

تحلیل و ارزیابی امنیت سایبری شبکه برق در حالت باز آرای شبکه از منظر مشاهده پذیری PMU

محمد رضا فرتاج^۱، فرامرز فقیهی^{۲*}، سودابه سلیمانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

(دریافت: ۹۸/۰۵/۲۳، پذیرش: ۹۸/۰۹/۰۳)

چکیده

حفاظت شبکه‌های قدرت یکی از نقاط تمرکز اولیه شرکت‌های بهره‌بردار است و اندازه‌گیری داده‌های خطوط انتقال، شینه‌ها و تجهیزات وابسته به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نقش اساسی اندازه‌گیری و اطلاعات کنترل در بهره‌برداری معمول شبکه‌های هوشمند، امنیت سایبری برای شبکه‌های برق فعلی و آینده را یک ضرورت حساس می‌سازد. لذا از آنجائی که شبکه‌های قدرت بیشتر متکی بر فناوری‌های ارتباطی و اطلاعاتی هستند استفاده از واحدهای سنجش فازور (PMU) در شبکه‌های مذکور به منظور جمع‌آوری داده‌های شبکه، اندازه‌گیری، حفاظت و کنترل دستگاه‌های قدرت روند رو به رشدی داشته است. تغییرات در پیکربندی شبکه برق به دلایل متعددی از جمله کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، کیفیت توان و... انجام می‌شود که در این خصوص در صورت وجود PMUها در شبکه، مشاهده‌پذیری آن مورد سؤال قرار خواهد گرفت. هدف در این مقاله تحلیل و ارزیابی رؤیت پذیری PMU های جایابی شده در شبکه‌های باز آرایبی شده به منظور تحلیل امنیت سایبری شبکه و جایابی مجدد آن است. عملکرد روش پیشنهاد شده در شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE بررسی شده است.

کلیدواژه‌ها: باز آرایبی، واحد سنجش فازور (PMU)، شبکه‌های برق، کاهش تلفات، مشاهده‌پذیری

Analysis and Evaluation of Cyber – Security of Power Network in Configurable State from the PMU Observability Viewpoint

M. R. Fartaj, F. Faghihi^{*}, S. Soleymani

Islamic Azad University, Science and Research Branch

(Received: 14/08/2019; Accepted: 24/11/2019)

Abstract

The Security of Power networks is one of the main focuses of operation utilities and measuring parameters of lines, buses, and other substantial equipment has particular importance for them. Essential role of measuring and control in normal operation of smart grids makes cyber security an important necessity for todays and future power grids. Therefore, as the power network depends on communication systems and information technologies, using phasor measurement units (PMUs) in order to measuring, protection and control become expanded. Reconfiguration of the power network is implemented for several reasons including loss reduction, improving voltage profile, power quality, etc. In this paper power network observability through PMUs which are allocated optimally is analyzed in reconfigured networks in order to investigate the network cyber security. Performance of the proposed method is evaluated in 14-bus and 30-bus IEEE.

Keywords: Observability, Reduction of Losses, Power Networks, PMU, Reconfiguration

مقدمه

سامانه قدرت بر اساس اندازه‌گیری‌های از راه دور در مواقع بحرانی تصمیم‌گیری‌های مهم انجام می‌دهند. اگر اندازه‌گیری‌ها به خطر افتد ممکن است نتایج بحرانی به دنبال داشته باشد. استفاده از قطعات اندازه‌گیری امن همچون PMUها یکی از راه‌های جلوگیری از این‌گونه حملات است [۲]. در سال‌های اخیر و به‌منظور دستیابی بیشتر به وضعیت دینامیکی شبکه قدرت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور در سراسر دنیا افزایش یافته است. این دستگاه‌ها با توجه به این‌که در نقاط مختلف شبکه قدرت نصب و با استفاده از سامانه GPS همگام شده‌اند، می‌توانند با ارسال کردن اطلاعات مربوط به ولتاژ، جریان و فرکانس به مراکز کنترل نسبت به افزایش اطلاعات دینامیکی شبکه قدرت در مراکز قدرت اقدام نمایند. قابل توجه است که PMUها قابلیت ارسال ۵۰ تا ۱۰۰ گزارش در هر ثانیه را دارند. به همین دلیل به ازای هر سیکل از ولتاژ شبکه قدرت به اندازه یک یا دو گزارش در مرکز کنترل وجود دارد که منجر به فراهم آمدن تصویری دقیق از وضعیت شبکه در هر لحظه می‌شود. این تصاویر دقیق لحظه‌ای امکان به‌کار بستن اقدامات مناسب به‌منظور جلوگیری از بدتر شدن وضعیت پایداری شبکه در زمان‌های وقوع اغتشاش را فراهم می‌آورد [۳]. جایابی بهینه واحدهای سنجش فازور به‌منظور مشاهده‌پذیری کامل شبکه در شرایط معمول بهره‌برداری و حتی در شرایطی که یکی از PMUها و یا خطوط شبکه از مدار بهره‌برداری خارج شود نیز از اهمیت بالایی برخوردار است [۴]. بهینه کردن تعداد PMUها و جایابی آن‌ها با در نظر گرفتن جوانب و راهکارهای مختلف در شبکه برق بررسی شده است [۵]. رؤیت پذیری کامل، در حالت اضطراری $n - 1$ سطوح مختلف رؤیت پذیری، جایابی چند مرحله‌ای متوالی و همچنین مانیتور کردن شینه‌های حساس از مواردی است که هنگام جایابی در این مقاله به آن‌ها پرداخته شده است. استفاده از PMUها در اندازه‌گیری، کنترل و سنجش سامانه‌های قدرت، در سال‌های اخیر روند افزایشی و مهمی داشته است. هدف از جایگذاری بهینه PMU حداقل سازی تعداد آن‌ها با شرط مشاهده‌پذیری کامل می‌باشد و در این زمینه تحقیقات فراوان صورت گرفته و روش‌های متعددی مبتنی بر الگوریتم‌های سلسله مراتبی و ریاضی ارائه شده است. ارائه تحلیل و طبقه‌بندی روند تحقیقات حال و آینده در حوزه جایگذاری بهینه PMU و توصیف کامل از روش‌های بهینه‌سازی بکار گرفته‌شده با مسئله جایگذاری بهینه PMUها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶].

