرجع [۲] از الگوریتم ژنتیک چندمنظوره برای جایابی همزمان PMU و طراحی شبکه ارتباطی استفاده شده است. این روش علاوه بر اینکه دارای جوابهای بهینه نیست، بسیار زمانبر نیز بوده است و ممکن است در شبکههای قدرت با ابعاد واقعی نتواند به جواب برسد. همچنین مکان PDC نیز مشخص نشده است. در جدول [۲] مشاهده می شود که در شبکه ۳۰ شینه، تعداد PMUهای به دست آمده از روش پیشنهادی و مرجع [۲] یکسان است؛ ولی طول شبکه ارتباطی روش پیشنهادی کمتر است. در شبکه ۱۱۸ شینه، هم تعداد PMUها و هم طول شبکه ارتباطی به دست آمده از روش پیشنهادی، کمتر از مقادیر مربوطه در مرجع [۲] است؛ در نتیجه هزینه WAMS به دست آمده در هر دو شبکه با استفاده از روش پیشنهادی، کمتر از هزینه WAMS مرجع [۲] است. این موضوع نشان از مؤثر بودن روش پیشنهادی است. همچنین در جدول ۲ تعداد CI Node به دست آمده از هر دو روش نیز با هم مقایسه شده است. با مشاهده آن مشخص می شود که نتایج روش پیشنهادی در این مورد نیز از نتایج مرجع [۲] بهتر است. در ادامه نتایج روش پیشنهادی با در نظر گرفتن اثر شینهای با توان تزریقی صفر ارائه می شود. همچنین نتایج در شرایط خروج تکی PMU و خروج تکی خطوط، مطابق با روش پیشنهادی در بخش ۳-۲ ارائه شده است. در اینجا قیمت هر PMU برابر \$40000، هر کیلومتر فیبر نوری \$4000 و هر سویچ \$4000 در نظر گرفته شده است [۲۰].

وصل کنید و سراغ خط بعدی بروید، اما اگر شبکه رؤیت پذیر نبود، الگوریتم ارائه شده در بخش ۳-۱ برای جایابی یک PMU جدید (که شبکه را با فرض قطع بودن آن خط، رؤیت پذیر کند) دوباره به کار گرفته می شود. این کار را باید برای خروج تمامی خطوط شبکه انجام داد. در حالت خروج PMU نیز همانند خروج خط، یک به یک PMUهای شبکه حذف و رؤیت پذیری شبکه بررسی می شود. اگر شبکه رؤیت پذیر بود، آن PMU را برگردانید و به سراغ PMU بعدی بروید؛ اما اگر شبکه رؤیت پذیر نبود، الگوریتم ارائه شده در بخش ۳-۱ را برای جایابی یک PMU جدید (که شبکه را با فرض نبودن آن PMU حذف شده، رؤیت پذیر کند) به کار گرفته می شود. این کار باید برای خروج تک تک PMUهای شبکه انجام گیرد. باید ذکر شود که در این قسمت، اثر شینهای با توان تزریقی صفر در بررسی رؤیت پذیری شبکه همواره لحاظ شده است.

۴- نتایج شبیه سازی

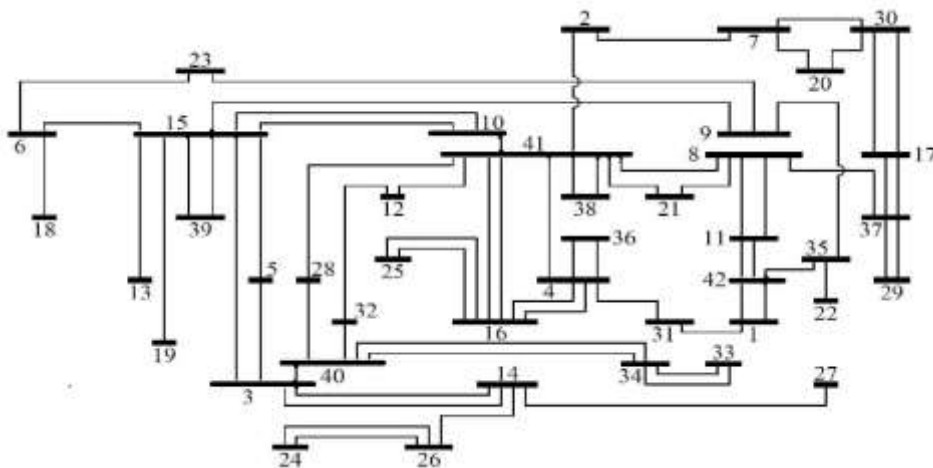
در این بخش، برای ارزیابی مؤثر بودن روش پیشنهادی، الگوریتم ارائه شده در شبکههای ۳۰ و ۱۱۸ شین IEEE و شبکه ۲۳۰ kv و ۴۰۰ kv استان اصفهان آزمایش شده است. جزئیات اطلاعات و دیاگرام تک خطی این شبکههای در [۱۹] و [۲۰] موجود است. شکل (۳) دیاگرام تک خطی شبکه استان اصفهان را نشان می دهد. همانطور که پیش از این اشاره شد، برای طراحی شبکه ارتباطی نیاز به طول خطوط انتقال است که این اطلاعات در [۲۱] موجود است. کل طول خطوط انتقال در شبکههای ۳۰ و ۱۱۸ شین IEEE و شبکه استان اصفهان به ترتیب برابر ۱۰۳۶، ۹۴۶۳ و ۲۲۸۹ کیلومتر است. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با نتایج روشهای قبلی موجود، مقایسه شده است. بعد از آن، نتایج شبیه سازی در حالت های دیگر ارائه شده است. ابتدا نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی در حالت عملکرد عادی بدون در نظر گرفتن اثر شینهای با توان تزریقی صفر در جدول (۱) نشان داده شده است. در این

