

ارائه روشی نوین جهت تخمین حالت دینامیکی شبکه توزیع صنعتی با استفاده از اندازه‌گیری‌های محدود

رضا غنی‌آبادی^۱ شهرام منتصر کوهساری^۲ ایرج پورکیوانی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

r.ghaniabadi@aut.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

smk@tomcad.com

۳- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

ir-poorkeyvany@aut.ac.ir

چکیده: تاکنون تخمین حالت در شبکه‌های توزیع نسبت به شبکه انتقال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در سیستم توزیع بر خلاف شبکه انتقال دستگاه‌های اندازه‌گیری در بخش‌های مختلف شبکه وجود ندارد. بنابراین روش‌های ارائه شده که نیاز به تعداد بالای اندازه‌گیری در شبکه دارند را نمی‌توان در سیستم‌های توزیع مورد استفاده قرار داد. همچنین به دلیل وجود بارهای دینامیکی و وقوع تغییرات ناگهانی در شبکه‌های صنعتی چالش‌های بزرگی در تخمین حالت به وجود می‌آید. در این مقاله روشی ارائه شده است که با کمک اندازه‌گیری‌های محدود بتوان حالت شبکه توزیع صنعتی را تخمین زد. برای این منظور حالات مختلف عملکرد بارهای پایین دست فیدرهایی که دستگاه اندازه‌گیری بر روی آن‌ها قرار گرفته است در دسترس تخمین‌گر قرار گرفته و به کمک مقادیر اندازه‌گیری دریافتی، حالت شبکه مشخص می‌شود. روش پیشنهادی در آزمایشگاه آنالیز سیستم‌های قدرت در دانشگاه صنعتی امیرکبیر با اتصال دو رایانه به یکدیگر به صورت سخت‌افزاری و در محیط نرم‌افزار شبیه‌ساز زمان-واقعی POUYA به صورت نرم‌افزاری پیاده شده و بر روی شبکه توزیع یک پالایشگاه شیمیایی تست شده است. یکی از رایانه‌ها در نقش سیستم اسکادای سیستم قدرت واقعی است و رایانه دیگر در نقش مدل شبیه‌ساز (تخمین‌گر دینامیکی) عمل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تخمین حالت دینامیکی شبکه‌های توزیع صنعتی، تخمین حالت با اندازه‌گیری محدود، دنبال کردن حالت سیستم، تخمین حالت زمان-واقعی

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.331

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۴/۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

نام نویسنده مسئول: دکتر شهرام منتصر کوهساری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان حافظ - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه صنعتی امیر کبیر - دانشکده برق

۱- مقدمه

شبیه‌سازی یکی از اساس‌ترین ابزارها در مطالعات شبکه‌های برق‌رسانی محسوب می‌شود. بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها، برنامه‌ریزی‌ها و مطالعات شبکه‌های برق‌رسانی از جمله مطالعات پایداری، ارزیابی قابلیت اطمینان، برنامه‌ریزی سیستم‌های مدیریت انرژی و ... بر مبنای نتایج شبیه‌سازی استوار است [۱]. بنابراین اطلاع از حالت صحیح شبکه برق‌رسانی در سیستم شبیه‌ساز با توجه به گستردگی و پیچیدگی‌های شبکه‌های امروزی امری ضروری به نظر می‌رسد. تصمیم‌گیری‌ها و اقدامات کنترلی در شبکه نیز با توجه به شرایط شبکه و حالت آن انجام می‌گیرد. بنابراین قبل از هرگونه مطالعه یا عمل کنترلی بر روی شبکه، باید به کمک اندازه‌گیری‌ها یک تخمین قابل قبول از حالت آن به دست آورد. منظور از حالت شبکه یعنی متغیرهای حالتی که با معلوم بودن مقادیر آن‌ها، مقادیر سایر پارامترهای شبکه نیز به دست آید. برای مثال می‌توان متغیرهای حالت را به صورت جبری شامل متغیرهای ولتاژ و زاویه باس‌های شبکه و یا به صورت دینامیکی شامل متغیرهای حالت مربوط به ماشین در نظر گرفت [۲].

در شبکه‌های توزیع به خصوص شبکه‌های صنعتی با توجه به کمبود تعداد اندازه‌گیری [۳]، تغییرات ناگهانی بار و حضور بارهای دینامیکی پروسه تخمین حالت با چالش‌های بیشتری روبه‌رو است. تعاملات پیچیده در شبکه‌های توزیع، منابع تولید پراکنده، عدم یکپارچگی سمت مصرف، تغییر پروفیل بار و پیکربندی شبکه از عوامل پیچیدگی تخمین در این سطح هستند. تخمین حالت در شبکه توزیع به طور عمده به روش حداقل مربعات خطا و به طور استاتیک انجام شده است. برخی روش‌های تخمین حالت استاتیک دیگر نیز بر مبنای مدل بار و اندازه‌گیری‌ها انجام شده و به کمک روش‌هایی مانند پخش بار سعی بر تنظیم پارامترهای شبکه بر روی مقادیر اندازه‌گیری شده دارند [۴]. برخی مراجع به تخمین حالت دینامیکی شبکه پرداخته‌اند [۵]. روش‌های تخمین حالت دینامیک بیشتر به کمک فیلتر کالمن انجام می‌شوند و برخی از آنها در شبکه توزیع نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۶]. الگوریتم‌های مختلفی برای تخمین حالت شبکه توزیع وابسته به نوع اندازه‌گیرها و اینکه چطور در مدل تخمین‌گر مورد استفاده قرار می‌گیرند توسعه یافته‌اند.