امنیت سایبری زیرساخت‌های حساس یکی از مسائل مورد تأکید حال حاضر می‌باشد. وابستگی در حال افزایش زیرساخت‌ها به فن‌آوری‌های ارتباطی پیشرفته و کاربرد اینترنت

از آنجایی که نیاز بشریت به برق یک نیاز حیاتی است در نتیجه کیفیت و در دسترس بودن آن از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از مسائلی که باعث افت کیفیت در انتقال توان به مصرف‌کنندگان می‌شود قطع ناگهانی و یا مکرر برق است که باعث بروز مشکلاتی در سامانه‌های الکتریکی شده و عملکرد آن‌ها را دچار اختلال می‌کند. لذا شناخت راهکارهای مقابله با این قبیل مشکلات و یا جلوگیری از رخ دادن آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. مسئله دیگری که در سامانه‌های قدرت حائز اهمیت بوده و مورد توجه شدید شرکت‌های بهره‌بردار است اندازه‌گیری داده‌های خطوط انتقال، شینه‌ها و تجهیزات وابسته به آن می‌باشد. این اطلاعات در بهره‌برداری معمول شبکه‌های هوشمند، امنیت سایبری برای شبکه‌های برق فعلی و آینده را به‌عنوان یک ضرورت مطرح می‌نمایند. لذا از آنجا که شبکه‌های قدرت بیشتر متکی بر فن‌آوری‌های ارتباطی و اطلاعاتی می‌باشد، مشاهده‌پذیری شبکه، اندازه‌گیری و دانستن پارامترهای شبکه مانند جریان و ولتاژ خطوط به‌منظور جلوگیری از اتخاذ تصمیم اشتباه توسط بهره‌بردار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده که این امر با قرار دادن PMUها در نقاط مختلف به سادگی امکان‌پذیر و قابل دسترس است. از طرفی در سال‌های اخیر جنگ‌های سایبری تبدیل به یکی از اصلی‌ترین صحنه‌های نبرد سازمان‌های اطلاعاتی و نظامی شده است. همچنین با افزایش حجم داده‌ها، پردازش جریان‌های داده و حفظ امنیت آن‌ها تبدیل به یکی از نیازهای اساسی سازمان‌های نظامی شده است. هر چند رمز نگاری داده‌ها از دسترسی کاربر به محتویات داده‌ها جلوگیری می‌کند، ولی دشمن می‌تواند با نفوذ به کانال‌های ارتباطی انتقال اطلاعات، بدون آن که از محتویات آن اطلاعی داشته باشد، آن‌ها را حذف و یا اطلاعات جعلی وارد آن‌ها نموده و فرماندهان عملیات را گمراه نماید [۱]. در هر شبکه ممکن است در زمان‌های مختلف بر اثر حملات سایبری و یا اختلالات مختلف، قطعی‌های طولانی مدت برق، افزایش تلفات، افت ولتاژ شدید و عدم تعادل بار و... بر اساس نیاز، ضرورت ایجاب نماید آن شبکه بازآرایی گردد که در این صورت موقعیت PMUها و مشاهده‌پذیری آن‌ها دارای اهمیت فراوان می‌باشد.

در سال‌های اخیر، حملات سایبری در کشورهای مختلف دنیا افزایش یافته است. هر چه شبکه‌های قدرت هوشمندتر می‌شوند، میزان وابستگی آن‌ها به زیرساخت‌های مخابراتی نیز افزایش می‌یابد. متأسفانه این موضوع منجر به افزایش تعداد نقاط دسترسی مداخله‌جویانه شده است. مداخلات سایبری می‌تواند اطلاعات و اندازه‌گیری‌های مهم و محرمانه را آشکار ساخته و موجب اختلال در عملکرد سامانه‌های قدرت شوند. به‌عنوان مثال، تزریق اندازه‌گیری‌های اشتباه و گمراه‌کننده و ارسال دستورات اشتباه می‌تواند منجر به وقوع خاموشی‌های سراسری گردد. اپراتورهای

DGها، کم کردن تراکم خطوط و کم کردن افزایش ولتاژهای ناشی از تجمیع DGها را ارائه می‌نماید [۱۱].

از آنجایی که زمان انجام محاسبات برای شبکه‌های بزرگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و برخی از روش‌های بکار رفته در مقالات مختلف نمی‌تواند وضعیت همگرایی خوبی داشته باشد و بیشتر برای سامانه‌های کوچک‌تر که زمان‌های محاسباتی کمتری دارند به کار می‌روند، در [۱۲] الگوریتم جستجوی هارمونی (HAS) برای حداقل‌سازی هدر رفت سامانه توزیع استفاده شده است که با حل کردن مسئله بازآرایی شبکه ترکیب کلید زنی بهینه‌ای در شبکه به دست می‌آید به گونه‌ای که حداقل تلفات نتیجه آن است. در [۱۳] یک بازآرایی بهینه بر پایه روش تعرفه پویا در راستای مدیریت تراکم خطوط و کاهش تلفات خطوط در سامانه توزیع تحت نفوذ تعداد زیاد خودروهای برقی مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های تجدید ساختاری برای بازسازی خدمات ارائه‌شده در سامانه‌های توزیع تحت ملاحظات عملی مختلف و ارائه فرمول‌های مختلف مسئله با روش‌های حل متفاوت به منظور نشان دادن مزایا و معایب هر فرمول‌بندی و راه‌حل مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین جنبه‌های دیگری که راه‌حل را بهبود می‌بخشد از قبیل تنوع بار، حق تقدم بار، رشد بار سرد، نمایش اتصال شبکه و وجود تولید پراکنده با دستورالعمل برای تحقیقات آینده در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. در [۱۵] یک رویکرد بازآرایی پویا برای شبکه توزیع ۳ فاز ناهموار را ارائه می‌دهد با توجه به اینکه نفوذ روزافزون تولید پراکنده‌ها و بارهای متغیر، نوسانات قابل توجهی را برای شبکه‌های توزیع به وجود می‌آورد و راهبردهای بازآرایی معمول را بی‌اثر می‌سازد در چارچوب یک شبکه توزیع فعال (ADN)، سوئیچ‌های کنترل از راه دور می‌تواند در زمان واقعی از طریق یک طرح کنترل متمرکز عمل نماید. در این صورت توپولوژی شبکه توزیع می‌تواند به شیوه انعطاف‌پذیر و پویا پیکربندی شود که بتواند به نیاز بار متغیر و خروجی DG کمک کند.

