مکان یابی واحدهای اندازه گیری فازوری به منظور افزایش مشاهده پذیری سیستم های قدرت با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک

مهدی افروزه [*,۱]، علی اصغر قدیمی [۲]، علی رضا افشاری مقدم [۳].
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر موسسه آموزش عالی پیام گلپایگان، گلپایگان، ایران
۲- دانشکده فنی مهندسی، گروه برق دانشگاه اراک، اراک، اراک
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر موسسه آموزش عالی پیام گلپایگان، گلپایگان، ایران

خلاصه

پیشرفت سریع سیستم‌های مخابراتی در جهان و ابداع روش اندازه‌گیری فازوری سنکرون به کمک PMU و با استفاده از سیگنال همزمانی GPS تحول عظیمی در پایش و کنترل شبکه‌های گسترده و به هم پیوسته قدرت ایجاد کرده است.
واحدهای اندازه گیری فازور از جمله ادواتی است که در تخمین حالت سیستم قدرت نقش اساسی داشته و به بهره بردار شبکه کمک می کند تا تصمیمات لازمِ احتمالی را برای حفظ عملکرد سیستم اتخاذ نماید. این واحدها با اندازه‌گیری فازور ولتاژ و جریان با سرعت بالا شرایط را برای مشاهده‌پذیری دقیق و بلادرنگ سیستم را فراهم می‌نمایند. همچنین شرط لازم برای مشاهده‌پذیری کامل سیستم قدرت ، جایابی بهینه این واحدها در شبکه قدرت می‌باشد.
در این مقاله هدف اولیه جایابی بهینه واحدهای PMU در یک شبکه متعارف قدرت با استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور افزایش رویت‌پذیری سیستم می‌باشد؛ و نکته حائز اهمیت این است که خروجی به دست آمده از الگوریتم طی تکرار هایی با دیدگاه های فنی و محیطی نیز ارزیابی می گردد، سپس در انتها با مقایسه نتایج بدست آمده از روش پیشنهاد شده با سایر روش‌های متعارف کارایی مدل مورد نظر ارزیابی می‌گردد.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، جایابی بهینه، واحدهای اندازه گیری فازوری، سیستم موقعیت یاب جهانی، رویت پذیری

۱. مقدمه

با توجه به گسترش روز افزون مصرف انرژی الکتریکی، طراحی مناسب شبکه آینده و اصلاح سیستم فعلی از اهمیت در خور توجهی برخوردار گردیده است. فراهم آوردن شرایطی برای تحلیل سریع و بی نقص شبکه و جلوگیری از ناپایداری های احتمالی از جمله مواردی است که در طراحی شبکه مد نظر قرار می گیرد[۱]. یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت حفظ امنیت آن است. بهره‌بردار شبکه باید اطمینان حاصل کند که در هر لحظه متغیرهای شبکه در محدوده مجاز خود قرار داشته و در صورت وقوع پیشامدهای مهم نیز سیستم همچنان عملکرد

* دانش آموخته کارشناسی ارشد موسسه آموزش عالی پیام گلپایگان
Email: mahdiafroozeh@gmail.com

عادی خود را حفظ می‌کند. بدون شک اولین قدم در راه ارزیابی امنیت سیستم، نمایش شرایط بهره‌برداری فعلی آن بوده به نحوی که پس از بررسی آن، تصمیمات احتمالی لازم جهت حفظ شرایط عملکرد مطلوب گرفته شود. برای مشخص کردن وضعیت فعلی سیستم از تخمین حالت استفاده می‌شود. هدف نهایی از اجرای تخمین حالت، نمایش متغیرهای شبکه بوده به نحوی که بهره‌بردار سیستم با استفاده از خروجی تخمین حالت، قادر به اجرای سایر اعمال نظارتی و کنترلی نظیر پخش بار بهینه و ارزیابی امنیت سیستم باشد. در گذشته به دلیل مشکلات فنی پیرامون همزمان‌سازی اندازه‌گیری‌های انجام شده در نقاط مختلف شبکه، این اندازه‌گیری‌ها فاقد زاویه بود و شامل اندازه ولتاژ و توان تزریقی برخی باس‌ها و اندازه فلوی عبوری بعضی از خطوط می‌شدند. اندازه‌گیری‌های فوق گرچه امکان حل مساله تخمین حالت را غالباً فراهم می‌سازند، اما بنا بر دلایلی از جمله دوره اندازه‌گیری طولانی و داشتن روابط غیرخطی با متغیرهای حالت سیستم، همچنین سرعت پایین نمونه برداری این سیستمها (حدوداً هر ۱۰ ثانیه یکبار اندازه ولتاژ، جریان، توان اکتیو و راکتیو را ارائه می‌دهند) موجب کندی در زمان اجرای تخمین حالت شده و دقت آن را نیز بعضاً تحت‌الشعاع قرار می‌دهند[۳]. گسترش تکنیک‌های سنکرون‌سازی بین نقاط مختلف، مشکلات فوق را برطرف کرده و منجر به پیدایش واحد اندازه‌گیری فازوری (Phasor Mesurement unit) گردیده است. PMU، یک دستگاه اندازه گیری است که فازور ولتاژِ شین و جریانِ خطوط متصل به آن شین را اندازه گیری می نماید. با توجه به معین بودن فازور ولتاژ و جریان در تمام شین ها و خطوط، شرط لازم و کافی برای رؤیت پذیری کامل شبکه فراهم می گردد. لذا نصب تعداد کافی واحد فازوری، تخمین حالت و رؤیت پذیری کاملِ شبکه را تضمین می نماید . با توجه به لزوم همزمانی اندازه گیری ها در شبکه، واحدهای فازوری از یک سیگنال سنکرون کننده، که غالباً توسط GPS ارسال می شود، بهره می گیرند. PMU ها فازور ولتاژ و جریان را با نرخ متغیر از ۱ تا ۶۰ نمونه در هر ثانیه و با دقت بسیار بالا به سیستم ارائه می‌دهند که مکانیزم اجرای این عمل با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه گسسته بازگشتی در ادامه آورده شده است. این داده ها امکان تخمین حالت خطی را هم به ما می دهند که سرعت خیلی بیشتری دارد. با توجه به هزینهٔ بالایPMU ها، تعیین مکان و تعداد بهینهٔ این واحدها به منظور مشاهده پذیریِ کامل شبکه، از جمله مواردی است که باید حتما مد نظر طراحان سیستم قدرت قرار گیرد.

