

## ساختار کنترلی مبتنی بر هوش مصنوعی توزیع شده به منظور

### بهبود پایداری شبکه قدرت در مواقع بحران

محمدحسین خانزاده<sup>۱\*</sup>، محمدرضا نباتیراد<sup>۲</sup>، علیرضا اشرفی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۳/۱۱/۱۵، پذیرش: ۹۴/۰۶/۲۱)

#### چکیده

با توجه به اهمیت شبکه قدرت در امنیت ملی، حفظ پایداری سامانه قدرت و جلوگیری از بروز خاموشی در شرایط بحرانی یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های متولیان سامانه قدرت است. استفاده از هوش مصنوعی توزیع شده و به‌کارگیری زیرساخت‌های کنترل ناحیه گسترده منجر به ایجاد طرحی انعطاف‌پذیر برای کنترل شبکه قدرت می‌گردد و سامانه‌ای مقاوم را در برابر اغتشاش‌های ناشی از بلاای طبیعی، جنگ، خرابکاری، حملات سایبری و یا نقص‌های فنی پدید می‌آورد. این مقاله تلاش دارد تا طرحی را پیشنهاد نماید که بر اساس آن بتوان پایداری شبکه قدرت را در قبال بروز اغتشاش و با استفاده از تئوری‌های مطرح در هوش مصنوعی توزیع شده، بهبود داد. بنابراین الگوریتمی بر اساس قابلیت برقراری ارتباط بین واحدهای مختلف که دارای هوش هستند و با استفاده از اندازه‌گیری دامنه ولتاژ شینه‌های مختلف در شبکه قدرت پیشنهاد شده است که با انجام اقدامات اصلاحی قادر است تا از وقوع ناپایداری جلوگیری کند. طرح پیشنهاد شده در این مقاله با توجه به دارا بودن قابلیت منطبق شدن بر وضعیت دینامیکی شبکه به صورت زمان واقعی قادر به رفع ناپایداری در شبکه قدرت است. طرح پیشنهاد شده در نرم‌افزار DigSILENT شبیه‌سازی شده و نتایج با طرح‌های سنتی که شامل ساختار سلسله مراتبی و همچنین سازمان توزیع شده و بدون ناظر است، مقایسه شده است.

**کلید واژه‌ها:** امنیت شبکه قدرت، سامانه چند عاملی، هوش مصنوعی توزیع شده، کنترل ناحیه گسترده.

## Improving Power System Stability after Contingency Occurrence on the Basis of Distributed Artificial Intelligence

M. H. Khanzade\*, M. R. Nabatirad, A. Ashrafi

Imam Hossein University

(Received: 04/02/2015; Accepted: 12/10/2015)

#### Abstract

Considering the importance of power networks in national security, power system stability under critical conditions such as occurrence of contingencies is the most important concern of power system engineers and government. In this area, employing Distributed Artificial Intelligence (DAI) theory and also Wide Area Monitoring, Protection And Control (WAMPAC) infrastructures may help to create a flexible organization where provides a robust system against contingency occurrence. This study proposes an adaptive structure on the basis of Multi Agent System (MAS). In this context, an algorithm has been proposed which helps the control system to save power system from collapse after detection of wide area voltage violation. Also, in order to verify the proposed algorithm, DigSILENT software has been employed to simulate and the results are compared with conventional structures such as central control system and also unsupervised control structure.

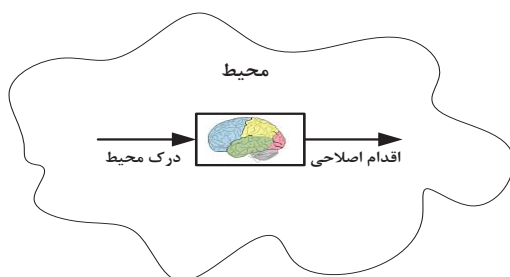
**Keywords:** Power System Security, Multi Agent System, Distributed Artificial Intelligence, Wide Area Control.

## ۱. مقدمه

شبکه قدرت نصب شده‌اند 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 کنترل 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 به کار بستن اقدامات مناسب به منظور جلوگیری از بدتر شدن وضعیت پایداری شبکه در زمان‌های وقوع اغتشاش را فراهم می‌آورد. در این مقاله نیز داده‌های گزارش شده از PMU استفاده می‌شود تا با اتخاذ تصمیمات مناسب و پیاده‌سازی ساختار کنترلی مناسب بتوان شبکه قدرت را از ورطه خاموشی رهانید [۶-۸].

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در این مقاله از واحدهای توزیع شده‌ای که دارای هوش هستند و عامل نامیده می‌شوند استفاده شده است تا بتوان پایداری شبکه قدرت را افزایش داد. در حقیقت یک عامل به واحدی اطلاق می‌گردد که قابلیت انجام اقداماتی را به صورت خودمختار داشته باشد و از طرف دیگر با دیگر واحدها و عامل‌های اطراف خود در ارتباط مخابراتی باشد. این تعریف منجر به پدید آمدن واحدی می‌شود که رفتار کلی آن در شکل (۱) نشان داده شده است [۲ و ۴].

همان‌طور که از شکل (۱) نیز برمی‌آید، یک عامل در ابتدا محیط اطراف خود را درک کرده و با استفاده از هوش خود اقدام به اتخاذ تصمیم مناسب در رابطه با وضعیت کنونی محیط و وضعیت مطلوب می‌نماید و در نهایت با انجام دادن اقدام اصلاحی مناسب تلاش می‌کند تا وضعیت محیط اطراف خود را به وضعیت مطلوب میل دهد.



شکل ۱. نمای کلی یک عامل و تعامل آن با محیط اطراف [۴]

واضح است که در صورت بزرگ یا پیچیده بودن محیط، یک عامل به تنهایی قادر نیست نسبت به مطلوب نمودن وضعیت آن اقدام کند و ضروری است تا چندین عامل در کنار یکدیگر نسبت به حفظ و بهبود سامانه تلاش کنند. بنابراین مفهوم جدیدی پدید می‌آید که سامانه چند عاملی<sup>۵</sup> نامیده می‌شود و شاخه فعالی از دانش هوش مصنوعی توزیع شده است. در حقیقت سامانه چند عاملی به چندین

با توجه به پیشرفت‌هایی که در صنعت مهندسی برق، رایانه و مخابرات پدید آمده است و همچنین وقوع حوادث و بلایای طبیعی، جنگ و حمله نظامی کشورهای مهاجم و نیز تهدیدات سایبری، لزوم بهره‌برداری از انرژی الکتریکی در این شرایط باید از فناوری‌های نوین در تولید، انتقال و توزیع انرژی لکتريکی استفاده کرد. از طرف دیگر عملیات سایبری، روانی، تهاجم سخت، نفوذ و خرابکاری جزء مهم‌ترین تهدیدات حوزه صنعت برق است. به عنوان نمونه در جنگ آمریکا و عراق و همچنین حمله آمریکا به کوزوو شبکه قدرت این دو کشور به عنوان پشتوانه اقتدار ملی آن‌ها بارها مورد حمله قرار گرفت. در حال حاضر گرایش دشمنان جمهوری اسلامی ایران نیز به جنگ نیمه سخت است، از این رو یکی از مهم‌ترین اصول مقابله با این تهدیدات، لحاظ پدافند غیرعامل در برنامه‌ریزی، طرح، توسعه و بهره‌برداری شبکه‌های قدرت است [۱].