در تحقیق حاضر به بررسی سه مطلب جایابی بهینه PMUها، بازآرایی و امنیت شبکه در کنار هم از نقطه‌نظر رؤیت‌پذیری پرداخته شده است و با توجه به مطالب ذکرشده در بالا علیرغم اینکه جایابی بهینه PMUها دارای اهمیت بوده و به گونه‌ای عمل شده است که ضمن حداقل نمودن تعداد آن‌ها بیشترین مشاهده‌پذیری نیز حاصل شود لذا پس از جایابی بهینه PMUها در شبکه برق، گه‌گاه ممکن است حملاتی به این PMUها انجام شود و یا این‌که در هنگام قطع برق و یا با اهداف دیگر، نیاز به بازآرایی در شبکه به منظور مدیریت تراکم

در فعالیت‌های روزمره نگرانی در این مورد را افزایش می‌دهد. شبکه برق یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌ها بوده و با چشم‌انداز ایجاد یک شبکه هوشمند برق، شبکه‌های مدرن برق شاهد سطح عظیمی از خودکارسازی می‌باشد. در [۷] یک چارچوب تئوری برای شناسایی و کاهش آسیب‌پذیری در شبکه‌های دینامیکی ارائه می‌گردد. بدین صورت که اندازه‌های جدید آسیب‌پذیری شبکه تعریف شده و هم‌زمان تأثیر حملات و درجه سختی را با حملاتی که می‌تواند شناسایی شود، ضبط نماید و راهبردهایی برای یافتن موقعیت بهینه تعداد کمی از حسگرها که آسیب‌پذیری شبکه را کم می‌کند پیشنهاد می‌گردد. در [۸] یک مدل کاهش ریسک برای پاسخ بهینه به حملات سایبری شبکه PMU ارائه می‌گردد. در این مقاله پاسخ بهینه مانند مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با ترویج پیشگیری کردن از حملات سایبری و پشتیبانی نمودن مشاهده‌پذیری سامانه قدرت مدل می‌شود. در [۹] به بررسی امنیت سایبری شبکه پرداخته است. این در حالی است که شبکه‌های هوشمند به شدت به دریافت اطلاعات از شبکه و ادوات دریافت اطلاعات مانند دستگاه‌های اندازه‌گیری وابسته هستند. در نتیجه فراهم کردن امنیت این دستگاه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در این تحقیق به بررسی آن پرداخته است. شبکه‌های توزیع به‌طور کلی به صورت حلقوی ساخته می‌شود ولی در بازآرایی به منظور هماهنگی مؤثر طرح‌های حفاظتی و کاهش سطح خطا به صورت شعاعی عمل می‌کند. بازآرایی یک سامانه توزیع فرآیندی است که ساختار پیکربندی فیدرها را توسط مدیریت باز یا بسته نمودن حالت سوئیچ‌های جداکننده (که معمولاً بسته هستند) و ارتباط‌دهنده (که معمولاً باز هستند) تغییر می‌دهد. بازآرایی یک سامانه توزیع شعاعی یک ابزار بسیار مؤثر و کارآمد است که تلفات شبکه توزیع را کاهش می‌دهد، پروفیل ولتاژ را بهبود می‌دهد، تراکم بار را مدیریت می‌کند و قابلیت اطمینان سامانه را افزایش می‌دهد؛ بنابراین هدف از بازآرایی شبکه توزیع یافتن یک بازآرایی عملیاتی شعاعی است که اهداف معین را بهینه می‌نماید به صورتی که همه‌ی قیود بهره‌برداری را بدون جزیره‌ای نمودن شینه‌ها برآورده نماید. به‌رحال بازآرایی ممکن است باعث تراکم در نواحی معین شود که یک موقعیت زائد بوده و نیاز به مدیریت صحیح دارد. در [۱۰] روش بازآرایی شبکه بر پایه الگوریتم کلونی مورچگان (ACA) که هدفش دستیابی به کمینه کردن تلفات توان و افزایش ضریب تعادل بار برای یک شبکه توزیع شعاعی در حضور DGها است، ارائه می‌گردد. روش مذکور بر روی یک شبکه ۳۳ شینه و شبکه توزیع ۱۱/۴kV تایوان برای بررسی نتایج پیاده‌سازی شده است. بازآرایی آنلاین شبکه توزیع فعال از اهمیت به‌سزایی برخوردار است که هدف آن کنترل توان خروجی اکتیو و راکتیو واحدهای ترکیبی تولید پراکنده با کنترل کلیدهای کنترل شونده از راه دور است که حداقل نمودن کاهش

در شبکه قدرت، جایابی PMUها با هدف کمینه کردن هزینه نصب این تجهیز، به صورت یک مسئله بهینه‌سازی با متغیر تصمیم‌گیری باینری به صورت زیر مدل می‌شود:

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

$$S.t: AB \geq 1 \quad (2)$$

در این مسئله b_i متغیر تصمیم‌گیری باینری است که به صورت زیر تعریف می‌شود و c_i هزینه نصب PMU در شینه i است که در اینجا ۱ پیرونیت فرض می‌شود.

$$B = [b_i]_{N \times 1}^T \quad (3)$$

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{if PMU is placed at bus } i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$c_i = \text{PMU installation cost at bus } i \quad (5)$$

A ماتریس مجاورت شبکه است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$A = [a_{ij}]_{N \times N} \quad (6)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 1 & \text{if bus } i \text{ is connected to bus } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

و N تعداد کل شینه‌های شبکه است.

قیود مسئله مشخص می‌کند که هر شینه چند مرتبه از طریق PMUهای قرارگرفته روی شینه‌های مجاور و یا خودش مشاهده‌پذیر می‌شود. برای اینکه تمام شبکه مشاهده‌پذیر باشد، هر شینه باید دست‌کم یک‌بار مشاهده شود.

بازآرایی شبکه

بازآرایی شبکه، فرایند تغییر توپولوژی شبکه از طریق کنترل وضعیت باز و بسته بودن کلیدها به منظور تغییر بارگذاری شبکه است. از جمله مزایای بازآرایی شبکه می‌توان به کاهش تلفات، متعادل‌سازی بار، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش قابلیت اطمینان و امنیت شبکه و بهبود کیفیت توان اشاره کرد. هدف از بازآرایی شبکه، یافتن یک پیکربندی مناسب است که در عین حفظ محدودیت‌های عملیاتی، اهداف به خصوصی را بهینه کند. هدف اصلی در این بخش از مقاله، یافتن ساختاری است که توان تلف شده در سامانه را بدون ایجاد کردن شینه ایزوله به حداقل برساند.

مفهوم بازآرایی یک شبکه برای کاهش تلفات، اولین بار توسط مرلین و بک [۱۶] پیشنهاد شد که طی آن یک روش شاخه و گره به منظور پیدا کردن کم‌ترین تلفات در شبکه پیشنهاد شد. بازآرایی به خودی خود یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی است. هر چه تعداد کلیدها بیشتر باشد، حالت‌های

خطوط، بالانس بار، جلوگیری از افزایش ولتاژ شبکه، کاهش تلفات خطوط و همچنین افزایش قابلیت اطمینان سامانه باشد لیکن در این مرحله مشاهده‌پذیری کامل شبکه نیز مورد بحث قرار گرفته تا تأثیر این بازآرایی در رؤیت پذیری PMUهای جایابی‌شده مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. عملکرد روش پیشنهادشده در شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE تعدیل‌شده بررسی شده است.