با توجه به اهمیت مسألهٔ مکان یابی واحدهای اندازه گیری فازور، تا کنون پژوهش های مختلفی در این زمینه انجام شده است از آنجایی که هر گونه تلاشی در جهت کاهش هزینه های توسعه، صرفه جویی در هزینه های سیستم را به دنبال خواهد داشت، لذا دسته ای از این پژوهش ها با ارائهٔ روش های جدید و یا اعمال الگوریتم های بهینه سازی تکاملی رویکردی در بهبود پاسخ ها داشته اند. استفاده از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم برنامه‌ریزی خطی (ILP)، الگوریتم PSO، الگوریتم رقابت استعماری (ICA) نمونه هایی از تحقیقات انجام شده در این زمینه هستند. از این میان الگوریتم ژنتیک یکی از بهترین پاسخ‌ها را برای چنین مسائلی که دارای تعداد متغیرهای بالاست را فراهم می‌سازد. در این مقاله برای جایابی بهینه PMU با لحاظ کم بودن تعداد و مشاهده پذیری کامل سیستم قدرت از روش ژنتیک بهره گرفته ایم. در قسمت بعدی به بیان مسئله و روش بهینه سازی مکان های PMU از طریق الگوریتم پرداخته می شود. پس از آن نتایج شبیه سازی ارائه و تحلیل می‌شوند. در قسمت پایانی هم به جمع‌بندی و نتیجه گیری خواهد پرداخت.

۲. روشهای انتقال اطلاعات PMU

برای انتقال اطلاعات این واحدها به مرکز کنترل، روش‌های مختلفی از جمله خطوط تلفن، کابل فیبر نوری، ماهواره‌های LEO، خطوط قدرت PLC و... وجود دارد. خطوط قدرت PLC دارای قابلیت اطمینان بالایی است و در دو رنج مختلف فرکانسی نیز کاربرد دارد[۵].

۳. نحوه اندازه گیری فازور توسط PMU

نمایش فازوری برای یک کمیت سینوسی بصورت $x(t) = X_M \cos(wt + \varphi)$ با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$X = \frac{X_M}{\sqrt{2}} e^{j\varphi} \qquad (۱)$$

فازور سیگنال x(t) که نمونه‌برداری از سیگنال مرجع در زمان $t = \tau$ می‌باشد را با استفاده از تبدیل فوریه گسسته (DFT) به کمک (۱) محاسبه می‌نماید.
که در آن N تعداد نمونه‌ها در یک پریود فرکانس پایه‌ی نامی می‌باشد.

$$X_c = \sum_{k=1}^{N} \chi_k \cos k\theta \qquad (۲)$$

$$X_S = \sum_{k=1}^{N} \chi_k \sin k\theta \qquad (۳)$$

θ زاویه‌ی نمونه برداری متناظر با τ است.
فازور به روز شده با استفاده از رابطه زیر بدست خواهد آمد.

$$X^{r+1} = X^r + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2}{N} (\chi_{N+r} - \chi_r) e^{-jr\theta} \qquad (۴)$$

۳.۱ تخمین حالت و مسأله مکان یابی برای تخمین حالت

تخمین حالت مهم‌ترین قسمت در مانیتورینگ شبکه قدرت است که با توجه به اندازه‌گیری‌های در دسترس و اطلاعاتی که راجع به توپولوژی شبکه دارند مقادیر فازورهای ولتاژهای باس‌های سیستم را محسابه می‌کنند. اندازه گیری ها عموماً توسط RTU ها[1] که در پست‌ها نصب می‌شوند صورت می‌گیرد[۵].