در حال حاضر به علت عدم مشاهده‌پذیری شبکه برق‌رسانی در سطوح پایین‌تر [۷] تعداد کمی از شرکت‌های مدیریت شبکه توزیع در این زمینه فعالیت کرده [۶] و تعدادی از مقالات مانند [۸] به این مسأله اشاره داشته‌اند. این در حالی است که با توجه به نکات مطرح شده، بررسی و در نهایت پیاده‌سازی مسأله تخمین حالت جهت مدیریت شبکه‌های توزیع ضروری است. مشارکت اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی^۱ و مقادیر تخمین زده شده می‌توانند برای تأیید نتایج تخمین کافی باشند. تخمین حالت در سیستم قدرت به عنوان یک مسأله حداقل مربعات وزن‌دار (WLS)^۲ توسط Schweppe در مقالات

دهه ۷۰ معرفی گردید. روش مذکور مهم‌ترین و پرکاربردترین روشی است که در جهت تخمین حالت استاتیک شبکه قدرت به کار گرفته شده است [۹-۱۱]. با توجه به وجود تجهیزاتی مانند ژنراتورها و کنترلرهای آن‌ها، موتورهای القائی و بارهای جدید مانند خودروهای برقی، تخمین حالت استاتیک نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای شبکه‌های امروزی در این زمینه باشد. با توجه به این نکته مسأله تخمین حالت دینامیک مطرح شده است.

در سال ۱۹۷۴، Debs تئوری تخمین حالت دینامیکی بر پایه فیلتر کالمن را ارائه نمود [۱۲]. به علاوه مطالعاتی بر پایه هوش مصنوعی نظیر شبکه‌های عصبی [۱۳-۱۴] و منطق فازی [۱۵-۱۶] برای تخمین حالت دینامیکی شبکه انجام شده است. در نتیجه غیرخطی بودن معادلات اندازه‌گیری، خطی‌سازی و محاسبه ماتریس ژاکوبین در روش‌های موجود در تخمین حالت ضروری به نظر می‌رسد. برای حل این مشکل در بعضی از مقالات، روش فیلتر کالمن بدون تأثیر^۳ (UKF) توصیه شده است که نیازی به خطی‌سازی معادلات ندارد [۱۷]. در مرجع [۱۸] از فیلتر ذره‌ای^۴ (PF) جهت تخمین حالت دینامیکی سیستم استفاده شده و مشکل غیرگوسی بودن نویز را حل کرده است. اما باید دقت شود که روش فیلتر ذره‌ای اگرچه دینامیک است و می‌تواند در شرایط گوسی و غیرگوسی بودن نویز نیز عملکرد قابل ملاحظه‌ای از خود به جا بگذارد اما بار محاسباتی این روش به شدت بالاست و امکان پیاده‌سازی آن در کاربردهای آنلاین^۵ وجود ندارد. مسأله دیگری که در هر دو روش فیلتر کالمن بیان شده وجود دارد، آن است که باید میانگین و کواریانس نویز مشخص باشند و از آنجایی که نویز یک فرآیند تصادفی^۶ است، در سیستم‌های عملی مدل‌سازی نویز اگر غیرممکن نباشد، کار بسیار پیچیده‌ای است [۱۸].

اگر بخواهیم یک جمع‌بندی راجع به مطالعات تخمین حالت دینامیک داشته باشیم باید گفت که در تمام مطالعات قبلی تنها از معادلات مربوط به ژنراتور سنکرون در قالب فیلتر کالمن استفاده شده است [۱۹]. در واقع در اکثر مطالعات، تخمین حالت فقط روی باس‌های ژنراتوری انجام گرفته و دینامیک شبکه در قالب باس‌های ژنراتوری مطالعه می‌شود. این در حالی است که اولاً در شبکه‌های توزیع سنتی ژنراتور سنکرون وجود ندارد. به علاوه باید به دنبال روشی بود که بتوان حالت دقیق شبکه توزیع را با در نظرگیری دینامیک تمام اجزا دید. همچنین باید به دنبال روش‌هایی بود که در صورت وجود اندازه‌گیری‌های محدود نیز بتواند وضعیت شبکه را به درستی مشخص نماید. به علاوه کاهش هزینه‌های مربوط به پیاده‌سازی سیستم‌های نظارتی شبکه توزیع، کاهش هزینه‌های مربوط به نصب اندازه‌گیری در بخش‌های مختلف شبکه [۶] و تخمین حالت همزمان متغیرهای حالت جبری و دینامیکی شبکه [۲] از جمله ضرورت‌هایی است که بایستی جهت کنترل و بهره‌برداری مناسب در شبکه توزیع به آن پرداخته شود. با توجه به این نکات در این مطالعه روشی ارائه شده است که به کمک آن بتوان تخمین حالت دینامیکی شبکه توزیع صنعتی را با

صحیح بوده و به عبارتی دیگر عدم قطعیت مقادیر ارسالی در نظر گرفته نشده است. یک دستگاه رایانه دیگر نیز به عنوان شبیه ساز زمان-واقعی جهت تخمین حالت دینامیکی شبکه توزیع به کار گرفته می شود که در حقیقت دریافت کننده اطلاعات اندازه گیری از شبکه است. لازم به ذکر است که فرآیند ذکر شده به صورت سخت افزاری و نرم افزاری در آزمایشگاه آنالیز سیستم های قدرت واقع در دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است.