جایابی بهینه PMU

جایابی بهینه PMU با دو هدف اساسی رؤیت پذیری شبکه به منظور تخمین حالت و یا کاهش تعداد و مکان‌های لازم برای استقرار آن‌ها انجام می‌پذیرد. البته در این بین هدف‌های جانبی دیگری معمولاً دنبال می‌شود که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف- اهمیت قرارگیری PMU در شینه‌های خاص به دلیل حساسیت آن‌ها (از نظر امنیت شبکه و یا پایداری سامانه)

ب- محدودیت‌های مخابراتی در شبکه‌های بزرگ برای انتقال اطلاعات

ج- امنیت تخمین حالت و وجود المان جایگزین به هنگام از دست رفتن یکی از تجهیزات اندازه‌گیری

مشاهده‌پذیری سامانه قدرت یک شرط اولیه برای تخمین حالت شبکه و به معنای وجود داده‌های لازم به منظور محاسبه متغیرهای حالت سامانه است. به طور کلی ارزیابی مشاهده‌پذیری می‌تواند با استفاده از دو رویکرد عددی و یا توپولوژیکی بررسی شود. یک سامانه از دیدگاه عددی مشاهده‌پذیر است اگر ماتریس ضرایب اندازه‌گیری یک ماتریس درجه کامل باشد. از سوی دیگر، در تحلیل مشاهده‌پذیری به روش توپولوژیکی از مفهوم گراف استفاده می‌شود. یک سامانه قابل مشاهده است اگر در گراف شبکه آن درخت پوشا پیدا شود. الگوریتم تحلیل رؤیت پذیری توپولوژیکی بر پایه قواعد زیر استوار است:

قانون اول: بر اساس قانون اهم، اگر فازور ولتاژ و جریان در یک سر خط شناخته شده باشد، فازور ولتاژ در سر دیگر مشخص می‌شود؛ بنابراین اگر یک شینه به PMU مجهز باشد، همه شینه‌های متصل به این شینه مشاهده‌پذیر هستند.

قانون دوم: در شینه‌های تزریق صفر و همه شینه‌های متصل به آن اگر فقط یک شینه قابل مشاهده نباشد، با اعمال قانون جریان کیرشف، آن شینه می‌تواند مشاهده‌پذیر شود.

قانون سوم: اگر فازور ولتاژ در دو سر یک خط شناخته شده باشد، فازور جریان خط به دست می‌آید.

$$I_i^{min} \leq I_i \leq I_i^{max} \quad (۱۲)$$

حل مسئله بازآرایی شبکه به روش الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) یک روش جستجوی تطبیقی مبتنی بر مکانیسم ژنتیک طبیعی است. این روش برای بهینه‌سازی مسائل مختلف با استفاده از روش‌های مبتنی بر تکامل زیستی مانند تقاطع، جهش و انتخاب برای تولیدمثل و نظریه بقای شایسته‌ترین مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای حل یک مسئله خاص با GA، ابتدا تابع هدف ساخته می‌شود که امکان ارزیابی پاسخ‌های ممکن را فراهم می‌کند. سپس الگوریتم، پاسخ‌هایی را در نظر می‌گیرد که به بهترین شکل خواسته‌های مسئله را برآورده می‌کند. مسئله رمزگذاری ابتدا با تعریف متغیرهای کنترلی انجام می‌شود. هر متغیر کنترلی یک ژن نامیده می‌شود. در صورتی که همه متغیرهای کنترلی در یک بردار ادغام شوند، یک کروموزوم نامیده می‌شود. الگوریتم با مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها مواجه است که جمعیت نامیده می‌شوند. نسل بعدی یا مجموعه جمعیت جدید از تغییر کروموزوم‌های جمعیت موجود شکل می‌گیرد. این کار به سه عملگر ژنتیکی نیاز دارد: انتخاب، تقاطع و جهش.

از جمله پارامترها مهم در GA اندازه جمعیت است. اگر جمعیت از تعداد کمی کروموزوم تشکیل شده باشد، احتمال رخداد تقاطع در GA کم خواهد بود؛ بنابراین، تنها بخش کوچکی از فضای جستجو بررسی می‌شود. همچنین در صورتی که تعداد زیادی کروموزوم در یک مجموعه جمعیت وجود داشته باشد، عملکرد GA کند خواهد شد. اندازه جمعیت بستگی به نوع کدگذاری و مسئله مورد نظر دارد. در مسئله فعلی، وضعیت کلیدها به‌عنوان متغیر کنترلی در نظر گرفته می‌شود. مقادیر این متغیرها صفر یا یک هستند. یک مجموعه جمعیت اولیه با اندازه ۲۰ عضو ایجاد شد. هر کروموزوم از طریق پخش بار توسط نیوتون رافسون ارزیابی می‌شود تا تلفات توان شبکه بررسی شود.

ابتدا، GA بر روی مسئله اعمال شد تا وضعیت کلیدها را مشخص کند، به نحوی که حداقل تلفات توان را با این شرط که به همه شینه‌ها توان برسد ایجاد کند. مجموعه‌ای از متغیرها که این شرایط (کم‌ترین تلفات) را ایجاد می‌کنند، بهترین وضعیت‌های سوئیچ‌ها شناخته می‌شود. یکی از این شرایط خاص به عنوان بهترین وضعیت در نظر گرفته می‌شود. سپس بررسی می‌شود که هیچ‌یک از شینه‌ها دچار اضافه ولتاژ و هیچ‌یک از خطوط دچار اضافه جریان نباشد. اگر چنین شرایطی وجود نداشت، وضعیت در نظر گرفته شده به‌عنوان وضعیت مطلوب انتخاب می‌شود. در غیر این صورت با صرف

ممکن برای پیکربندی بیشتر است. درحالی‌که بسیاری از این حالت‌ها باعث جزیره‌ای شدن بخشی از شبکه می‌شود که مورد نظر ما نیست و باید به نحو صحیحی مدیریت شود.

برای بهینه‌سازی توابع چندهدفه غیر خطی، الگوریتم‌های تکاملی متفاوتی به وجود آمده‌اند. در این مقاله، از یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان ابزاری قدرتمند برای دستیابی به نقطه بهینه سراسری در عین حفظ قیود عملیاتی، پیشنهاد شده است. این مسئله با در نظر گرفتن شرایط باز و بسته بودن کلیدها که به ترتیب با صفر و یک نمایش داده می‌شود، فرمول‌بندی شده است و فرض می‌شود که همه خطوط کلید دارند.