۳.۲ مکان نصب PMU و پیدا کردن محل خطا

نکته بسیار مهم در استفاده از اندازه‌گیر های فازوری جهت تخمین حالت سیستم آن است که به منظور تخمین حالت لزومی ندارد اندازه‌گیری در تمام نقاط مورد نظر انجام شود یا به تعبیر دیگر اندازه گیر ها را در تمام نقاط لحاظ کنیم، داشتن تعداد محدودی PMU در نقاط کلیدی شبکه به کمک نرم‌افزارهای موجود، کل سیستم را رویت‌پذیر می‌کند و این مسئله عملا قید هزینه را برآورده می سازد.

نکته دیگر این که ادوات PMU نصب شده در شبکه، امکان یافتن داده های پایانه ۲ طرف خط را میسر می سازد و با توجه به سنکرون بودن این داده ها امکان جایابی دقیق خطا میسر میشود.

۳.۳ پیش بینی ناپایداری گذرا و دینامیک

مطالعات امنیت شبکه کاربرد فراوانی در طراحی، توسعه، اصلاح عملکرد شبکه و یا حفظ پایداری سیستم قدرت دارد. این مطالعات می‌توانند به یکی از دو صورت off-line یا on-line انجام شوند که هر یک کاربردهای خاص خود را دارند.

1. Remote Terminal Unit

اندازه‌گیری فازورهای سنکرون شده می‌تواند آنالیز پایداری و پیش بینی پایداری را بصورت Real-Time میسر سازد که در این مقاله با تفصیل بررسی شده است[٤].

۳.۴ حفاظت گسترده شبکه و رله‌گذاری تطبیقی

رله‌های out-of-step نوسان توان را به کمک تغییر امپدانس ظاهری مشاهده شده توسط رله دیستانس آشکار می‌سازند[۲]. مشکل این روش این است که شرایط واقعی با توجه به نوسان توان با شرایطی که در شبیه سازی پایداری استفاده شده است فرق می‌کند. ولی به کمک PMU ها می‌توان داده‌های دینامیکی را با توجه به نوسان توان تغییر داد.

روش‌های حفاظت تطبیقی شامل تنظیم نواحی تحت پوشش رله‌های دیستانس، حفاظت ترانسفورمر، حفاظت ژنراتور، نحوه عملکرد ریکلوزرها، رله‌های out of step و رله‌های قطع بار ولتاژی و فرکانسی هستند[۲]، که در این زمینه هم از PMU بطور گسترده استفاده شده است.

۳.۵ مانیتورینگ حرارتی خط

به منظورهشدار سریع و به موقع در حالت اضافه بار خطوط، کنترل دینامیک ظرفیت خط انتقال و... بایستی در دو طرف خط PMU نصب شود.

۴. تکنیک های بهینه سازی

۴.۱ توجیه بهینه سازی

بهینه سازی فرآیندی است که شامل برنامه ریزی جامع، اجرا و کنترل فرایند بهبود مستمر، برای رسیدن به سطوح بالاتری از موفقیت یک جامعه است. در هنگام بهینه‌سازی، شرایط اولیه با روشهای مختلف مورد بررسی قرار میگیرد و اطلاعات به دست آمده، برای بهبود بخشیدن به یک فکر یا روش مورد استفاده قرار میگیرند. بهینه‌سازی ابزاری ریاضی است که برای یافتن پاسخ بسیاری از پرسشها در خصوص چگونگی راه حل مسایل مختلف به کار میرود. در بهینه‌سازی از یافتن بهترین جواب برای یک مساله صحبت به میان میآید. لفظ بهترین به طور ضمنی بیان میکند که بیش از یک جواب برای مساله مورد نظر وجود دارد که البته دارای ارزش یکسانی نیستند. تعریف بهترین جواب، به مساله مورد بررسی، روش حل و همچنین میزان خطای مجاز وابسته است. بنابراین نحوه فرمول بندی مساله نیز بر چگونگی تعریف بهترین جواب تاثیر مستقیم دارد.