در این مقاله نیز تلاش شده است تا با استفاده از مفاهیم مطرح شده در هوش مصنوعی توزیع شده<sup>۱</sup> و بهره‌گرفتن از روابطی که بین واحدهای مختلفی که دارای هوش هستند و تحت عنوان عامل<sup>۲</sup> شناخته می‌شوند، بتوان پایداری شبکه انتقال و تولید را در مقابل اغتشاش‌های مختلف افزایش داد و به عبارت دیگر میزان مقاومت شبکه انتقال را در مقابل حملات خرابکارانه و نظامی افزایش داد [۲-۵]. اغتشاش‌هایی که در شبکه قدرت رخ می‌دهند ممکن است در اثر بلایای طبیعی، حملات نظامی، تهدیدات سایبری، خرابکاری‌های تروریستی و یا در اثر موارد فنی مرتبط با سامانه باشند [۱].

اثرات اولیه اغتشاشات در شبکه قدرت می‌تواند شامل خرابی یک نیروگاه، از کار افتادن ترانسفورماتورهای قدرت با توان انتقالی بالا و یا قطع شدن خطوط انتقال در شبکه قدرت باشد. بدیهی است به خاطر فیزیک شبکه و دینامیکی که در سامانه قدرت وجود دارد اثرات اولیه آن که عبارت‌اند از قطع توان عبوری و محول شدن تأمین آن به دیگر قسمت‌ها و اجزای شبکه و همچنین ایجاد شدن گذرهای الکترومغناطیسی و الکترومکانیکی منجر به بروز اثرات ثانویه می‌شود. اثرات ثانویه اغتشاشات رخ داده در شبکه قدرت نیز عبارت‌اند از وقوع ناپایداری ولتاژ و فرکانس و وقوع خاموشی منطقه‌ای یا سراسری در همه جغرافیای کشور و بی‌برق شدن مراکز حساسی مانند مراکز نظامی، بیمارستان‌ها، مراکز علمی، کارخانه‌های صنعتی و همچنین مناطق مسکونی که همگی آن‌ها به معنای وقوع اختلال در کشور بوده و در نهایت امنیت ملی را تهدید می‌نمایند.

در سال‌های اخیر و به منظور دستیابی بیشتر به وضعیت دینامیکی شبکه قدرت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری فازور<sup>۳</sup> در سراسر دنیا افزایش یافته است. این دستگاه‌ها با توجه به اینکه در نقاط مختلف

<sup>۱</sup> Distributed Artificial Intelligence

<sup>۲</sup> Phasor Measurement Unit (PMU)

<sup>۳</sup> Global Positioning System

<sup>۴</sup> Environment

<sup>۵</sup> Multi Agent System

مورد نیاز در شبکه قدرت تعریف شوند. در این مقاله نیز رایانه هر پست (که اطلاعات مربوط به شبکه قدرت در آن وجود دارد) به عنوان مغز پردازنده عامل در نظر گرفته شده است و دستگاه PMU نیز به عنوان حسگر برای عامل باس عمل می‌کند و در نهایت تصمیمات اتخاذ شده توسط عامل به خازن/راکتور و یا تپ‌چنجر ترانسفورماتورهای نصب شده در شبکه انتقال داده می‌شود تا آن‌ها با تغییر دادن تعداد بانک‌های خازنی/راکتوری و یا تغییر تپ در ترانسفورماتورها نسبت به کنترل ولتاژ در شبکه قدرت اقدام کنند. از این پس در این مقاله عامل باس به مجموعه رایانه پست و PMU نصب شده در پست اطلاق می‌گردد و از تفصیل آن خودداری می‌شود.

هر عامل باس برای اینکه بتواند ولتاژ شبکه قدرت را کنترل نماید باید به ابزارهای کنترلی دسترسی داشته باشد. در این مقاله بانک‌های خازنی/راکتوری و همچنین تپ‌چنجر ترانسفورماتورهای نصب شده در شبکه قدرت به عنوان ابزارهای کنترلی استفاده شده‌اند و در اختیار عامل‌های باس قرار گرفته‌اند. در مواقع لزوم و بر اساس تصمیمات اتخاذ شده توسط عامل باس به منظور کنترل ولتاژ شبکه قدرت و جلوگیری از بروز ناپایداری و فروپاشی در شبکه از این ابزارها استفاده می‌شود. به همین منظور چندین ابزار کنترلی در اختیار یک عامل باس قرار می‌گیرد. در حقیقت هر عامل باس علاوه بر ابزارهای کنترلی که در شینه خودش نصب شده‌اند، ابزارهای کنترلی در شینه‌های کناری را نیز در اختیار می‌گیرد تا بتواند حوزه کنترلی خود را افزایش دهد. به این ترتیب و از آنجایی که همین روش برای باس‌های کناری نیز به کار گرفته شده است، عامل‌های باسی که در همسایگی یکدیگر قرار دارند، دارای ابزارهای کنترلی مشترک هستند. با توجه به این واقعیت که ابزارهای کنترلی در صورت ضرورت و برای عمل کردن به منظور بهبود وضعیت شبکه تنها باید از یک عامل باس دستور دریافت کنند باید هماهنگی بین عامل‌های باس وجود داشته باشد تا تنها یکی از عامل‌های باس فرمان کنترلی را به ابزارهای کنترلی انتقال داده و از انجام عملکردهای بیجا خودداری شود. بر همین اساس می‌توان نمای شماتیکی از عامل‌های باس و ابزارهای کنترلی که در اختیار آنان قرار دارد را به صورت شکل (۲) نشان داد. در شکل (۲) یک ساختار کنترلی دو لایه نمایش داده شده است که در لایه بالایی عامل‌های باس و در لایه پایینی تر ابزارهای کنترلی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص شده است، برخی از ابزارهای کنترلی در ناحیه قابل کنترل توسط چند عامل باس قرار دارند. بنابراین وجود روابط مخابراتی بین آن‌ها به منظور رسیدن به هماهنگی مناسب ضروری می‌باشد.