اگر متغیر دودویی x وضعیت باز و بسته بودن کلیدها را مشخص کند و c اندازه و زاویه ولتاژ و سایر متغیرهای حالت سامانه را نشان دهد، آنگاه $f(x,c)$ می‌تواند به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شود که مقدار اتلاف توان سامانه را در وضعیت عملکردی c ارائه می‌دهد. حالت سامانه یا همان c باید با قوانین جریان و ولتاژ سازگار بوده و قیود الکتریکی و دیگر قیود عملیاتی سامانه را حفظ کند.

بنابراین، هدف از بازآرایی یافتن یک پیکربندی است که $f(x,c)$ را درحالی‌که تمام قیود برقرار است، به حداقل می‌رساند. این مسئله را می‌توان در یک فرمول‌بندی کلی به‌صورت تابع هدف واحد با قیود نابرابری به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$\min f(x,c) \quad (۸)$$

$$x \in S$$

$$s.t: G(x,u) \leq 0 \quad (۹)$$

S مجموعه تمام پیکربندی‌های ممکن است و x ها اعضای این مجموعه‌اند که باید قیود غیرخطی ارائه شده در (۹) را برآورده کند. اگر تعداد کل کلیدها در سامانه n_b باشد، آنگاه وضعیت کلیدها در هر لحظه را می‌توان به‌صورت یک بردار $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{n_b}]$ نمایش داد، (که در آن $x_i = 1$ نشان می‌دهد که سوئیچ i بسته است، و $x_i = 0$ نشان می‌دهد که کلید باز است). باید توجه شود که تمامی x های عضو S پاسخ قابل قبول نیستند چراکه به‌عنوان مهم‌ترین قید مسئله، باید همه شینه‌ها توان دریافت کنند و هیچ‌یک از آن‌ها جداسازی شده، نباشد. در مسئله پیش رو $f(x,c)$ عبارت است از مجموع تلفات توان فعال در خطوط.

$$f(x,c) = \sum_{i=1}^n P_i \quad i = 1,2,\dots,n \quad (۱۰)$$

$$s.t. \quad V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (۱۱)$$

جریان خط I_{ij} به صورت مثبت در جهت i به j تعریف می‌شود. S_{ij} و S_{ji} توان مختلط در خط i - j است:

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \hat{V}_i \hat{I}_{ij}^* \quad (۱۶)$$

$$= \hat{V}_i (\hat{V}_i^* - \hat{V}_j^*) y_s^* + |V_i|^2 y_{pi}^*$$

$$S_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = \hat{V}_j \hat{I}_{ji}^* \quad (۱۷)$$

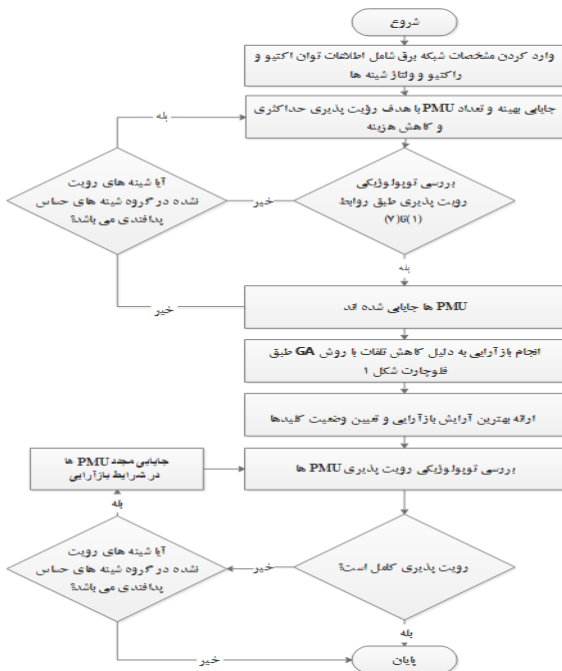
$$= \hat{V}_j (\hat{V}_j^* - \hat{V}_i^*) y_s^* + |V_j|^2 y_{pi}^*$$

تلفات توان در خط i - j جمع جبری توان معادلات ۱۶ و ۱۷ است.

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (۱۸)$$

شبیه‌سازی

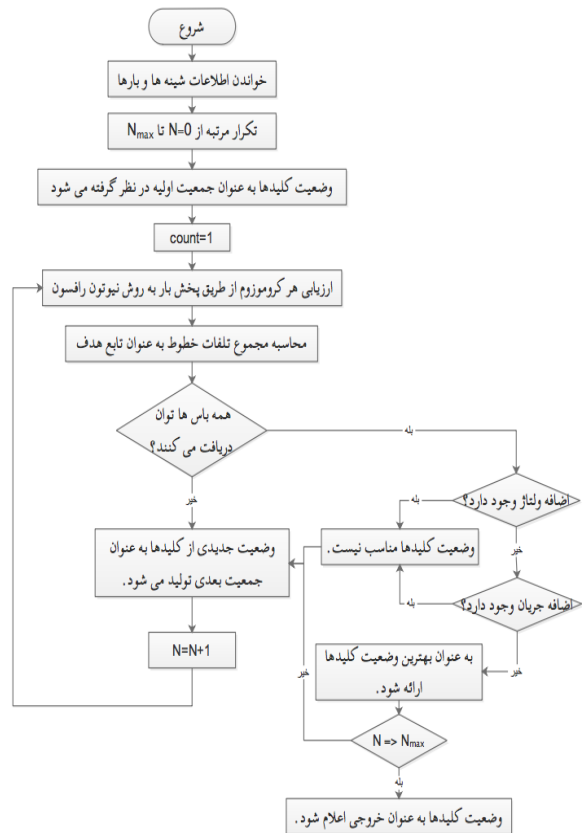
با توجه به طبقه‌بندی اماکن و تأسیسات از نظر حفاظتی (حیاتی، حساس و مهم) بررسی مشاهده‌پذیری شینه‌ها از جهت اتصال تأسیسات و اماکن به آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در این مقاله طبق فلوجارت ذیل موضوع مورد بررسی قرار گرفته است:



شکل ۲. فلوجارت اجرای فرآیند ارزیابی مشاهده‌پذیری شینه‌ها در شبکه‌های بازآرایی‌شده

به منظور بررسی اثر بازآرایی شبکه بر روی جایابی دستگاه‌های PMU موارد بحث شده بر روی شبکه‌های استاندارد ۱۴ شینه و ۳۰ شینه IEEE ارزیابی می‌شود. شبکه ۱۴ شینه IEEE با اضافه کردن دو خط بین شینه‌های ۱ و ۶ و شینه‌های ۱۰ و ۱۴ تغییر داده شده است. شکل (۳) شبکه ۱۴ شینه IEEE و شکل (۴) شبکه ۳۰ شینه IEEE را نشان

نظر از این وضعیت، یک GA دیگر برای به دست آوردن کمترین تلفات توان بازخوانی می‌شود. بعد از این اصلاحات، GA دوباره برای پیدا کردن بهترین شرایط خوانده می‌شود. پس از پایان تعداد تکرارهای مجموعه، بهترین حالت در میان تمامی حالات بدون ایزوله کردن هیچ یک از شینه‌ها به عنوان راه حل بهینه در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱) فلوجارت برنامه پیشنهادی را نشان می‌دهد. محدودیت‌های اضافه ولتاژ یا اضافه جریان را نمی‌توان به طور مستقیم به عنوان قیود مورد استفاده قرارداد زیرا جمعیت از نوع رشته‌های ۰ و ۱ هستند.