۴.۲ الگوریتم بهینه سازی ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کنند. سپس از یک معیار برای پیدا کردن بهترین مجموعه ضرایب و ثابت‌ها جهت مدل کردن بهره می برد. با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک ما یک ابر فرمول یا طرح، تنظیم و آماده به اجرا خواهیم داشت. سپس داده‌هایی برای گروهی از متغیرهای مختلف فراهم می آوریم. بعد از آن الگوریتم ژنتیک اجرا خواهد شد، که بهترین تابع و متغیرها را مورد جستجو قرار می‌دهد. روش کار الگوریتم ژنتیک به طور فریبنده‌ای ساده، خیلی قابل درک و به طور قابل ملاحظه‌ای روشی است که ما معتقدیم حیوانات به این فرم تکامل یافته‌اند. هر فرمولی که از طرح داده شده در بالا تبعیت کند، یک فرد از جمعیت

ممکن تلقی می‌شود. موتور الگوریتم ژنتیک از یک جمعیت اولیه فرموله می شود. هر فرد در برابر مجموعه‌ای از داده‌های مورد آزمایش قرار می‌گیرند و مناسبترین آنها (شاید ۱۰ درصد از مناسبترین‌ها) باقی می‌مانند؛ بقیه کنار گذاشته می‌شوند[۷]. مناسبترین افراد با هم جفتگیری و تغییر کرده‌اند. مشاهده می‌شود که با گذشت از میان تعداد زیادی از نسلها، الگوریتم ژنتیک به سمت ایجاد فرمول‌هایی که دقیقتر هستند، میل می‌کنند. در حالی که شبکه‌های عصبی هم غیرخطی و غیرپارامتریک هستند، جذابیت زیاد الگوریتم‌های ژنتیک این است که دارای نتایج نهایی قابل ملاحظه‌ترند. فناوری الگوریتم‌های ژنتیک همواره در حال بهبود است، برای مثال با مطرح کردن معادله ویروس که در کنار یک فرمول آمده و برای نقض کردن فرمول‌های ضعیف تولید می‌شوند که در عمل جمعیت را کلاً قوی‌تر می‌سازند.

۵. مسأله مکان یابی واحدهای فازوری و مفهوم مشاهده پذیری سیستم قدرت

۵.۱ تعریف مسأله مکان یابی واحدهای فازوری

هدف از مکان یابی مرسومِ واحدهای اندازه گیری فازور، تعیین متغیرهای تصمیم گیری، که شامل تعداد و مکان واحدهای اندازه گیری فازوری به گونه ای است که شبکه دارای مشاهد ه پذیری کامل و کمترین هزینه به سیستم تحمیل گردد و نکته مهم تر این که توجه و لحاظ فنی مکان احداث واحد فازوری در تمام شین ها از قیودی است که در عمل حصول میابد.

۵.۲ تعریف مسأله مشاهده پذیری سیستم قدرت

مشاهده پذیری، ساختاری کنترلی به معنای معین بودن مجموعهٔ متغیرهای اساسی به نحوی است که تخمین حالت شبکه، بدون کمترین کاستی انجام گیرد.

به طورکلی برای اینکه بتوان از ادوات PMU برای مشاهده‌پذیری سیستم قدرت استفاده شود لازم است که این واحدها در نقاط خاصی در شبکه نصب و راه‌اندازی گردند و که در عین مینیمم بودن تعداد مورد نیاز آن‌ها، بیشترین مشاهده پذیری برای سیستم قابل حصول باشد. در واقع مساله مورد نظر یک مساله بهینه‌سازی می باشد که در مقالات و پژوهش های مختلف از الگوریتم‌های متنوعی برای یافتن بهترین پاسخ استفاده شده است. متغیرهای شبکه معمولا فازور ولتاژ شین ها تلقی میشود. به طور کلی مشاهده پذیری به دو صورت عددی و توپولوژیکی قابل تقسیم است[۳].

۵.۲.۱ روش عددی تحلیل مشاهده پذیری

در روش عددی برای اینکه بتوان تعریفی ریاضی برای مشاهده پذیری بدست آورد باید مدلی ریاضی برای سیستم قدرت مورد نظر و یا اندازه گیری های آن به دست آورد. مدل خطی اندازه گیری که در اکثر تخمین حالت ها مورد استفاده قرار میگیرد به صورت زیر تعریف میشود.

$$Z = HX + e \qquad (۵)$$

در این مدل بردار Z شامل m اندازه گیری از فازور ولتاژ و جریان خطوط میباشد، X بردار حالت N بعدی، H ماتریس ثابت ژاکوبین اندازه گیری ها بوده و e بردار خطای اندازه گیری بصورت $m\times 1$ میباشد[۸].