جدول (۱): نتایج روش پیشنهادی در شرایط عملکرد عادی بدون در نظر گرفتن اثر شین با توان تزریقی صفر

سیستم مورد مطالعه	تعداد PMU	مکان قرارگیری PMU	درصد شبکه ارتباطی	تعداد CI Node	مکان قرارگیری PDC
IEEE شینه ۳۰	۱۰	۳،۶،۷،۹،۱۰،۱۲،۱۹،۲۴،۲۵،۲۷	۱۵،۲۸	۱۵	۶
IEEE شینه ۱۱۸	۳۶	۲،۷،۹،۱۱،۱۲،۱۷،۲۱،۲۳،۲۵،۲۷،۳۱،۳۲،۳۴،۳۷،۴۲،۴۵،۴۹،۵۰،۵۱ ۵۲،۵۹،۶۵،۶۶،۶۸،۷۱،۷۵،۷۷،۸۰،۸۵،۸۶،۸۹،۹۲،۹۶،۱۰۰،۱۰۵،۱۱۰	۲۸،۷۰	۵۵	۶۹
۴۲ شینه استان اصفهان	۱۴	۳،۶،۷،۸،۱۲،۱۴،۱۵،۱۶،۲۶،۳۱،۳۴،۳۵،۳۷،۴۱	۳۸،۶۶	۲۱	۴۱

جدول (۲): مقایسه نتایج روش پیشنهادی با دیگر روش‌های موجود

سیستم مورد مطالعه	روش	تعداد PMU	درصد شبکه ارتباطی	تعداد CI Node	هزینه کل (میلیون دلار)
IEEE شینه ۳۰	مرجع [۲]	۱۰	۲۶،۸۲	۱۵	۸،۴۴۶
	پیشنهادی	۱۰	۱۵،۲۸	۱۵	۱،۹۸۳
IEEE شینه ۱۱۸	مرجع [۲]	۳۹	۳۰،۴۸	۷۶	۳۱،۶۸۶
	پیشنهادی	۳۶	۲۸،۷۰	۵۵	۲۸،۵۹۷



شکل (۳): نمای تک‌خطی شبکه ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت استان اصفهان

طول شبکه ارتباطی نسبت به شرایط عملکرد عادی سیستم افزایش می‌یابد. این جدول نشان می‌دهد که در حالت خروج یک PMU نسبت به حالت خروج خط، تعداد PMU بیشتری برای حفظ رؤیت‌پذیری شبکه نیاز است که این به آن دلیل است که وقتی یک PMU خارج می‌شود، رؤیت‌پذیری چندین باس از دست می‌رود؛ درحالی‌که در خروج خط ممکن است رؤیت‌پذیری یک باس از دست برود. همچنین جدول (۵) نشان می‌دهد که در حالتی که احتمال وقوع یک پیشامد در شبکه است (به عبارتی خروج یک خط یا خروج یک PMU) نیاز است که در بیش از نیمی از باس‌های شبکه، PMU نصب شود.