در مواقعی که شبکه دچار اختلال شده و ولتاژ شبکه از محدوده استاندارد خارج شده باشد عامل‌های باس اقدام به برقراری روابط مخابراتی می‌کنند تا از ابزارهای کنترلی استفاده نمایند. هر تعداد عامل باسی که دارای یک ابزار کنترلی مشترک هستند یک ائتلاف را تشکیل می‌دهند تا بتوانند با توجه به پیام‌هایی که رد و بدل می‌کنند

عامل که با همکاری یکدیگر اقدام به بهبود وضعیت محیط اطراف خود (که ممکن است شبکه قدرت باشد) می‌کنند به شرطی که استقلال هر عامل حفظ شود، گفته می‌شود. در این صورت یک مسئله و یا مشکل بزرگ به قسمت‌های کوچک‌تر تبدیل شده و هر عامل نسبت به حل کردن قسمت کوچک‌تر در حوزه خود اقدام می‌کند و در نهایت با توجه به تعداد عامل‌ها و پخش شدن آن‌ها در همه محیط و همگرا بودن نتایج همه عامل‌ها، وضعیت همه سامانه به حالت مطلوب نزدیک‌تر می‌شود [۲ و ۴].

در شبکه قدرت نیز به عنوان یک محیط با پیچیدگی‌های زیاد رساندن ولتاژ و فرکانس شبکه به محدوده استاندارد اصلی‌ترین هدف شبکه به شمار می‌رود. بنابراین با تعریف کردن عامل‌های مناسب، پیاده‌سازی ساختار کنترلی مناسب و به کار گرفتن اقدامات مناسب می‌توان به وضعیت مطلوب شبکه قدرت دست یافت. در این مقاله مجموعه رایانه هر پست و PMU که در آن پست نصب شده است به عنوان عامل باس در نظر گرفته شده است. تعاملی که بین عامل‌های باس صورت می‌پذیرد، از طریق کانال مخابراتی است و کمک می‌نماید تا عامل‌های باس با یکدیگر هماهنگ شده و تلاش نمایند تا با همکاری و همیاری یکدیگر وضعیت شبکه قدرت را در حالت استاندارد حفظ نمایند و یا در صورت وقوع اغتشاش آن را به حالت استاندارد بازگردانند [۹ و ۱۰].

### ۱-۱. مزایای استفاده از سامانه چند عاملی

استفاده از سامانه‌های چند عاملی به خاطر داشتن توان بالقوه زیاد در ایجاد اتوماسیون، مزایای متنوعی را برای شبکه قدرت به همراه می‌آورد که چند نمونه از آن در زیر اشاره شده است [۲، ۱۴-۱۱]:

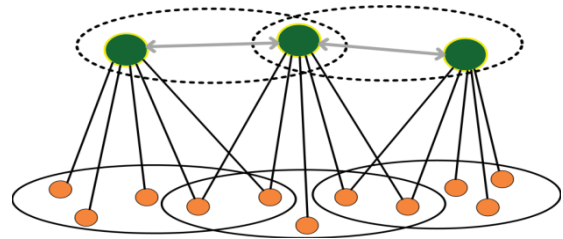
- پخش شدن مراکز کنترل که منجر به آسیب‌پذیری کمتر در صورت از دست رفتن یک مرکز کنترل به دلیلی خرابی و یا خرابکاری می‌شود.
- ایجاد یک ساختار دینامیکی که منطبق بر دینامیک شبکه قدرت است.
- معرفی ساختاری که به صورت زمان واقعی اقدام به انجام اقدامات اصلاحی در شبکه قدرت می‌نماید.
- رعایت افزونگی در سامانه چند عاملی به طوری که در شرایط حساس عامل‌ها بتوانند ولتاژ شینه‌های دیگر را نیز ترمیم نمایند.

در ادامه و در بخش دوم رویکرد پیشنهاد شده در این مقاله بررسی شده و توصیف می‌شود. در بخش سوم مطالب مربوط به شبیه‌سازی توصیف شده است و نتایج مربوط به آن ارائه شده است و در نهایت در بخش چهارم جمع‌بندی مقاله ارائه می‌گردد.

### ۲. روش تحقیق مبتنی بر سامانه‌های چند عاملی

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبلی در ابتدا باید عامل‌های

به توافق برسند تا مشخص شود که با توجه به شرایط کنونی شبکه قدرت، کدامیک از عامل های باس باید نسبت به تصاحب ابزارهای کنترلی و استفاده از آن اقدام کنند.



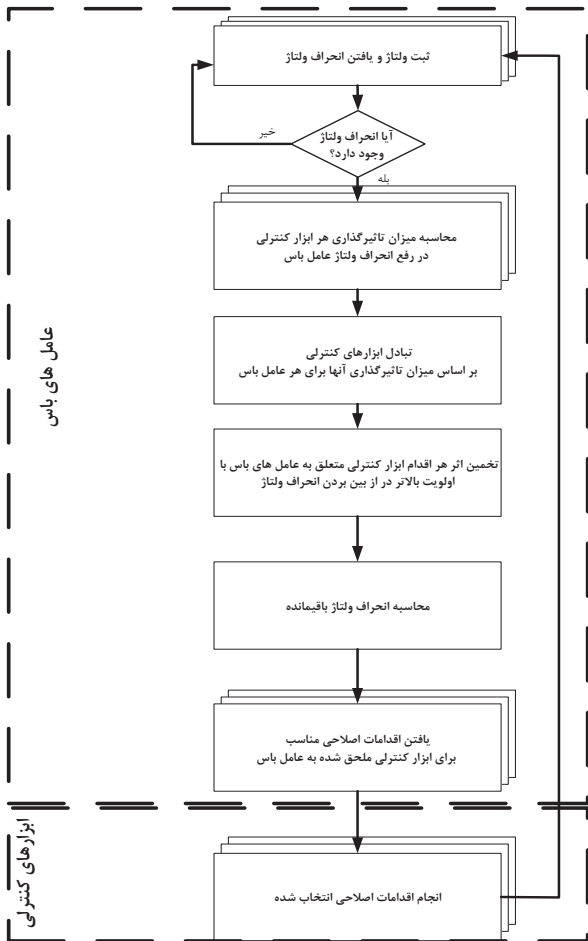
شکل ۲. شماتیک ساختار کنترلی پیشنهادی مبتنی بر سامانه های چند عاملی

علاوه بر این ساختاری که در این مقاله استفاده شده است تا چندین عامل در قالب سامانه چند عاملی عمل کرده و سامانه قدرت را پایدار نگه دارند، در روندنمای شکل (۳) آمده است. این روندنما در هر یک از عامل ها وجود داشته و همه آن ها با توجه به تنظیماتی که برای آن ها تعریف شده است اقدام به تصمیم گیری و سپس اجرای آن می کنند. در روندنمای شکل (۳) پیاده سازی ساختار به صورت گام به گام انجام شده است و در زیر توضیحات مرتبط با آن ارائه شده است:

**گام اول:** در اولین گام و با توجه به این که دستگاه PMU در حال ثبت ولتاژ است، عامل اقدام به ثبت ولتاژ کرده و بر اساس آن میزان انحراف ولتاژ را می سنجد که در رابطه (۱) نیز نشان داده شده است. در صورتی که اغتشاش در شبکه رخ داده باشد و باس دچار افت ولتاژ شده باشد، اندازه انحراف ولتاژ باس از محدوده نامی را می یابد و در صورتی که انحرافی از محدوده نامی ولتاژ وجود نداشته باشد، همچنان در حالت عادی به کار خود ادامه می دهد ولی در حالتی که در اثر وقوع اغتشاش در شبکه، باس دچار افت ولتاژ شده باشد، الگوریتم مربوط به هر یک از عامل ها وارد گام بعدی می شود.

$$Need_k = 0.95 - |V_k| \quad (1)$$

**گام دوم:** در گام دوم و با توجه به اینکه در این گام مشخص شده است که ولتاژ باس از محدوده مجاز خود خارج شده است، عامل های باس با توجه به اینکه در رایانه پست قرار دارند اقدام به محاسبه مقدار تأثیرگذاری ابزارهای کنترلی که در حوزه خود دارند می کنند. در حقیقت در این مرحله هر عامل باس نسبت به محاسبه ضرایب حساسیت مربوط به ابزارهای کنترلی که در محدوده خود دارد اقدام می کند (این ضرایب با استفاده از روش های مبتنی بر پخش بار انجام پذیرفته است که به علت کمبود فضا از بیان نمودن آن خودداری شده است). پس از آن هر عامل باس با توجه به اینکه دارای اطلاعات کافی از بانک های خازنی / راکتوری و یا تپ چنجرها در حوزه خود است، میزان تأثیرگذاری را با ضرب کردن اندازه ضریب حساسیت در اندازه ظرفیت هر واحد از بانک خازنی و یا تپ چنجر محاسبه می کند.



شکل ۳. روند نمای پیشنهادی برای پیاده سازی ساختار مبتنی بر عامل ها

**گام سوم:** در شرایطی که شبکه دچار افت ولتاژ در یک یا چند باس شده است (افت ولتاژ گسترده در شبکه قدرت رخ داده است)، وجود علایق مشترک بین باس ها (علاقه به از بین بردن انحراف ولتاژ) و وجود منابع محدود (تعداد ابزارهای کنترلی محدود برای جبران افت ولتاژ) عامل های باس را بر آن می دارد تا در به اختیار گرفتن ابزارهای کنترلی با یکدیگر به تبادل پیام بپردازند و آرایش اولیه را تغییر دهند تا بتوانند نسبت به رفع افت ولتاژ در باس های خود اقدامات لازم را به انجام برسانند. به عبارت دیگر تعدادی از عامل های باس که دارای ابزارهای کنترلی مشترک هستند، به صورت هم زمان ائتلاف هایی را تشکیل می دهند تا بتوانند در مورد ابزار کنترلی مورد نظر به مذاکره بپردازند. احتمال داده می شود یک عامل باس در بیش از یک ائتلاف شرکت داشته باشد و در هر ائتلاف در مورد عامل / عامل های واکنشی خاصی به تبادل پیام به منظور رسیدن به توافق بپردازد. به عبارت دیگر، عامل باس با توجه به آرایشی که در گام های اولیه پیشنهاد شده است، می تواند در ائتلاف های متفاوتی شرکت کند که تشکیل شدن ائتلاف ها با توجه به نوع افت ولتاژ و اغتشاشی است که در هر لحظه برای شبکه قدرت به وجود آمده است. در حقیقت در این گام، مراحل زیر طی می شوند:

توسط عامل باس نام انتخاب شده‌اند،  $S_{kj}$  اندازه ضریب حساسیت ولتاژ باس  $k$ ام به ابزار کنترلی  $j$ ام است و  $J_k$  تعداد واحدهای مربوط به ابزار کنترلی  $j$  است که توسط عامل باس نام به کار گرفته شده‌اند.

**گام پنجم:** در گام پنجم از تشکیل سازمان پیشنهادی برای کنترل ولتاژ در شبکه قدرت، اندازه نیاز نهایی که برای هر باس وجود دارد (با توجه به مقدار نیاز واقعی فعلی و مقدار محاسبه شده تأمین ولتاژ توسط عامل با اولویت بالاتر) محاسبه می‌شود. به این منظور رابطه (۴) به کار گرفته می‌شود.

$$Need_k^{remained} = Need_k - \Delta Need_k \quad (4)$$

**گام ششم:** در گام ششم هر عامل از میزان ولتاژی که باید تأمین کند آگاه است و همچنین از ابزارهای کنترلی که در اختیار دارد اطلاع کافی برخوردار است و اندازه تأثیرگذاری آن‌ها در ولتاژ را نیز می‌داند و بنابراین اقدام به انتخاب عمل‌های اصلاحی مناسب به منظور رفع افت ولتاژ می‌کند. نحوه انتخاب عمل‌های اصلاحی مناسب نیز به ترتیبی است که در آن ابزارهای کنترلی که دارای بالاترین ضریب تأثیرگذاری است انتخاب می‌شود و واحدهای آن به صورت یک به یک در جبران افت ولتاژ در نظر گرفته می‌شوند تا در نهایت انحراف ولتاژ را از بین ببرند. به این ترتیب حداقل تعداد عمل‌های مناسب برای تأمین ولتاژ انتخاب می‌شوند. قابل ذکر است که محدودیت‌هایی مانند حداکثر واحدهای قابل استفاده ابزارهای کنترلی و موقعیت کنونی تپ‌چنجر و حداقل و حداکثر موقعیت آن در محاسبه و استفاده از آن‌ها مورد نظر و توجه قرار می‌گیرد. علاوه بر این با توجه به امکان تأثیرگذاری معکوس تپ‌چنجر در وضعیت ولتاژی شبکه قدرت، در فرایند محاسبه و استفاده از تنظیم کننده ولتاژ در ترانسفورماتورها تنها از تغییر موقعیت یک پله‌ای برای آن‌ها استفاده شده است. به عبارت دقیق‌تر در مواقع استفاده از تپ‌چنجرها در هنگام افت ولتاژ در شبکه تنها از تغییر یک پله‌ای آن استفاده می‌شود.

**گام هفتم:** هفتمین و آخرین گامی که می‌توان برای ایجاد ساختار کنترلی مبتنی بر سامانه‌های چند عاملی در نظر گرفت، اعمال اقداماتی است که در مرحله قبلی انتخاب شده‌اند. به این ترتیب که اقدامات انتخاب شده به ابزارهای کنترلی انتقال داده می‌شود تا نسبت به اعمال آن‌ها اقدام کنند.