با تجزیه بردار Z تجزیه بردارهای ولتاژ $M_V \times 1$ و جریان $M_I \times 1$ (Z_I, Z_V) و تجزیه بردار X به زیر بردارهای اندازه گیری شده $N_M \times 1$ و اندازه گیری نشده $N_C \times 1$، (V_C, V_M) رابطه بالا به صورت زیر در می آید:

$$\begin{bmatrix} Z_V \\ Z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_M \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_V \\ e_I \end{bmatrix} \quad (۶)$$

بطوریکه I ماتریس همانی، YIM و YIC بیانگر ادمیتانس سری و شنت شبکه میباشند. با صرف نظر عناصر شنت، ماتریس H بصورت زیر خلاصه میشود:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ M_{IB} Y_{BB} A_{MB}^T & M_{IB} Y_{BB} A_{CB}^T \end{bmatrix} \quad (۷)$$

در اینجا MIB ماتریس تلاقی اندازه گیری شاخه که شامل اندازه گیری فازور جریان شاخه ها بصورت $M_I \times b$ میباشد، YBB یک ماتریس قطری $b \times b$ شامل ادمیتانس شاخه ها، AMB و ACB به ترتیب زیر ماتریس اندازه گیری شده $N_M \times b$ و زیر ماتریس تلاقی گره و شاخه بصورت $N_C \times b$ میباشد[۸]. در روش های سنتی تحلیل مشاهده پذیری با بررسی فرمول زیر انجام میشود:

$$Rank(H) = 2n - 1 \quad (۸)$$

باتوجه به رابطه (۸) در صورتی که ماتریس ژاکوبین از درجه کامل باشد شبکه مشاهده پذیر میباشد و تخمین حالت انجام میشود.

۵.۲.۲ روش توپولوژیک تحلیل مشاهده پذیری

روش تحلیل مشاهده پذیری بر مبنای اصول زیر میباشد:

۱- شینهایی که PMU روی آنها قرار گرفته، دارای فازور ولتاژ معلوم میباشند. همچنین جریان خطوطی که به شین دارای PMU متصل هستند نیز مشخص میباشد.

۲- در صورتی که فازور ولتاژ یک شین و جریان خطی که متصل به شین مذکور است مشخص باشد، ولتاژ شین طرف دیگر نیز قابل محاسبه است.

۳- در صورتی که ولتاژ شینهای ۲ سر یک خط مشخص باشد، آنگاه جریان آن خط قابل محاسبه میباشد.

۴- در صورتی که جریان تمام خطوط منتهی به شین تزریق صفر بجز یکی مشخص باشد، بدلیل قانون KCL فازور جریان نامعلوم قابل محاسبه است.

بر مبنای اصول ذکر شده فازور ولتاژ شینی که PMU روی آن نصب شده است همچنین جریان تمام شاخه هایی که به آن شین وارد میشود بطور مستقیم اندازه گیری میشود. در این مقاله از روش توپولوژیکی برای تحلیل مشاهده پذیری استفاده شده است که در قسمت بعد تشریح شده است.

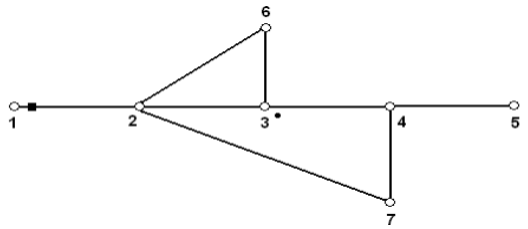
۵.۳ توجیه مسأله مشاهده پذیری سیستم قدرت

۵.۳.۱ مفهوم شین تزریق جریان صفر

در این قسمت با آوردن یک مثال مفهوم شین تزریق جریان صفر را روشن خواهیم کرد. یک سیستم ۷ شینه شکل۱ را در نظر بگیرید.

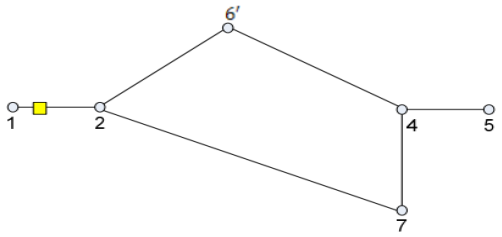
که ماتریس تلاقـی A در این حالت بصورت زیر می باشد.

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



شکل۱- سیستم ۷ شینه

اندازه گیر تزریقی ممکن است به صورت اندازه‌گیر واقعی یا بصورت شین تزریق صفر بیان شود که در هر دو صورت رفتار یکسانی دارد. در این حالت فرض می‌کنیم شین۳، شین تزریق صفر باشد. در این مورد به آسانی مشاهده می‌کنیم که اگر فازور ولتاژ در۳ شین از ۴ شین ۲ و ۳ و ۴ و ۶ معین باشد، فازور ولتاژ شین چهارم با نوشتن kcl در گره ۳ محاسبه میشود. بنابراین در توپولوژی شبکه میتوان شینی که شامل اندازه‌گیر تزریقی می‌باشد و یا شین تزریق صفر را با یکی از شین‌های مجاور ترکیب کرد. شکل ۲ همان شبکه قبلی میباشد در حالتی که شین‌های ۳ و ۶ با هم ترکیب شده‌اند و شین جدید جایگزین آنها شده است.