شکل ۱. فلوجارت الگوریتم GA پیشنهادی

هر کروموزوم باید توسط یک پخش بار ارزیابی شود تا تلفات توان در آن به دست آید که توسط روش نیوتون رافسون انجام می‌شود. معادلات پخش بار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |y_{ik}| \cos(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) = f_{ip} \quad (۱۳)$$

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |y_{ik}| \sin(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) = f_{iq} \quad (۱۴)$$

جریان خطوط به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{I}_{ij} = \hat{I}_s + \hat{I}_{pi} (\hat{V}_i - \hat{V}_j) y_s + \hat{V}_i y_{pi} \quad (۱۵)$$

جدول ۱. جایابی PMU ها در شرایط اولیه شبکه

سامانه آزمون IEEE	تعداد PMU	جایابی PMU
۱۴ شینه	۴	۲ و ۷ و ۱۰
۳۰ شینه	۱۰	۱ و ۲ و ۶ و ۹ و ۱۰ و ۱۲ و ۱۹ و ۲۳ و ۲۶ و ۲۹

شبکه به صورت پیش فرض در وضعیتی است که همه کلیدها بسته اند. در این حالت تلفات توان اکتیو بر اساس روابط ارائه شده در بخش قبل محاسبه شد. در گام دوم شبکه با هدف کمینه کردن تلفات توان اکتیو بازآرایی می شود. برای این منظور از روش GA و با استفاده از الگوریتم ارائه شده در بخش ۴ استفاده می شود الگوریتم ژنتیک با جمعیت شامل ۲۲ نقطه عضو برای شبکه ۱۴ شینه و ۴۱ نقطه عضو برای شبکه ۳۰ شینه که به صورت اتفاقی ایجاد شده است شروع به کار می کند. نتایج پیاده سازی الگوریتم یعنی کلیدهایی که تصمیم به باز کردن آن ها گرفته شد و همچنین اثر بازآرایی بر روی کاهش توان تلف شده، در جدول های (۲) و (۳) مشخص شده است.

جدول ۲. تأثیر بازآرایی بر روی تلفات توان در شبکه ۱۴ شینه IEEE

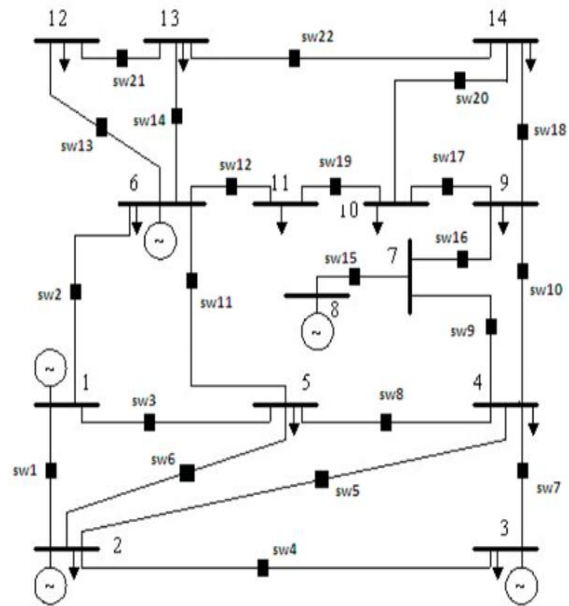
مورد	کلیدهای باز	از شینه	به شینه	تلفات توان (MW)	توضیحات
وضعیت اولیه شبکه در حالت همه کلیدها بسته	-	-	-	۱۰/۱۰۸	بدون اضافه ولتاژ و اضافه جریان
شبکه بهینه پس از اجرای برنامه	Sw17	۹	۱۰	۹/۹۸۷۵	بدون اضافه ولتاژ و اضافه جریان
	Sw18	۹	۱۴		

جدول ۳. تأثیر بازآرایی بر روی تلفات توان در شبکه ۳۰ شینه IEEE

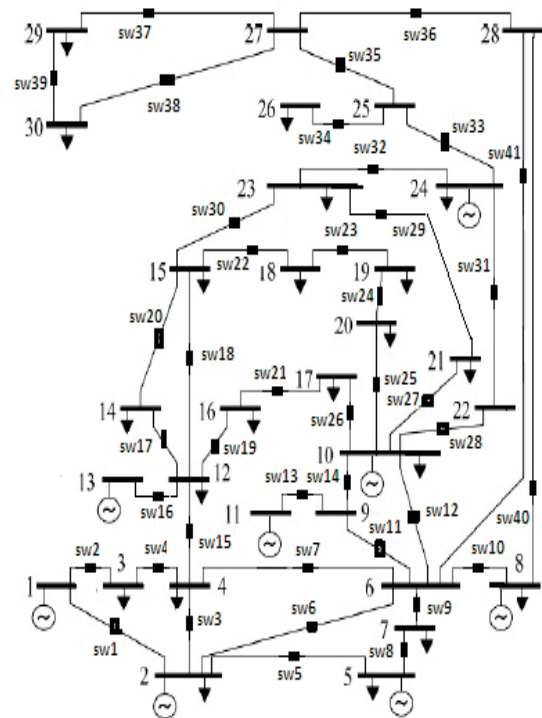
مورد	کلیدهای باز	از شینه	به شینه	تلفات توان (MW)	توضیحات
وضعیت اولیه شبکه در حالت همه کلیدها بسته	-	-	-	۱۷/۴۱۲۹	اضافه جریان بین شینه های ۱ و ۲
شبکه بهینه پس از اجرای برنامه	Sw29	۲۱	۲۳	۱۷/۵۴۲۰	بدون اضافه ولتاژ و اضافه جریان
	Sw32	۲۳	۲۴		

با توجه به جایابی بهینه انجام شده برای PMU ها طبق جدول (۱)، در صورتی که حمله سایبری انجام شود پس از

می دهد که برای سنجش برنامه به کار رفته است. این شکل ها یک کلید در هر خط را نشان می دهد.