پس از انجام شدن این فرایند، عامل‌های باس اقدام به پایش ولتاژ باسی می‌کنند که در آن نصب شده‌اند و در صورتی که نیاز باس‌ها به تأمین ولتاژ به قوت خود باقی باشد، مراحل توضیح داده شده در قبل را تکرار می‌کنند تا بر اساس نیاز جدید نسبت به رفع افت ولتاژ اقدام کنند. در صورتی که نیاز عامل‌های باس برطرف شده باشد، عامل‌های باس به وضعیت عادی برگردانده می‌شوند تا زمان دیگری که ولتاژ شینه در اثر اغتشاش دچار انحراف گردد.

به طور خلاصه می‌توان برای انجام شدن مذاکره و وضعیت

۱. نسبت دادن اولویت به عامل‌های باس با توجه به اندازه انحراف ولتاژ (اندازه شاخص نیاز)؛ عامل باس با اندازه نیاز بیشتر دارای اولویت بالاتری است.

۲. انتخاب ابزارهای کنترلی توسط عامل‌های باس با توجه به اولویت عامل‌های باس به طوری که عامل باس با اولویت بالاتر امکان انتخاب بیشتری دارد.

۳. محاسبه میزان اقدامات اصلاحی مورد نیاز برای جبران افت ولتاژ (صفر و یا منفی کردن شاخص نیاز با استفاده از انتخاب یک به یک ابزارهای کنترلی و در نظر گرفتن یک به یک واحدهای آن با در نظر گرفتن تعداد واحدهایی که در مدار قرار دارند). به این منظور از رابطه (۲) استفاده می‌شود که در آن  $J_k$  شامل آن دسته از عامل‌های واکنشی است و توسط عامل باس  $k$ ام و در این مرحله انتخاب شده‌اند،  $S_{kj}$  ضرایب حساسیتی بوده و  $J_k$  نیز تعداد واحدهای ابزار کنترلی  $j$ ام توسط عامل باس  $k$ ام به منظور جبران افت ولتاژ است.

$$Need_k - \sum_{j \in J_k} S_{kj} U_j \leq \epsilon \quad (2)$$

۴. تملک ابزارهای کنترلی که در مرحله قبل مورد نظر واقع شدند و در جبران افت ولتاژ مؤثر هستند.

۵. ارسال پیام توسط عامل باس مورد نظر در مراحل قبلی به دیگر عامل‌های باس که حاوی ابزارهای کنترلی انتخاب شده و به کار گرفته شده در مرحله قبل توسط عامل باس است.

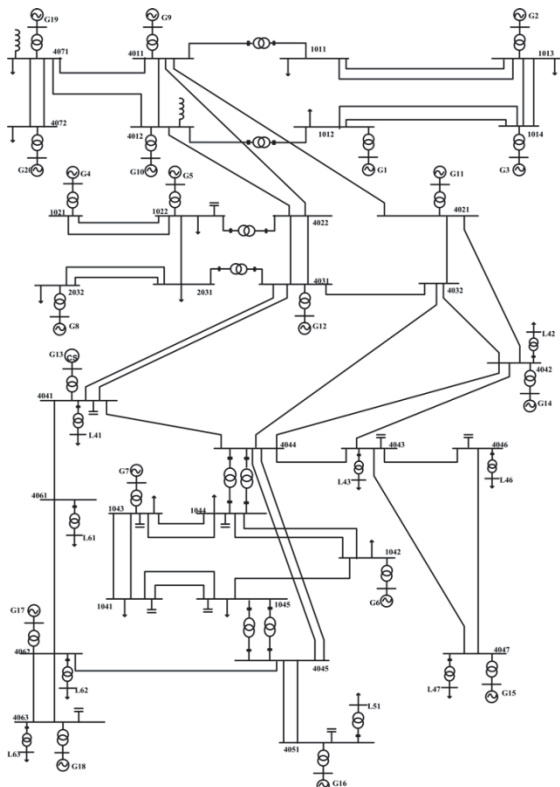
**گام چهارم:** در این گام و با توجه به این واقعیت که عامل‌های باس اقدام به تبادل ابزارهای کنترلی در مراحل قبلی کرده‌اند، می‌توان به این واقعیت پی برد که اقداماتی که یک عامل باس در پی می‌گیرد، ممکن است منجر به تغییر در ولتاژ دیگر باس‌ها نیز شود. بنابراین، هر عامل باسی که دارای انحراف ولتاژ است، اقدام به محاسبه تأثیر ولتاژ جبران شده به خاطر اقدامات اصلاحی انجام شده توسط دیگر عامل‌های باس می‌کند. به عبارت دیگر هر عامل باس با دریافت کردن پیامی که مبین اقدامات اصلاحی انجام شده توسط عامل‌های باس با اندازه انحراف ولتاژ بیشتر است، نسبت به محاسبه میزان تأثیر این اقدامات در افت ولتاژ جبران شده می‌کند. قابل ذکر است که عامل باسی که دارای بیشترین نیاز در شبکه قدرت بوده است، بدون اینکه تخمینی از تأثیر عمل‌های دیگر باس‌ها داشته باشد اقدام به انجام عمل‌های خود می‌کند. عامل‌های باسی که دارای اولویت دوم و بعدی هستند نسبت به محاسبه میزان ولتاژ تأمین شده توسط دیگر باس‌ها اقدام می‌کنند که نحوه محاسبه آن در رابطه (۳) آمده است.

$$\Delta Need_k = \sum_{i: BA} \sum_{j \in J_i} S_{kj} U_j \quad (i: BA \text{ if } P_i > P_k) \quad (j \in J_i) \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $P_i$  نشان دهنده اولویت عامل باس نام است و  $P_k$  نشان دهنده اولویت عامل باس نام،  $J_i$  مجموعه ابزارهای کنترلی است که