شکل۲-سیستم ۷شینه پس از ترکیب شین‌های ۳ و ۶

ماتریس تلاقی B در این حالت بصورت زیر در می آید.

$$B=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

۵.۳.۲ مشاهده پذیری در یک شبکه

PMU نصب شده در یک شین قادر است فازور ولتاژ آن شین و همچنین فازور جریان کلیه شاخه هایی که به آن شین متصل هستند را محاسبه کند.بنابراین با نصب PMU در نقاط استراتژیک شبکه میتوان اطلاعات مورد نیاز برای مشاهده پذیری سیستم را بدست آورد. همانطور که قبلا ذکر شد، دو هدف مشاهده پذیری شبکه برای تخمین حالت و کاهش تعداد واحد PMU دو هدف اساسی محسوب میشوند.

برای سیستم n شینه مسئله جایابی بهینه با فرمول زیر بیان میشود.

$$\begin{aligned} &\min \sum_i^n W_i . X_i \\ &s.t \qquad f(x) \geq \hat{1} \end{aligned} \tag{۹}$$

بطوریکه x یک متغیر باینری است که بصورت زیر تعریف می شود.

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{if a PMU is installed at bus i} \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{۱۰}$$

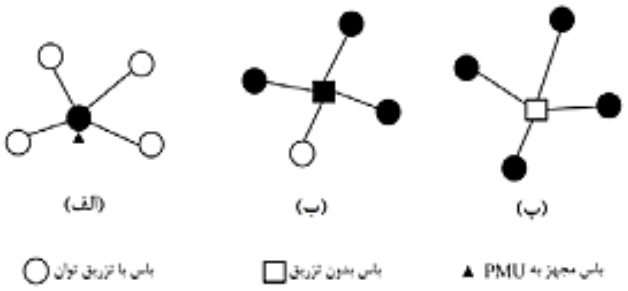
Wi هزینه PMU نصب شده در شین i می باشد و f(x) تابعی است که قید مشاهده پذیری هر شین شبکه را نشان می دهد.

نکته: در صورتی که برای هر $f_i(x) \geq 1$ شین آن شین مشاهده پذیر خواهد بود.

۵ . ۴ جایابی بهینه PMU ها با در نظر گرفتن باس‌های بدون تزریق

۵.۴.۱ قواعد بررسی مشاهده‌پذیری شبکه

طرح‌هایی که برای جانمایی PMU در شبکه‌ی قدرت پیشنهاد می‌شوند باید کل شبکه‌ی انتقال را در مرکز دیسپاچینگ مشاهده‌پذیر کنند. اگر تعداد کافی کانال آنالوگ ورودی برای اندازه‌گیری ولتاژ باس و جریان خطوط منشعب از آن، موجود باشد، مشاهده‌پذیری شبکه توسط PMU ها با استفاده از سه قانون زیر بررسی می‌شود:
اگر یک PMU در یک باس نصب شود، آن باس و تمام باس‌های متصل همانطور که مشاهده می شود در شکل ۳ (الف) به آن مشاهده‌پذیر می‌شوند[۸].



شکل ۳- توپولوژی مشاهده‌پذیری شبکه

برای یک باس بدون تزریق جریان، که قابل مشاهده است، اگر تمامی باس‌های متصل به آن به جز یکی، مشاهده‌پذیر باشند، باس فوق نیز مشاهده‌پذیر خواهد شد (شکل ۳- ب) [۸].
اگر تمامی باس‌های متصل به یک باس بدون تزریق مشاهده‌پذیر باشند، باس بدون تزریق نیز مشاهده‌پذیر خواهد شد (شکل ۳- پ) [۸].

۶. مطالعات عددی و نتایج

برای اعمال روش الگوریتم ژنتیک در جایابی PMU ها، تابعی در نرم افزار Matlab تعریف شده است که به کمک آن می‌توان پاسخ مطلوبی برای مسائل مقید باینری ارائه نمود. این تابع با گرفتن چند ورودی به شکل ماتریس های A,B ، پاسخی را در خروجی می‌دهد به صورت ماتریس x که فقط شامل صفر و یک می‌باشد. این موضوع بیان‌گر این است که اگر PMU ها را در باس‌هایی که در پاسخ خروجی مربوط به ماتریس x، ۱ شده‌اند نصب کنیم، تمام شبکه مشاهده پذیر خواهد شد.
در طرح پیشنهاد شده قیود مشاهده پذیری در ۳ حالت بررسی میشود: ۱- در حالت اول فرض بر این است که بجز PMU از اندازه گیر متداول دیگری استفاده نشده است ۲- استفاده از PMU به همراه اندازه گیر تزریقی (و یا وجود شین تزریق صفر) و ۳- استفاده از PMU به همراه اندازه گیر تزریقی و اندازه گیر جریانی.
مسألهٔ مکان یابی چندهدفهٔ واحدهای اندازه گیری فازور برای شبکه های IEEE 14، ۳۰ باس و نیز ۵۷ باسه انجام شده که اطلاعات اولیه شبکه های مورد مطالعه در این مقاله در جدول۱ آمده است. کار انجام شده شامل دو نوع شبیه سازی میباشد. یک گروه با در نظر گرفتن شین های تزریق صفر و یک گروه بدون در نظر گرفتن آنها. در جدول ۲ این نتایج برای سه شبکه مورد مطالعه آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات سیستم های مورد مطالعه