شکل ۳. شبکه ۱۴ شینه IEEE تغییر یافته به همراه چینش کلیدها



شکل ۴. شبکه ۳۰ شینه IEEE به همراه چینش کلیدها

در گام اول جایابی بهینه PMU ها با هدف کمینه کردن هزینه نصب آن ها انجام می شود به نحوی که مشاهده پذیری سامانه به طور کامل حفظ شود. برای این منظور روابط ارائه شده در بخش ۲ با استفاده از نرم افزار Gams بهینه شده و نتایج به دست آمده مطابق جدول (۱) است:

با توجه به نتایج جدول فوق فقط مشاهده‌پذیری در شبکه ۳۰ شینه مجدداً به شرح ذیل در دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۵. مشاهده‌پذیری بعد از قطع سوئیچ‌های ۲۹ و ۳۲ (در حالتی که شبکه بازآرایی شده و PMU ها مجدداً جابجا شده‌اند).

$$\begin{aligned} f_1 &= B_1 + B_2 + B_3 \geq 1 \\ f_2 &= B_1 + B_2 + B_4 + B_5 + B_6 \geq 1 \\ f_6 &= B_2 + B_4 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 + B_{10} + B_{28} \geq 1 \\ f_{10} &= B_6 + B_9 + B_{10} + B_{17} + B_{20} + B_{21} + B_{22} \geq 1 \\ f_{11} &= B_9 + B_{11} \geq 1 \\ f_{12} &= B_4 + B_{12} + B_{13} + B_{14} + B_{15} + B_{16} \geq 1 \\ f_{15} &= B_{12} + B_{14} + B_{15} + B_{18} + B_{23} \geq 1 \\ f_{19} &= B_{18} + B_{19} + B_{20} \geq 1 \\ f_{25} &= B_{24} + B_{25} + B_{26} + B_{27} \geq 1 \\ f_{29} &= B_{27} + B_{29} + B_{30} \geq 1 \end{aligned}$$

۴-۵. مشاهده‌پذیری بعد از وصل مجدد سوئیچ‌های ۲۹ و ۳۲ (فرض شود در حالتی که PMU ها جایابی شده‌اند، شبکه به حالت قبل برگردد).

$$\begin{aligned} f_1 &= B_1 + B_2 + B_3 \geq 1 \\ f_2 &= B_1 + B_2 + B_4 + B_5 + B_6 \geq 1 \\ f_6 &= B_2 + B_4 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 + B_{10} + B_{28} \geq 1 \\ f_{10} &= B_6 + B_9 + B_{10} + B_{17} + B_{20} + B_{21} + B_{22} \geq 1 \\ f_{11} &= B_9 + B_{11} \geq 1 \\ f_{12} &= B_4 + B_{12} + B_{13} + B_{14} + B_{15} + B_{16} \geq 1 \\ f_{15} &= B_{12} + B_{14} + B_{15} + B_{18} + B_{23} \geq 1 \\ f_{19} &= B_{18} + B_{19} + B_{20} \geq 1 \\ f_{25} &= B_{25} + B_{26} + B_{27} \geq 1 \\ f_{29} &= B_{27} + B_{29} + B_{30} \geq 1 \end{aligned}$$

همان‌طور که مشاهده می‌گردد در این حالت نیز در مشاهده‌پذیری کامل نقصان به وجود آمده است و شینه شماره ۲۴ دیده نمی‌شود. لذا بر اساس میانی تعریف‌شده در این حالت می‌بایست درجه اهمیت تأسیسات متصل شده به شینه موردنظر از منظر حفاظتی مورد بررسی قرار گیرد. اگر شینه رؤیت نشده در گروه شینه‌های حیاتی و حساس باشد، می‌بایست جایابی بهینه PMUها مجدداً انجام شود و در غیر این صورت کار پایان‌یافته تلقی می‌گردد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر تغییرات در پیکربندی شبکه برق در اثر حملات سایبری بر روی مشاهده‌پذیری شبکه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. با توجه به بررسی تأثیر حملات سایبری روی مشاهده‌پذیری شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ شینه می‌توان چنین نتیجه گرفت که ممکن است بازآرایی شبکه ناشی از حملات سایبری سبب مشاهده‌ناپذیری بخشی از شبکه و یا شینه‌ها گردد لذا در این‌گونه مواقع می‌بایست وضعیت تأسیسات و

بازآرایی شبکه به‌منظور کاهش تلفات طبق شرح ذیل مشاهده می‌گردد که در شبکه ۱۴ شینه مشاهده‌پذیری به‌صورت کامل وجود دارد حال آن‌که در شبکه ۳۰ شینه مشاهده‌پذیری با نقصان مواجه شده و شینه شماره ۲۴ دیده نمی‌شود.

۱-۵. مشاهده‌پذیری قبل از بازآرایی

در شبکه ۱۴ شینه

$$\begin{aligned} f_2 &= B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 \geq 1 \\ f_6 &= B_1 + B_5 + B_6 + B_{11} + B_{12} + B_{13} \geq 1 \\ f_7 &= B_4 + B_7 + B_8 + B_9 \geq 1 \\ f_{10} &= B_9 + B_{10} + B_{11} + B_{14} \geq 1 \end{aligned}$$

در شبکه ۳۰ شینه

$$\begin{aligned} f_1 &= B_1 + B_2 + B_3 \geq 1 \\ f_2 &= B_1 + B_2 + B_4 + B_5 + B_6 \geq 1 \\ f_6 &= B_2 + B_4 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 + B_{10} + B_{28} \geq 1 \\ f_9 &= B_6 + B_9 + B_{10} + B_{11} \geq 1 \\ f_{10} &= B_6 + B_9 + B_{10} + B_{17} + B_{20} + B_{21} + B_{22} \geq 1 \\ f_{12} &= B_4 + B_{12} + B_{13} + B_{14} + B_{15} + B_{16} \geq 1 \\ f_{19} &= B_{18} + B_{19} + B_{20} \geq 1 \\ f_{23} &= B_{15} + B_{21} + B_{23} + B_{24} \geq 1 \\ f_{26} &= B_{25} + B_{26} \geq 1 \\ f_{29} &= B_{27} + B_{29} + B_{30} \geq 1 \end{aligned}$$