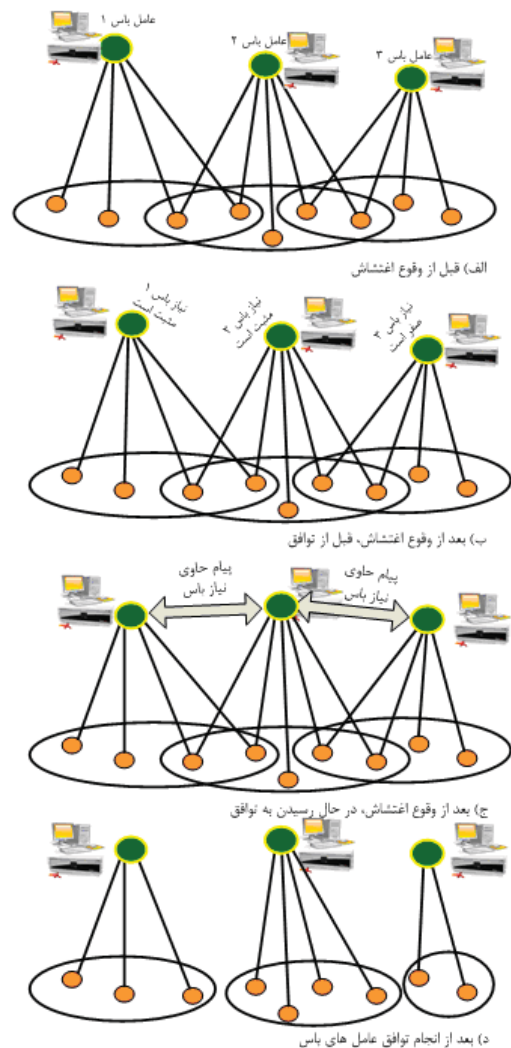
در پست های ۴۰۷۱ و ۴۰۱۲ نصب شده اند و همچنین این شبکه دارای ۳۷ ترانسفورمر است که همگی آن ها مجهز به تپ چنجر هستند. از این تعداد ترانسفورمر، ۲۰ مورد آن ها ترانسفورمرهای ژنراتوری و ۱۷ مورد نیز ترانسفورمرهای انتقال هستند که وظیفه تغییر سطح ولتاژ را در شبکه به عهده دارند (دو جفت از ترانسفورمرهای انتقال به صورت موازی هستند). همان طور که از شکل (۵) برمی آید، شبکه نمونه دارای ۴۱ باس انتقال و ۲۰ باس ژنراتوری است که فرض شده است در همه باس های غیر ژنراتوری، دستگاه PMU نصب شده است. به این ترتیب ۴۱ دستگاه PMU در این شبکه قدرت نصب شده اند تا رؤیت پذیری سامانه قدرت را به همراه داشته باشند. تعداد ژنراتورهای نصب شده در این شبکه برابر با ۲۰ است که یکی از آن ها (ژنراتور  $G_{13}$ ) به عنوان کندانسور سنکرون عمل می کند.

به منظور اثبات کارایی استفاده از تئوری سامانه های چند عاملی در کنترل ولتاژ شبکه قدرت چندین اغتشاش به شبکه نمونه اعمال شده است و نتایج حاصل از به کارگیری روش کنترل ولتاژ مبتنی بر سامانه های چند عاملی با نتایج حاصل از کنترل توزیع شده بدون ناظر در شبکه قدرت که به صورت سنتی انجام می پذیرد، مقایسه شده است. علاوه بر این یک سامانه کنترل مرکزی نیز برای کنترل ولتاژ در نظر گرفته شده است که در آن اطلاعات همه شینه های شبکه به یک کنترل کننده مرکزی انتقال یافته و در آن نقطه نسبت به کنترل ولتاژ همه شینه های شبکه قدرت اقدام می کند. نتایج حاصل از به کارگیری کنترل کننده مرکزی نیز با نتایج حاصل از روش مبتنی بر سامانه های چند عاملی مقایسه شده است.



شکل ۵. شبکه قدرت نمونه ۳۲ شینه [۱۵]

عامل های باس و ابزارهای کنترلی و نحوه آرایش آن ها را به صورت شکل (۴) نشان داد.



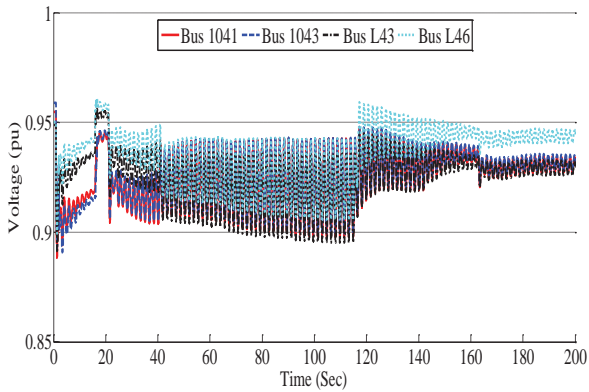
شکل ۴. فرایند حصول هماهنگی بین گروه های عاملی و تغییر آرایش در ساختار مبتنی بر سامانه چند عاملی به منظور وفقی شدن آن ها با وضعیت شبکه

### ۳. نتایج و بحث

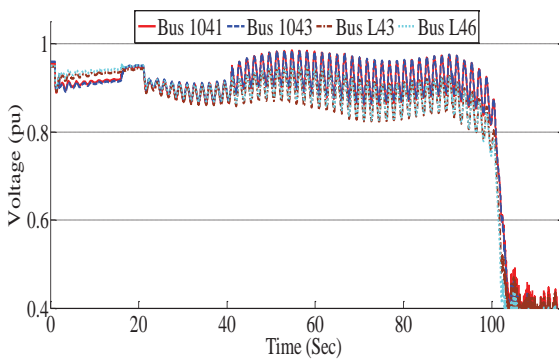
شبکه نمونه ای که برای پیاده سازی ساختار مبتنی بر سامانه چند عاملی انتخاب شده است شبکه نمونه ۳۲ شینه می باشد. این شبکه دارای اندازه مناسب و قابلیت انجام تحلیل به صورت دینامیکی است (با توجه به در دسترس بودن اطلاعات دینامیکی شبکه) و بنابراین برای اجرای ساختار سامانه چند عاملی و بررسی نتایج آن مناسب است.

شبکه نمونه که در شکل (۵) نشان داده شده است با توجه به [۱۵] و در نرم افزار DIGSILENT ترسیم و پیاده سازی شده گویای وضعیت گذراهای دینامیکی شبکه قدرت است. این شبکه در سطح انتقال دارای سه سطح ولتاژ ۴۰۰، ۲۲۰ و ۱۳۰ کیلوولت است. این شبکه در ۹ پست دارای بانک های خازنی است، ۲ بانک راکتوری نیز

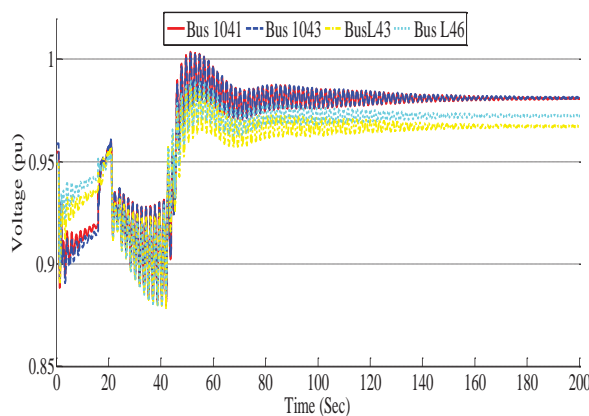
توجه میزان تأثیرگذاری هر یک از ابزارهای کنترلی در جبران افت ولتاژ و همچنین نوع ابزار کنترلی انتخاب شده است.