سیستم	تعداد شاخه	شین های تزریق صفر
IEEE ۱۴ شینه	۲۰	۷
IEEE ۳۰ شینه	۴۱	۶،۹،۱۱،۲۵،۲۸
IEEE ۵۷ شینه	۷۸	۴،۷،۱۱،۲۱،۲۲،۲۴،۲۶،۳۴ ۳۶،۳۷،۳۹،۴۰،۴۵،۴۶،۴۸

شبیه سازی سیستم های استاندارد IEEE با هدف پیدا کردن تعداد PMU های نصب شده در شین های سیستم برای به دست آوردن بیشترین مقدار مشاهده پذیری می باشد. مسئله بهینه سازی به دست آوردن کمترین تعداد PMU به گونه ای است که مشاهده پذیری سیستم در بیشترین حالت باشد.

جدول۲- شبیه سازی مکان یابی PMU در سه شبکه

سیستم	تعداد شین تزریق صفر	تعداد PMU	
		با در نظر گرفتن شین تزریق صفر	بدون در نظر گرفتن شین تزریق صفر
۱۴ شینه IEEE	۱	۳	۴
۳۰ شینه IEEE	۵	۷	۱۰
۵۷ شینه IEEE	۱۵	۱۳	۱۷

جدول۳- شماره شین‌های محل قرار گیری PMU ها

سیستم	محل قرار گیری PMU	
	با در نظر گرفتن شین تزریق صفر	بدون در نظر گرفتن شین تزریق صفر
۱۴ شینه IEEE	۹-۶-۲	۱۳-۱۰-۷-۲
۳۰ شینه IEEE	۲۷-۲۴-۱۹-۱۲-۱۰-۳-۲	۳۰-۲۳-۱۹-۱۸-۱۲-۱۱-۱۰-۷-۵-۳
۵۷ شینه IEEE	۲۹-۲۵-۲۰-۱۵-۹-۴-۱ ۵۶-۵۳-۵۰-۴۷-۳۸-۳۲	۵۳-۵۰-۴۷-۴۱-۳۹-۳۸-۳۶-۳۲-۲۸-۲۴-۲۲-۱۹-۱۵-۹-۷-۴-۱

در مسائل بهینه سازی با توجه به زیاد بودن تعداد متغیر ها و بعضا بیشتر بودن مجهولات از تعداد معادلات، معمولا حل مسئله به الگوریتم های بهینه سازی سپرده می شود. در این صورت وظیفه الگوریتم پیدا کردن بهترین جواب برای مسئله می باشد. بر این اساس با یک سری فرض های اولیه مسئله برای حالت های زیادی حل میشود. سپس جواب بهینه با توجه به تابع هدفی که تعریف شده است انتخاب شده و اعلام می شود.

نتایج به دست آمده در این روش پیشنهادی که مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی ژنتیک می باشد نشان دهنده این است که بهینه ترین جواب برای سیستم ها به دست می آید. نکته حائز اهمیت در این روش همگرا شدن سریع روش میباشد. با توجه به اهمیت روز افزون سرعت در حل مسائل مربوط به شبکه های برق این مزیت مهمی به شمار می آید.

نکته دیگر این که در شبکه استاندارد ۵۷ شینه IEEE همانطور که در جدول۴ آورده شده بیشینه تعداد تکرار جستجو در الگوریتم پیشنهادی ۵۰ بار می باشد. که این مقدار بسیار کمتر از روش های دیگر می باشد. تعداد تکرار های این روش حدود ۹۰ درصد کمتر از روش های مشابه پیشنهاد شده برای حل چنین مسائلی می باشد که این مسئله می تواند باعث بالا رفتن سرعت می باشد.

با توجه به اینکه نصب PMU با هدف ایجاد مشاهده پذیری در سیستم می باشد بنابراین مسئله بهینه سازیِ مربوط به آن، به دست آوردن مکان کمترین تعداد PMU به ازای بیشینه بودن مشاهده پذیری می باشد. با این مقدمه بحث شین‌های تزریق صفر مطرح میشود. که با این روش میتوان اطلاعات بعضی از شین ها را به دست آورده و از نصب PMU در آن شین ها صرف نظر کرد. به عنوان مثال با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی که در جدول۲ آمده است،

نشان دهنده این است که تعداد PMU های به دست آمده برای شبکه استاندارد ۵۷ شینه از ۱۷ به ۱۳ شین کاهش یافته است.