۲-۲- الگوریتم نزدیک ترین همسایگی

الگوریتم نزدیک ترین همسایگی یکی از پرکاربردترین الگوریتم های دسته بندی است که استفاده گسترده ای در کاربردهای علوم مختلف دارد [۲۱]. این الگوریتم به دنبال نقاط مشابه برای هر نقطه در فضای نمونه مشابه می گردد. یکی از ویژگی های این الگوریتم که در بعضی مسائل می تواند به عنوان یک مشکل تلقی گردد عبارت است از تأثیر یکسان همه ویژگی ها در محاسبه فاصله داده های جدید با همسایه های یک داده خاص، در حالیکه ممکن است برخی از این ویژگی ها برای عمل دسته بندی کم اهمیت تر باشند. در این پژوهش برای تمام ویژگی ها وزن یکسانی در نظر گرفته شده است. در این روش دسته بندی اگر هر نقطه دارای n ویژگی باشد، آنگاه آنها را به صورت یک بردار در فضای n بعدی در نظر می گیریم و بر حسب نزدیکی ویژگی ها نزدیکترین همسایه ها را جست و جو می کنیم. برای این منظور از فاصله اقلیدسی استفاده می شود. فاصله دو نقطه P و Q اندازه پاره خطی است که آنها را به هم متصل می کند. برای نمونه این دو نقطه را در فضای اقلیدسی n بعدی به صورت رابطه (۱) در نظر می گیریم:

$$P = (P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (1)$$

$$Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$$

در نتیجه فاصله بین آنها در مختصات دکارتی به صورت رابطه (۲) خواهد بود:

$$d(P, Q) = \sqrt{(P_1 - Q_1)^2 + (P_2 - Q_2)^2 + \dots + (P_n - Q_n)^2} \quad (2)$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}$$

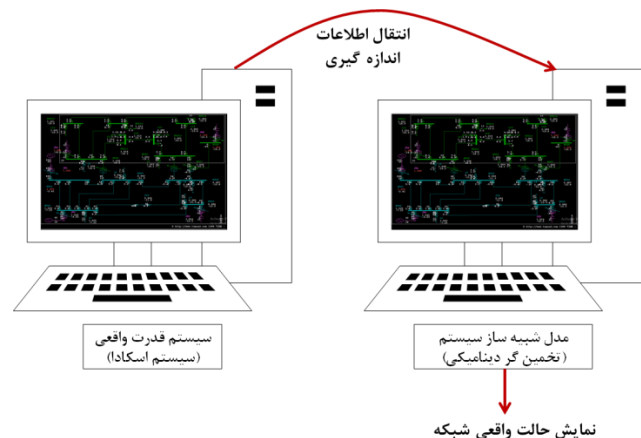
در ادامه K نمونه از نمونه های یادگیری که کمترین فاصله را با نمونه جدید دارند به عنوان همسایه انتخاب می شوند. تعیین مقدار K در الگوریتم نزدیک ترین همسایگی مهم ترین فاکتور تأثیرگذار بر روی نتیجه دسته بندی است که با تغییر آن ممکن است پاسخ مسأله تغییر کند.

داشتن اندازه گیری محدود حتی اندازه گیری های مربوط به یک فیدر مشخص نمود. علاوه بر این در این مطالعه دینامیک تمامی اجزای شبکه در نظر گرفته شده و نیازی به قرارگیری اندازه گیری فقط بر روی باس های ژنراتوری مشابه روش های کالمن مرسوم نیست. همچنین روش پیشنهادی می تواند به عنوان جایگزین سیستم های کنترل توزیع شده (DCS) مرسوم که دارای هزینه های پیاده سازی و بهره برداری بالایی هستند در آینده مطرح گردد. در این مقاله در بخش دوم الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای این منظور ابتدا بستر پیاده سازی این الگوریتم معرفی شده و پس از آن الگوریتم نزدیک ترین همسایگی معرفی می شود. در ادامه روش پیشنهادی به کمک این الگوریتم تشریح می گردد. در بخش سوم نتایج شبیه سازی به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است و در انتها نیز نتیجه گیری و جمع بندی این پژوهش ارائه شده است.

۲- الگوریتم پیشنهادی

۲-۱- معرفی بستر پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی

استفاده از بسته های نرم افزاری شبیه ساز شبکه قدرت برای مطالعه رفتار آن در شرایط مختلف اجتناب ناپذیر است. تا جایی که می توان گفت تصمیم گیری در مطالعات بهره برداری و برنامه ریزی بر مبنای نتایج شبیه سازی استوار است [۱]. خوشبختانه با توجه به قرار گرفتن قابلیت استاد-دانشجو در نرم افزار زمان-واقعی POUYA^۸ امکان ارتباط گفتاری و نوشتاری بین دو یا چند رایانه مجهز به این نرم افزار فراهم شده است [۲۰]. با توجه به این قابلیت مطابق با شکل (۱) جهت بازسازی فرآیند تخمین حالت از دو رایانه مجهز به نرم افزار POUYA استفاده می شود.