شکل ۶. نتایج ولتاژی شینه‌های مختلف حاصل از به‌کارگیری کنترلی توزیع شده و بدون ناظر در شبکه قدرت پس از وقوع اغتشاش در شبکه قدرت



شکل ۷. نتایج حاصل از به‌کارگیری ساختار کنترلی متمرکز (سلسله مراتبی) در شبکه قدرت برای کنترل ولتاژ شینه‌های مختلف پس از بروز اغتشاش



شکل ۸. نتایج ولتاژ حاصل از به‌کارگیری تئوری سامانه‌های چند عاملی در کنترل ولتاژ شبکه قدرت در شینه‌های مختلف پس از وقوع اغتشاش

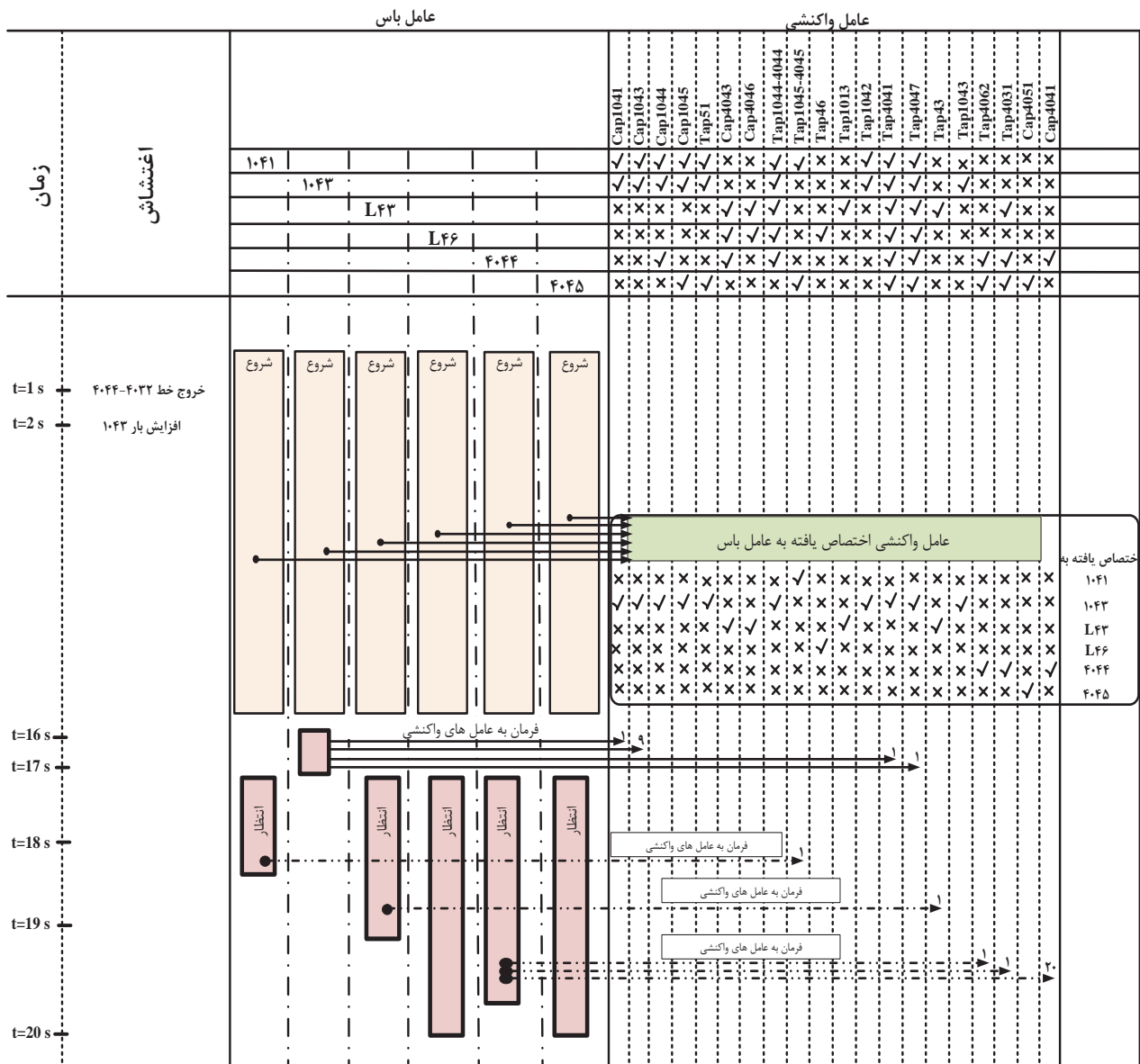
شکل (۶) نشان دهنده نتایج حاصل از به‌کار گرفتن کنترل توزیع شده و بدون ناظر در شبکه قدرت در قبال وقوع اغتشاش خروج خط واصل باس‌های ۴۰۳۲ و ۴۰۴۴ در لحظه  $t=1$  به همراه افزایش ناگهانی بار در لحظه  $t=2$  در باس ۱۰۴۳ (۱۵٪ افزایش توان حقیقی و ۳۰٪ افزایش توان راکتیو) است. همان‌طور که از نتایج ولتاژ مشخص است، سازمان و ساختار کنترلی قادر نبوده ولتاژ شینه‌های شبکه قدرت را کنترل کند. بنابراین کنترل ولتاژ به روش بدون ناظر جدای از اینکه سطح ولتاژ را کمتر از مقدار نامی نگه داشته است منجر به وقوع ناپایداری نوسانی نیز شده که موقعیت بسیار خطرناکی برای شبکه قدرت است و هر لحظه منجر به ناپایداری و وقوع خاموشی سراسری می‌شود.

به‌ازای وقوع اغتشاش اشاره شده در بالا و استفاده از ساختار کنترلی متمرکز، نتایج کنترل ولتاژ به صورت شکل (۷) خواهند بود. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص شده است کنترل متمرکز ولتاژ نیز نه تنها قادر به کنترل و بازگرداندن ولتاژ به حالت عادی نبوده بلکه منجر به فروپاشی ولتاژ در شبکه قدرت شده است. به عبارت دیگر استفاده از ساختار کنترلی متمرکز در شبکه قدرت به‌ازای وقوع اغتشاشات یاد شده منجر به ایجاد خاموشی سراسری در شبکه قدرت شده است.

در ادامه از ساختار مبتنی بر تئوری سامانه‌های چند عاملی استفاده شده که در آن از طرح پیشنهاد شده برای کنترل ولتاژ استفاده شده است. نتایج حاصل از آن نیز در شکل (۸) نمایش داده شده است.