جدول۴- مشخصات روش ژنتیک پیشنهادی

بیشینه تکرار	۵۰
درصد وراثت	۸۰
درصد جهش	۳۰
اندازه جمعیت	۲۰۰

۷. نتیجه گیری

سناریوی اول

در این مقاله روشی جدید جهت مکان‌یابی بهینه PMU و مشاهده پذیری توپولوژیکی با استفاده از الگوریتمی مبتنی بر روش ژنتیک ارائه شده است. این روش در حالتی که بجز PMU، اندازهگیرهای متداول از قبیل اندازهگیر تزریقی و اندازه گیر جریانی در شبکه موجود باشد نیز کاربرد دارد، فرآیند بهینه سازی در این روش ۲ هدف را دنبال میکند: ۱- کم کردن تعداد PMU مورد نیاز برای مشاهده پذیر کردن کل سیستم ۲- همچنین به ازای در نظر گرفته شین های تزریق صفر سعی در کمینه سازی تعداد PMU های مورد نیاز شده است.

سناریوی دوم

همانطور که در ابتدا ذکرشدنتایج شبیه‌سازی نشان میدهد این روش با کمترین نیاز تکرار به بهترین جواب به دست آمده تا کنون دست می‌یابد که عملکرد بسیار مناسبی برای شبکه‌های مختلف دارا میباشد یعنی خروجی به دست آمده از الگوریتم با دیدگاه های فنی و محیطی نیز ارزیابی می گردد و سپس کارفرما دارای یک آزادی عمل می باشد.

۸. مراجع

1.Xiao Li; Scaglione, A.; Tsung-Hui Chang, "A Framework for Phasor Measurement Placement in Hybrid State Estimation Via Gauss–Newton," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.29, no.2, pp.824,832, March 2014.

2.Neyestanaki, M.K.; Ranjbar, A.M., "An Adaptive PMU-Based Wide Area Backup Protection Scheme for Power Transmission Lines," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.6, no.3, pp.1550,1559, May 2015.

3.Gomez, O.; Rios, M.A.; Anders, G., "Reliability-based phasor measurement unit placement in power systems considering transmission line outages and channel limits," *Generation, Transmission & Distribution, IET* , vol.8, no.1, pp.121,130, Jan. 2014.

4.Koutsoukis, N.C.; Manousakis, N.M.; Georgilakis, P.S.; Korres, G.N., "Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method," *Generation, Transmission & Distribution, IET* , vol.7, no.4, pp.347,356, April 2013.

5.Aminifar, F.; Fotuhi-Firuzabad, M.; Safdarian, A., "Optimal PMU Placement Based on Probabilistic Cost/Benefit Analysis," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.28, no.1, pp.566,567, Feb. 2013.

6.Caro, E.; Singh, R.; Pal, B.C.; Conejo, A.J.; Jabr, R.A., "Participation factor approach for phasor measurement unit placement in power system state estimation," *Generation, Transmission & Distribution, IET* , vol.6, no.9, pp.922,929, September 2012.

7.Sodhi, R.; Sharieff, M.I., "Phasor measurement unit placement framework for enhanced wide-area situational awareness," *Generation, Transmission & Distribution, IET* , vol.9, no.2, pp.172,182, 1 29 2015.08.26.

8.Azizi, S.; Dobakhshari, A.S.; Nezam Sarmadi, S.A.; Ranjbar, A.M., "Optimal PMU Placement by an Equivalent Linear Formulation for Exhaustive Search," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.3, no.1, pp.174,182, March 2012.

9.Peng Yang; Zhao Tan; Wiesel, A.; Nehorai, A., "Placement of PMUs Considering Measurement Phase-Angle Mismatch," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.30, no.2, pp.914,922, April 2015.

Certificate

گواهینامه ارائه مقاله

Code: COMCONF15-11361122

ID: ۱۱۳۶

کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی

در مهندسی برق و علوم کامپیوتر

The International Conference in New Research of Electrical Engineering and Computer Science

بدین وسیله گواهی می شود مقاله با عنوان:

مکان یابی واحدهای اندازه گیری فازوری به منظور افزایش مشاهده پذیری سیستم های قدرت با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک

نویسنده / نویسندگان: مهدی افروزه، علی اصغر قدیمی، علی رضا افشاری مقدم

در کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی برق و علوم کامپیوتر، مورخ ۱۹ شهریور ماه ۱۳۹۴ در دانشگاه تهران، با حضور ایشان به صورت سخنرانی ارائه گردید.

توفیق روز افزون شما را در عرصه های علمی و اجرایی کشور عزیزمان، ایران آرزومندیم.

دکتر سید حمید حاج سید جوادی
رئیس کنفرانس

دکتر سیروس اسحاقی
دبیر علمی کنفرانس

COM conf

www.ComConf.ir