شکل (۱): بازسازی روش پیشنهادی به کمک دو رایانه متصل به هم
رایانه اول شبکه صنعتی مورد نظر را به صورت زمان-واقعی شبیه سازی می کند. برخی از خروجی های حاصل از شبیه سازی شبکه در این رایانه به عنوان مقادیر اندازه گیری شبکه واقعی در نظر گرفته می شوند. به علاوه در این پژوهش فرض می شود که اندازه گیری ها کاملاً

۲-۳- روش پیشنهادی به کمک الگوریتم کمترین

همسایگی

در این قسمت هدف آن است که با توجه به الگوریتم کمترین همسایگی^۹ روشی پیشنهاد گردد که حالت شبکه با بروز تغییر مشخص شود. این تغییر از نوع تغییرات بار در شبکه صنعتی در نظر گرفته می‌شود. تغییرات بار می‌تواند شامل خروج و یا ورود بار و یا تغییر نقطه کار آن باشد. الگوریتم پیشنهادی که وضعیت بارها را در طول تغییر اندازه‌گیری مشخص می‌کند، روندی مشابه الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی دارد. با این تفاوت که در الگوریتم یاد شده به تعیین مقدار K نیاز است، به علاوه شعاع دایره‌ای که نمونه‌های منتخب داخل آن قرار می‌گیرند نیز وابسته به میزان تغییرات اندازه‌گیری متغیر است. این درحالی است که در روش پیشنهادی سعی بر این است که با در نظر گرفتن یک شعاع ثابت وابسته به میزان تغییرات اندازه‌گیری حول نمونه مورد نظر، نمونه‌هایی که در نزدیکی آن قرار می‌گیرند، انتخاب گردند. اندازه‌گیری‌های ارسالی از رایانه اول می‌توانند توان‌های اکتیو و راکتیو ورودی به کل شبکه توزیع و یا توان‌های ورودی به بخشی از آن باشند. با این توضیح داده‌هایی که به عنوان اندازه‌گیری ارسال می‌شوند دارای دو خصیصه هستند، یکی از خصیصه‌ها توان اکتیو و دیگری توان راکتیو است. فرضیات روش پیشنهادی عبارت است از:

(۱) فرض می‌کنیم که مدل امپدانسی تجهیزات و در واقع ماتریس

ادمیتانس شبکه در اختیار است.

(۲) تمام پارامترهای دینامیکی سیستم، از جمله کنترلرهای شبکه، AVR ها، گاورنرها و ... در دسترس هستند و در اختیار رایانه دوم، یعنی سیستم شبیه‌ساز نیز قرار داده می‌شوند.

(۳) پارامترهای استاتیکی و دینامیکی شبکه مقادیر درست دارند. همچنین نویز، اندازه‌گیری نادرست و خطاهای پارامتری وجود ندارند.

(۴) جدولی از توان مصرفی بارهای داخل شبکه در دسترس است. به عبارت دقیق‌تر نقاط کاری تجهیزات شبکه مشخص می‌باشد.

(۵) تنها اندازه‌گیری‌های مربوط به روی فیدرهای ورودی شبکه توزیع وجود دارند.

(۶) طبق نظریه مارکوف در علم قابلیت اطمینان گام زمانی به حدی کوچک (0.04s) انتخاب می‌شود که در طول این مدت تنها یک حادثه اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال تنها یک موتور خارج می‌شود و یا مقدار یک بار تغییر می‌کند.

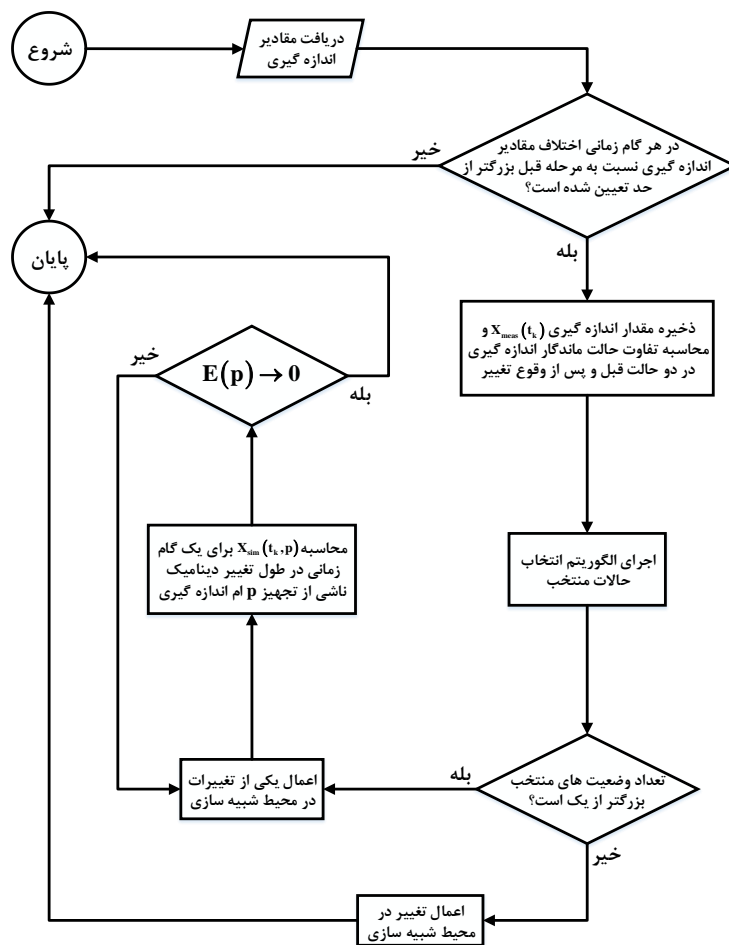
(۷) حالت شبکه قبل از تغییر اندازه‌گیری‌ها در حالت فعلی در دسترس است. به این معنی که حالت شبکه مشخص است و

می‌خواهیم با توجه به اندازه‌گیری در گام زمانی بعدی حالت جدید شبکه توزیع را تخمین بزنیم.