در جدول (۳) تعداد و مکان شین‌های با توان تزریقی صفر نشان داده شده است. نتایج با در نظر گرفتن اثر شین با توان تزریقی صفر در جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که از جدول (۴) پیدا است، با در نظر گرفتن اثر شین‌های با توان تزریقی صفر در رؤیت‌پذیری شبکه، تعداد PMU مورد نیاز برای رؤیت‌پذیر کامل شبکه کاهش یافته است که این امر انتظار می‌رفت. همچنین طول شبکه ارتباطی نیز کمی کاهش یافته است که در کل باعث کاهش هزینه WAMS شده است. در جدول (۵) نتایج آزمایش با در نظر گرفتن خروج خط و خروج PMU ارائه شده است. روشن است که در این حالت، هم تعداد PMU‌ها و هم

جدول (۳): تعداد و مکان‌های شین‌های با توان تزریقی صفر

سیستم مورد مطالعه	تعداد شین با توان تزریقی صفر	مکان شین با توان تزریقی صفر
۳۰ شینه IEEE	۶	۶،۹،۲۲،۲۵،۲۷،۲۸
۱۱۸ شینه IEEE	۱۰	۵،۹،۳۰،۳۷،۳۸،۶۳،۶۴،۶۸،۷۱،۸۱
۴۲ شینه استان اصفهان	۶	۳،۱۰،۱۵،۴۰،۴۱،۴۲

جدول (۴): نتایج روش پیشنهادی در شرایط عملکرد عادی با در نظر گرفتن اثر شین با توان تزریقی صفر

سیستم مورد مطالعه	تعداد PMU	مکان قرارگیری PMU	درصد شبکه ارتباطی	تعداد CI Node	مکان قرارگیری PDC	هزینه کل (میلیون دلار)
۳۰ شینه IEEE	۸	۳،۶،۷،۱۰،۱۲،۱۹،۲۴،۲۷	۱۳،۹۴	۱۳	۶	۰،۹۵۰
۱۱۸ شینه IEEE	۳۳	۲،۸،۱۱،۱۲،۱۹،۲۲،۲۵،۲۷،۳۱،۳۲،۳۴،۳۷،۴۲،۴۵،۴۹،۵۰،۵۱،۵۲، ۵۹،۶۶،۷۰،۷۱،۷۵،۷۷،۸۰،۸۵،۸۶،۸۹،۹۲،۹۶،۱۰۰،۱۰۵،۱۱۰	۲۸،۴۳	۵۵	۶۹	۱۲،۳۰۳
۴۲ شینه استان اصفهان	۱۱	۶،۷،۱۴،۱۵،۱۶،۲۶،۳۱،۳۴،۳۵،۳۷،۴۱	۳۷،۸۱	۲۰	۴۱	۳،۹۸۲

جدول (۵): نتایج روش پیشنهادی با در نظر گرفتن پیشامدها

سیستم مورد مطالعه	نوع پیشامد	تعداد PMU	تعداد CI Node	درصد شبکه ارتباطی	مکان قرارگیری PDC	هزینه کل (میلیون دلار)
۳۰ شینه IEEE	خروج PMU	۱۵	۱۹	۳۴،۸۲	۶	۲،۱۱۹
	خروج خط	۱۴	۲۳	۳۳،۶۱	۶	۲،۰۴۵
	خروج PMU و خط	۱۷	۲۳	۳۸،۹	۶	۲،۳۸۴
۱۱۸ شینه IEEE	خروج PMU	۶۳	۸۱	۴۳،۴۶	۶۹	۱۹،۲۰۴
	خروج خط	۵۸	۸۵	۴۵،۱۱	۶۹	۱۹،۷۳۵
	خروج PMU و خط	۶۷	۸۵	۴۵،۶۹	۶۹	۲۰،۳۱۴
۴۲ شینه استان اصفهان	خروج PMU	۲۸	۳۵	۶۸،۸۵	۴۱	۷،۵۶۵
	خروج خط	۲۸	۳۶	۷۱،۱۸	۴۱	۷،۷۸۲
	خروج PMU و خط	۳۲	۳۸	۷۴،۱۶	۴۱	۸،۲۲۳

۵- نتیجه گیری

تزریق صفر ارائه شد. از آنجایی که در سیستم قدرت همواره احتمال وقوع خط وجود دارد، جایابی بهینه PMUها و ساختار ارتباطی آنها در حالت خروج خط و خروج PMU نیز ارائه شد. اگرچه این روش ممکن است باعث افزایش تعداد PMUها شود، ولی هزینه مجموع جایابی PMU و ساختار ارتباطی مربوط به آن را کاهش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی در مقایسه با کارهای قبلی از نتایج بهتری نیز برخوردار است.