۲-۵. مشاهده‌پذیری بعد از بازآرایی

در شبکه ۱۴ شینه

$$\begin{aligned} f_2 &= B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 \geq 1 \\ f_6 &= B_1 + B_5 + B_6 + B_{11} + B_{12} + B_{13} \geq 1 \\ f_7 &= B_4 + B_7 + B_8 + B_9 \geq 1 \\ f_{10} &= B_{10} + B_{11} + B_{14} \geq 1 \end{aligned}$$

در شبکه ۳۰ شینه

$$\begin{aligned} f_1 &= B_1 + B_2 + B_3 \geq 1 \\ f_2 &= B_1 + B_2 + B_4 + B_5 + B_6 \geq 1 \\ f_6 &= B_2 + B_4 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 + B_{10} + B_{28} \geq 1 \\ f_9 &= B_6 + B_9 + B_{10} + B_{11} \geq 1 \\ f_{10} &= B_6 + B_9 + B_{10} + B_{17} + B_{20} + B_{21} + B_{22} \geq 1 \\ f_{12} &= B_4 + B_{12} + B_{13} + B_{14} + B_{15} + B_{16} \geq 1 \\ f_{19} &= B_{18} + B_{19} + B_{20} \geq 1 \\ f_{23} &= B_{15} + B_{23} \geq 1 \\ f_{26} &= B_{25} + B_{26} \geq 1 \\ f_{29} &= B_{27} + B_{29} + B_{30} \geq 1 \end{aligned}$$

با توجه به نتیجه فوق PMUها مجدداً در شبکه بازآرایی شده جایابی گردیده و نتیجه در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴. جایابی PMUها پس از بازآرایی شبکه

سامانه آزمون	تعداد PMU	جایابی PMU
IEEE	۴	۱۰ و ۷ و ۲
۱۴ شینه	۴	۱۰ و ۷ و ۲
۳۰ شینه	۱۰	۲۹ و ۲۵ و ۱۹ و ۱۵ و ۱۲ و ۱۱ و ۱۰ و ۷ و ۲

- [7] Vaidya, U.; Fardad, M. "On Optimal Sensor Placement for Mitigation of Vulnerabilities to Cyber Attacks in Large-Scale Networks"; European Control Conf. (ECC), Zurich, Switzerland, 2013, 3548-3553.
- [8] Mousavian, S. A. A.; Valenzuela, J.; Wang, J. "A Probabilistic Risk Mitigation Model for Cyber-Attacks to PMU Networks"; IEEE Trans. Power Syst. 2015, 30, 156-165.
- [9] Stefanov, A.; Liu, C. C. "Cyber-Power System Security in a Smart Grid Environment"; IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington D.C., USA, 2012, 1-3.
- [10] Wu, Y. K.; Lee, C. Y.; Liu, L. C.; Tsai, S. H. "Study of Reconfiguration for the Distribution System with Distributed Generators"; IEEE Trans. Power Deliver. 2010, 25, 1678-1685.
- [11] Koutsoukis, N. C.; Siagkas, D. O.; Georgilakis, P. S.; Hatziaargyriou, N. D. "Online Reconfiguration of Active Distribution Network for Maximum Integration of Distributed Generation"; IEEE Trans. Autom. Sci. Eng. 2017, 14, 437-448.
- [12] Rao, R. S.; Narasimham, S. V. L.; Raju, M. R.; Rao, A. S. "Optimal Network Reconfiguration of Large-Scale Distribution System Using Harmony Search Algorithm"; IEEE Trans. Power Syst. 2011, 26, 1080-1088.
- [13] Huang, S.; Wu, Q.; Cheng, L.; Liu, Z. "Optimal Reconfiguration-Based Dynamic Tariff for Congestion Management and Line Loss Reduction in Distribution Network"; IEEE Trans. Smart Grid 2016, 7, 1295-1303.
- [14] Abu-Elanien, A. E.; Salama, M.; Shaban, K. B. "Modern Network Reconfiguration Techniques for Service Restoration in Distribution Systems: A Step to A Smarter Grid"; Alexandria Eng. J. 2018, 57, 3959-3967.
- [15] Zhai, H. F.; Yang, M.; Chen, B.; Kang, N. "Dynamic Reconfiguration of Three-Phase Unbalanced Distribution Networks"; Int. J. Elec. Power 2018, 99, 1-10.
- [16] Merlin, A.; Back, H. "Search for a Minimum Loss Operating Spanning Tree Configuration for Urban Power Distribution System"; Proc. 5th Power System Computation Conference (PSCC), Cambridge, 1975.

اماکن متصل شده به شینه مذکور از منظر درجه طبقه‌بندی حفاظتی (حیاتی، حساس و مهم) و همچنین اهمیت آن مورد بررسی قرار گیرد. چنانچه تأسیسات مربوطه جزو مراکز حیاتی و حساس نباشد، جایابی انجام‌شده مورد تأیید است ولی در غیر این صورت به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان در مواقع بروز خطا در شبکه و جلوگیری از بروز خسارات احتمالی پس از هر بازآرایی جایابی بهینه PMUها ضروری است. چنانچه در مسئله فوق در شبکه ۱۴ شینه IEEE بازآرایی شبکه باعث وجود اختلالی در مشاهده‌پذیری کامل شبکه نگردید، حال آنکه در شبکه ۳۰ شینه IEEE این موضوع با نقصان مشاهده‌پذیری مواجه گردید.

۷. مراجع‌ها

- [1] Ghayoori Sales, M.; Salmani, K.; Haghjoo, M. "Detecting Integrity Attacks to a Data Stream Management System"; Adv. Defence Sci. Technol. 2, 4, 245- 253.
- [2] Giani, A.; Bent, R.; Pan, F. "Phasor Measurement Unit Selection for Unobservable Electric Power Data Integrity Attack Detection"; Int. J. Crit. Infr. Prot. 2014, 3, 155-164.
- [3] Khanzadeh, M. H.; Nabatirad, M. R.; Ashrafi, A. "Improving Power System Stability after Contingency Occurrence on the Basis of Distributed Artificial Intelligence"; Adv. Defence Sci. Technol. 6, 4, 245- 253.
- [4] Enshae, A.; Hooshmand, R. A.; Fesharaki, F. "A New Method for Optimal Placement of Phasor Measurement Units to Maintain Full Network Observability Under Various Contingencies"; Electr. Power Syst. Res. 2012, 89, 1-10.
- [5] Amare, K.; Centeno, V. A.; Pal, A. "Unified PMU Placement Algorithm for Power System"; North American Power Symposium (NAPS), Charlotte, NC, 2015, 1- 6.
- [6] Manousakis, N. M.; Korres, G. N.; Georgilakis, P. S. "Taxonomy of PMU Placement Methodologies"; IEEE Trans. Power Syst. 2012, 27, 1070-1077.