با توجه به این فرضیات به عنوان مثال اگر تجهیزاتی خارج یا وارد شبکه گردد یا مقدار توان آن تغییر کند، مقدار اندازه‌گیری شده در مرحله جدید نسبت به مرحله قبل تغییر می‌کند و با توجه به میزان تغییر، پس از پایدار شدن مقدار اندازه‌گیری می‌توان با الگوریتم بیان شده نزدیک‌ترین همسایه‌ها را در دستگاه مختصات دو بعدی شامل توان اکتیو در محور افقی و توان راکتیو در محور عمودی مشخص نمود. به کمک روش ارائه شده، از میان حالات مختلف، هر یک از آن‌ها که بهترین و نزدیک‌ترین پاسخ را به اندازه‌گیری در شبیه‌سازی گذرا ارائه می‌کند به عنوان حالت شبکه انتخاب می‌گردد. به علت وجود حالت‌های مختلف کاندید به دست آمده از مقادیر اندازه‌گیری، بین خروجی‌های اندازه‌گیری و حالت‌های اعمال شده در مدل تخمین‌گر، عدم تطابق‌هایی وجود خواهد داشت. بنابراین هدف آن است که قدر مطلق این خطا را به حداقل برسانیم. یکی از ابزارهای قابل استفاده، روش حداقل مربعات است تا به کمک آن بتوان حالتی را که پاسخ شبیه‌سازی گذرای آن نزدیک‌ترین پاسخ به مقادیر اندازه‌گیری است را انتخاب نمود. با این توضیحات به منظور مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و حالت‌های کاندید در هر گام الگوریتم حداقل مربعات خطا به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$E(p) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{\text{measurement}}(t_k) - x_{\text{simulation}}(t_k, p))^2} \quad (3)$$

که در آن $E(p)$ تابع خطای پارامتر در وضعیت p ، $x_{\text{measurement}}(t_k)$ داده اندازه‌گیری در زمان t_k و $x_{\text{simulation}}(t_k, p)$ داده شبیه‌سازی شده در حالت p در زمان t_k و N تعداد نمونه‌های سیستم هستند. علت اینکه به جای مجموع ساده خطاها از مجموع مربعات آن‌ها استفاده می‌شود آن است که می‌خواهیم نه تنها انحرافات مثبت و منفی خنثی نشوند، بلکه انحرافات بزرگ نسبت به انحرافات کوچک‌تر از اهمیت بیشتری برخوردار گردند. در ادامه حالتی از شبکه صنعتی که کمترین مقدار این تابع هدف را به وجود بیاورد انتخاب می‌گردد. در نهایت با پاسخ به دست آمده به کمک مطالعات حالت ماندگار و شبیه‌سازی گذرا، تغییر در وضعیت تجهیز مورد نظر در حین شبیه‌سازی اعمال می‌شود و با حل معادلات شبکه توزیع به صورت گذرا در برنامه زمان-واقعی POUYA وضعیت جدید شبکه استحصال می‌گردد و تمام متغیرهای شبکه اعم از ولتاژ و زاویه باس‌بارها به طور دینامیک به دست می‌آیند و شرایط جدید شبکه در رایانه دوم که در واقع مدل تخمین‌گر شبکه توزیع است نمایش داده می‌شود. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی

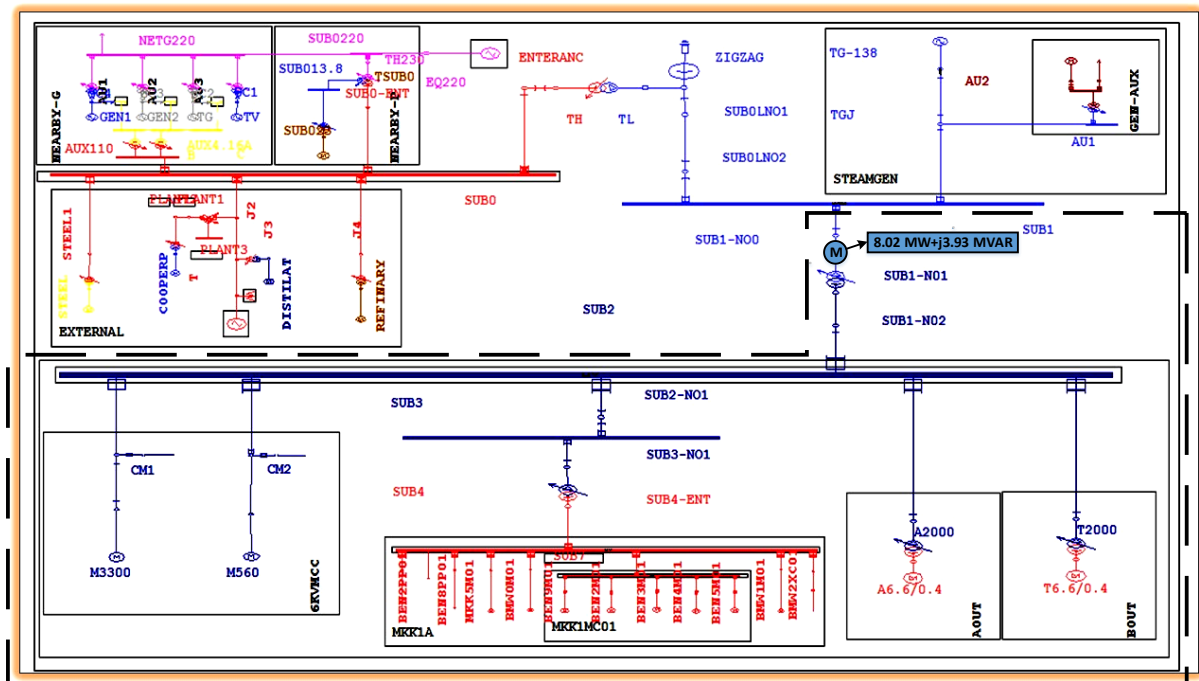
۳- نتایج شبیه سازی

در این بخش تخمین حالت دینامیکی بخشی از شبکه توزیع یک پالایشگاه شیمیایی (ناحیه داخل خط چین) که دیگرام تک خطی آن در شکل (۳) نمایش داده شده مدنظر قرار گرفته است. تنها اندازه گیر موجود در این شبکه با مقدار صحیح در نظر گرفته شده است و روی ترانسفورماتور بین دو باس بار SUB1 و SUB2 قرار دارد. این اندازه گیر توان های اکتیو و راکتیو عبوری را اندازه گیری می کند که مقدار آن برای حالت فعلی شبکه به ترتیب 8.02 MW و 3.93 MVAR است. پارامترهای دینامیکی و استاتیکی شبکه توزیع در مدل تخمین گر پیاده شده اند و رایانه دوم اندازه گیری ها را از رایانه اول که شبیه ساز شبکه واقعی است دریافت می کند. آخرین وضعیت شبکه مطابق شکل (۴) در دسترس است. حالات مختلف بارها و نقاط کاری متفاوت موتورهای که در بخش پایین دست دستگاه اندازه گیری قرار دارند، در جداول (۱)

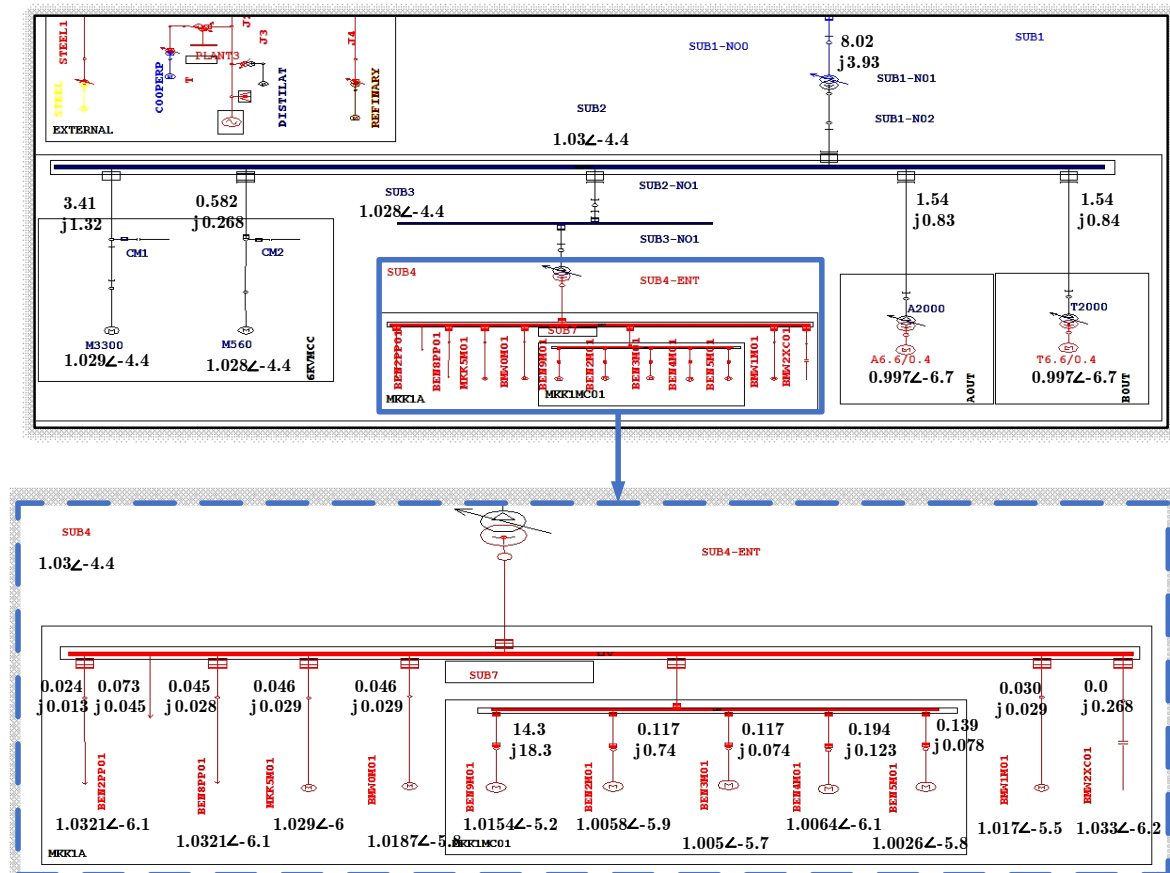
و (۲) نمایش داده شده اند. از آنجائیکه الگوریتم پیشنهادی در مرحله بهره برداری از کارخانه صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد، بنابراین فرض می شود که نقاط کاری مختلف تجهیزات و بارهای پایین دست محل اندازه گیری مشخص بوده و در دسترس تخمین گر قرار دارند. بنابراین هدف تخمین وضعیت بارها و موتورهای پایین دست محل اندازه گیری و در نتیجه وضعیت شبکه پائین دست به کمک مقدار اندازه گیری دریافتی از شبکه است. حال فرض می کنیم مقدار اندازه گیری توان های اکتیو و راکتیو در حالت ماندگار جدید به ترتیب 6.65 MW و 3.45 MVAR تغییر کند. با محاسبه اختلاف توان

$$\Delta P_{\text{meas}} = -1.37 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_{\text{meas}} = -0.48 \text{ MVAR}$$