در این مقاله روش جدیدی برای طراحی WAMS براساس هزینه ارائه شده است که در آن علاوه بر جایابی بهینه PMUها و PDC، ساختار ارتباطی مورد نیاز آنها نیز طراحی شد. در این روش از الگوریتم حریصانه برای یافتن مکان PMUها و از الگوریتم Bellman-Ford برای جایابی بهینه PDC و طراحی شبکه ارتباطی استفاده شده است. این روش با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثر شین‌های با

مراجع

- [14] Hajian, M., Ranjbar, A. M., Amraee, T. and Mozafari, B., "Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm," *Electrical Power Energy Syst.*, Vol. 33, No. 1, pp. 28-34, Jan. 2011.
- [15] Rakpenthai, C., Premrudeepreechacharn, S., Uatrongjit, S. and Watson, N. R., "An optimal PMU placement method against measurement loss and branch outage," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 22, No. 1, pp. 101-107, Jan. 2007.
- [16] Xu, B., Abur, A., "Optimal placement of phasor measurement units for state estimation," PSERC, Final Project Rep., 2005.
- [17] Deng, Y., Lin, H., Phadke, A. G., Shukla, S., Thorp, J. S., Mili, L., "Communication Network Modeling and Simulation for Wide Area Measurement Applications," in Proc. Int. Conf. Smart Grid communication, Brussels, Belgium, October 17-20, 2011.
- [18] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, L. R., Stein, C., "Introduction to Algorithm," 2nd Edition, Cambridge, MA, MIT Press, 2001.
- [19] "System test cases archive" [Online]. Available: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>
- [20] Isfahan Power Utilitiy Company Data Center, 2014.
- [21] Püttgen, H. B., "Computational Cycle Time Evaluation for Steady State Power Flow Calculations," School of Electrical Engineering Georgia Institute of Technology, Georgia, 1985.
- [1] Phadke, A. "The wide world of wide-area measurements," *IEEE Power Energy Mag.*, Vol. 2, No. 4, pp. 52-65, Sep./Oct. 2008.
- [2] Shahraini, M., Ghazizadeh, M. S., and Javidi, M. H., "Co-Optimal Placement of Measurement Devices and Their Related Communication Infrastructure in Wide Area Measurement Systems," *IEEE Trans. smart grid*, Vol. 3, No. 2, June 2012.
- [3] Bi, T. and Li, Q., "Multi-layer disturbance processing system based on multiple information sources," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet., pp. 1-4, Jun. 2007.
- [4] Chenine, M., Nordström, L., "Modeling and Simulation of Wide-Area Communication for Centralized PMU-Based Applications," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 26, No. 3, July 2011.
- [5] Shahidepour, M. and Wang, Y., "Communication and Control in Electric Power Systems," Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2003.
- [6] Aminifar, F., Khodaei, A., Fotuhi-Firuzabad M. and Shahidepour, M., "Contingency constrained PMU placement in power networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 25, No. 1, pp. 516-523, Feb. 2010.
- [7] Azizi, S., Gharehpetian, G. B., Salehi Dobakhshari, A., "Optimal Integration of Phasor Measurement Units in Power Systems Considering Conventional Measurements," *IEEE Trans. Smart grid*, Vol. 4, No. 2, pp. 1113-1121, June 2013.
- [8] Azizi, S., Salehi Dobakhshari, A., Nezam Sarmadi, S. A., Ranjbar, A.M., Gharehpetian, G. B., "Optimal multi-stage PMU placement in electric power systems using Boolean algebra," *International Transactions on Electrical Energy Systems.*, Vol. 24, pp. 562-577, 2014.
- [9] Enshae, A., Hooshmand, R. A., Fesharaki, F. H., "Optimal PMU placement for maintaining full network observability during single outage of lines," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 2, No.2, pp. 25-36, 2011.
- [10] Rashidi, F., Abiri, E., Niknam, T., Salehi, M. R., "Optimal placement of PMUs with limited number of channels for complete topological observability of power systems under various contingencies," *Electric Power and Energy System.*, Vol. 67, pp. 125-137, 2015.
- [11] Mazhari, S. M., Lesani, H., "A new model for multi-objective PMU placement considering actual worth of uncertainties using cellular learning automata," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-16, 2012.
- [12] Chakrabarti, S. and Kyriakides, E., "Optimal placement of phasor measurement units for power system observability," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 23, No. 3, pp. 1433-1440, Aug. 2008.
- [13] Peng, J., Sun, Y., Wang, H. F., "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *Electric Power Energy Syst.*, Vol. 28, No. 4, pp. 223-31, 2006.

زیر نویس‌ها

- 1 open system interconnection
- 2 session
- 3 presentation
- 4 deterministic
- 5 global position system satellites
- 6 backbone
- 7 placement
- 8 redundancy