شکل (۸) نشان دهنده ولتاژ برخی از شینه‌های شبکه قدرت نمونه می‌باشد که در آن ولتاژ شبکه در قبال بروز اغتشاش به حالت عادی برگردانده شده است. به منظور واضح‌تر شدن نحوه عملکرد ساختار کنترلی مبتنی بر سامانه‌های چند عاملی، دیاگرام زمانی برقراری مذاکره در شکل (۹) نشان داده شده است که در آن تعدادی از عامل‌های باس (شینه‌های شبکه قدرت) که دچار افت ولتاژ شده‌اند، نشان داده شده‌اند و هر کدام از آن‌ها در یک رویه دینامیکی و زمانی نسبت به رد و بدل کردن عامل‌های واکنشی و کنترل ولتاژ شینه خود اقدام کرده‌اند.

همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است، عامل‌های باس ۱۰۴۱، ۱۰۴۳، ۴۰۴۴، ۴۰۴۵، ۴۳ و L۴۶ در شبکه قدرت و در اثر اغتشاش اشاره شده در قسمت‌های قبلی و نگاشته شده در شکل (۹)، دچار افت ولتاژ شده‌اند. پس از وقوع افت ولتاژ در شبکه قدرت توسط عامل‌های باس هر عامل باسی که دچار افت ولتاژ شده است، بر اساس الگوریتم توضیح داده شده در قسمت‌های قبلی نسبت به رفع افت ولتاژ خود اقدام می‌کند. همان‌طور که در شکل نیز نشان داده شده است، تعداد و زمان انجام اقدامات اصلاحی در شبکه قدرت با



شکل ۹. دیاگرام زمانی عملکرد ساختار کنترلی مبتنی بر سامانه چند عاملی و اقدامات اصلاحی انتخاب شده برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ در شبکه نمونه

#### ۴. نتیجه گیری

ساختار بدون ناظر نیز ناپایداری نوسانی را به ارمغان آورده است. در حالی که ساختار مبتنی بر سامانه چندعاملی به خوبی توانسته است شبکه قدرت را از حالت ناپایداری خارج نماید و آن را به حالت طبیعی بهره برداری برگرداند.

این مقاله در ابتدا عامل و سامانه‌های چند عاملی که شاخه‌ای از هوش مصنوعی توزیع شده است را بررسی کرده و بر اساس مفاهیم مطرح شده در سامانه‌های چند عاملی الگوریتمی را ارائه داده است که بر اساس آن بتوان از بروز ناپایداری در شبکه قدرت به هنگام بروز اغتشاش ممانعت به عمل آورد. نتایج شبیه‌سازی که در نرم‌افزار DIGSILENT انجام شده است، نشان داد که عملکرد طرح پیشنهاد شده بر اساس سامانه‌های چند عاملی پاسخ به مراتب بهتری نسبت به کنترل توزیع شده بدون ناظر و همچنین کنترل مرکزی (سلسله مراتبی) دارد. به عبارت دیگر در ساختار مبتنی بر سامانه چند عاملی و با توجه به قابلیت هماهنگ شدن عامل‌ها در این ساختار، قدرت سازمان مبتنی بر سامانه چند عاملی به مراتب بهتر از ساختار سلسله مراتبی است به گونه‌ای که در ازای وقوع یک اغتشاش مشخص در شبکه، ساختار سلسله مراتبی منجر به فروپاشی شبکه شده است و

#### ۵. مراجع

- [1] Gandomkar, M.; Dadfar, S.; Ezati, S. M. "Passive Defence Principles and its Application in Electrical Industry Employed for Strategic Management"; 14<sup>th</sup> Iranian Electrical Students Conf. 2012.
- [2] Wooldridge, M. "An Introduction to Multiagent Systems"; John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
- [3] McArthur, S. D. J.; Davidson, E. M.; Catterson, V. M.; Dimeas, A. L.; Hatziargyriou, N. D.; Ponci, F.; Funabashi, T. "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges"; IEEE Trans. Power Sys. 2007, 22, 1743-1752.
- [4] Stuart, R.; Peter, N. "Artificial Intelligence a Modern Approach"; 2nd Ed., Prentice Hall, 2003.



- [11] Wang, H. F. "Multi-Agent Co-Ordination for the Secondary Voltage Control in Power-System Contingencies"; IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution 2001, 148, 61-66.
- [12] Ramchurn, S.; Vytelingum, P.; Rogers, A.; Jennings, N. R. "Putting the Smarts into the Smart Grid: A Grand Challenge for Artificial Intelligence"; Commun. ACM 2012, 55, 86-97.
- [13] Hernandez, L.; Baladron, C.; Aguiar, J. M.; Carro, B.; Sanchez-Esguevillas, A.; Lloret, J.; Chinarro, D.; Gomez-Sanz, J. J.; Cook, D. "A Multi-Agent System Architecture for Smart Grid Management and Forecasting of Energy Demand in Virtual Power Plants"; IEEE Commun. Mag. 2013, 51, 106-113.
- [14] Yao, C.; Jinhu, L.; Xinghuo, Y.; Hill, D. J. "Multi-Agent Systems with Dynamical Topologies: Consensus and Applications"; IEEE Circuits Syst. Mag. 2013, 13, 21-34.
- [15] Kennet, W. "Nordic32-A Cigre Test System for Simulation of Transient Stability and Long-Term Dynamics"; Svenska Kraftnat, Sweden, 1994.
- [5] Bryan, H.; Victor, L. "A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms"; Knowl. Eng. Rev. 2005, 19, 281-316.
- [6] "C37.118-2005, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems"; IEEE Power Eng. Soc. 2006, 1-57.
- [7] Adamiak, M. G.; Novosel, D.; Kasztenny, B.; Madani, V.; Sykes, J.; Phadke, A. G. "Wide Area Protection and Control-Today and Tomorrow"; IEEE PES- Transmission and Distribution Conf. and Exhibition, 2005/2006, pp.1,7.
- [8] Terzija, V.; Valverde, G.; Deyu, C.; Regulski, P.; Madani, V.; Fitch, J.; Skok, S.; Begovic, M. M.; Phadke, A. "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks"; Proc. of the IEEE 2011, 99, 80-93.
- [9] Nagata, T.; Nakachi, Y.; Hatano, R. "A Multi-Agent Cooperative Voltage and Reactive Power Control"; IEEJ Trans. PE 2008, 128, 1313-1319.
- [10] Xiaoyang, T.; Xiaoru, W.; Jun T. "The Cooperative Modeling of Wide-Area Protection Multi-Agent Based on Organization"; Int. Conf. on Power System Tech. 2006.