شکل (۳): دیاگرام تک خطی شبکه توزیع پالایشگاه شیمیایی و محل قرارگیری دستگاه اندازه گیری



شکل (۴): حالت فعلی بخشی از شبکه توزیع پالایشگاه شیمیایی در رایانه دوم

جدول (۱): حالات مختلف کاری بارهای استاتیک شبکه پالایشگاه شیمیایی

بار	حالت 1		حالت 2		حالت 3	
	P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)	P (KW)	Q (KVAR)
SUB4	73	45	170	50	120	48
BEN2PP01	24.3	13.2	-	-	-	-
BEN8PP01	45.5	28.3	100	56	-	-
BMW2XC01	0.58	-267.6	-	-	-	-

جدول (۲): حالات کاری مختلف موتورهای شبکه توزیع پالایشگاه شیمیایی

نام موتور	حالت 1 (KW)	حالت 2 (KW)	حالت 3 (KW)	حالت 4 (KW)	حالت 5 (KW)	حالت 6 (KW)
M3300	3300	2000	1200	1500	800	-
M560	400	560	200	-	-	-
MKK5M01	43	-	-	-	-	-
BEN3M01	110	50	-	-	-	-
BEN4M01	185	-	-	-	-	-
BEN2M01	110	50	-	-	-	-
BEN5M01	130	-	-	-	-	-
BMW0M01	43	-	-	-	-	-
BEN9M01	17	-	-	-	-	-
BMW1M01	28	-	-	-	-	-
T6.6/0.4	1150	958.3	766.6	575	383.3	191.6
A6.6/0.4	1150	958.3	766.6	575	383.3	191.6

مطابق با این شکل پاسخ الگوریتم نشان می‌دهد که سه حالت ممکن است در شبکه اتفاق افتاده باشد تا سبب شود که توان عبوری از اندازه‌گیری روی فیدر بین دو باس بار SUB1 و SUB2 به اندازه بیان شده تغییر کند. حالت‌های ممکن به شرح زیر خواهند بود:

- (۱) تغییر توان مکانیکی موتور M3300 از 3.3 MW به 2 MW
- (۲) تغییر توان مکانیکی موتور A6.6/0.4 یا T6.6/0.4 از 1.15 MW به 0.38 MW
- (۳) تغییر توان مکانیکی موتور A6.6/0.4 یا T6.6/0.4 از 1.15 MW به 0.191 MW

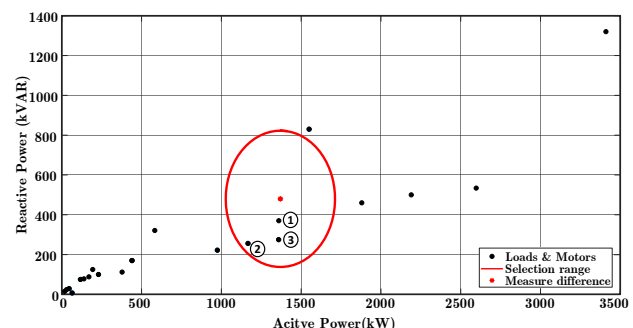
دقت شود که وضعیت فعلی شبکه مطابق شکل (۴) است و اگر هریک از حالت‌های منتخب که در شکل (۵) نمایش داده شده در شبکه فعلی اتفاق افتند، تغییراتی در مقادیر دستگاه اندازه‌گیری مطابق شکل (۶) ایجاد خواهند کرد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، هریک از این حالت‌ها، دینامیک خاص خود را در دستگاه اندازه‌گیری در پی خواهند داشت. از میان سه حالت منتخب، به منظور تشخیص حالت درست باید تغییرات ذخیره شده در حالت گذرا توسط دستگاه اندازه‌گیری را با شبیه‌سازی در هر سه حالت مورد مقایسه قرار دهیم. به کمک الگوریتم حداقل مربعات خطا می‌توان حالتی که کمترین خطا در حین عبور از حالت گذرای شبکه به وجود می‌آورد را به عنوان تغییری که در شرایط سیستم حاصل شده است در نظر گرفت. مقدار تابع خطای بیان شده در هر سه وضعیت کاندید در طول تغییرات گذرا محاسبه شده و در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳): مقایسه حالت گذرای ایجاد شده ناشی از اعمال تغییرات منتخب در مدل شبیه‌ساز واقع در رایانه دوم

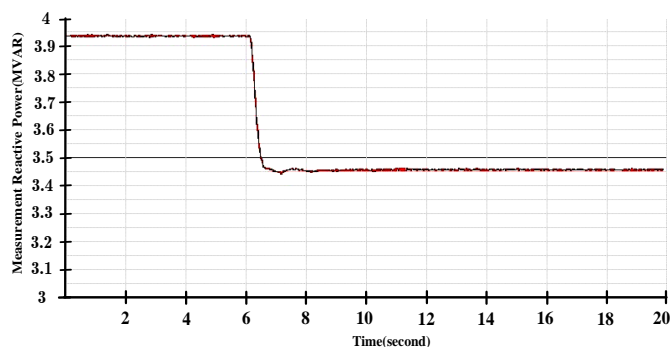
زمان (s)	تابع خطا E(p)		
	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
6.02	0.002	0.4	0.4
6.04	0.004	0.23	0.23
6.06	0.001	0.42	0.42
6.08	0.0006	0.6	0.6
6.1	0.003	0.3	0.3

مطابق با مقادیر جدول (۳) باتوجه به این که مقدار تابع خطای به دست آمده برای حالت ۱ نسبت به سایر حالات منتخب کمتر است، می‌توان تشخیص داد که وضعیت جدید شبکه شامل حالتی است که در آن توان مکانیکی موتور M3300 از 3.3 MW به 2 MW تغییر کرده است. با اعمال تغییر به دست آمده در سیستم تخمین گر، شبکه مطابق با شکل (۷) در حین شبیه‌سازی به وضعیت جدید رفته و حالت شبکه توزیع واقعی را دنبال می‌نماید.

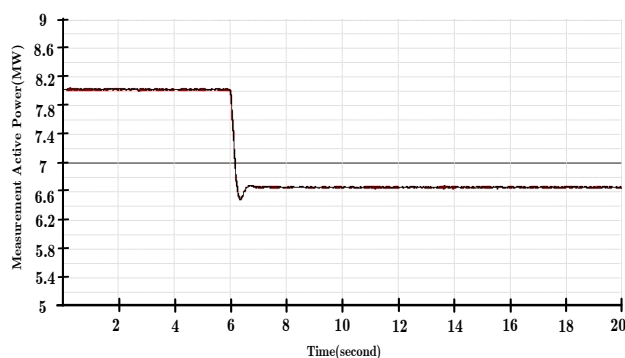
کاهش مقدار اندازه‌گیری در حالت جدید به این معنی است که بارهای شبکه یا توان موتورهای کاهش یافته‌اند و یا تجهیزاتی از شبکه خارج شده است. به منظور تشخیص حالت مورد نظر ابتدا اختلاف اندازه‌گیری به الگوریتم پیاده شده در نرم افزار شبیه‌ساز واقع در رایانه دوم داده می‌شود و تعدادی بار و موتور که ممکن است دستخوش تغییرات شده باشند انتخاب می‌گردند. پس از اجرا شدن الگوریتم، با توجه به تغییرات اندازه‌گیری دریافتی از شبکه حالت‌های منتخب مطابق شکل (۵) به دست می‌آیند.



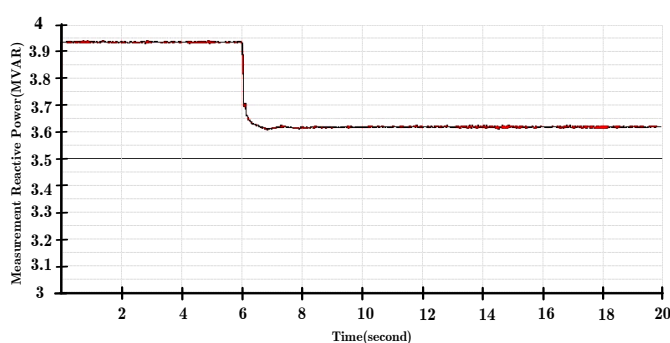
شکل (۵): انتخاب وضعیت‌های منتخب به کمک اندازه‌گیری توان در مرحله جدید



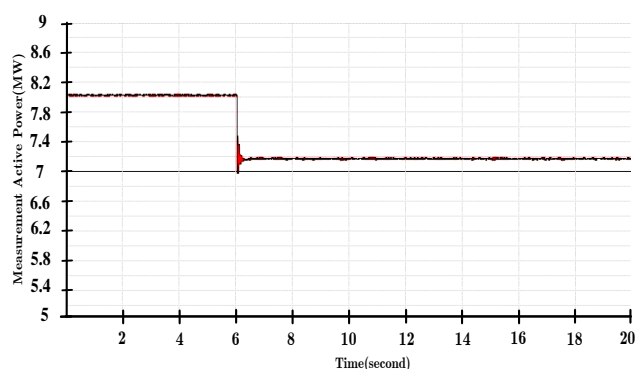
ب- تغییر توان راکتیو اندازه‌گیری ناشی از تغییر توان مکانیکی موتور
M3300 از 3.3 MW به 2 MW



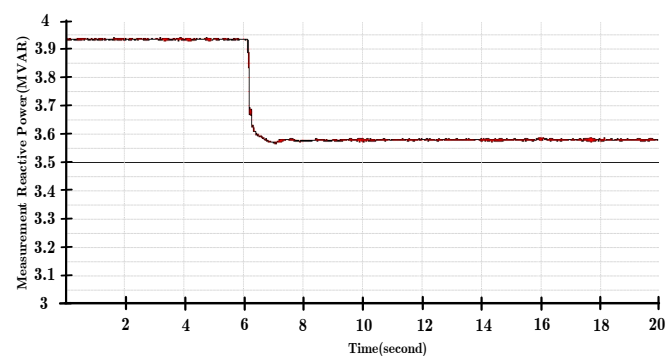
الف- تغییر توان اکتیو اندازه‌گیری ناشی از تغییر توان مکانیکی موتور
M3300 از 3.3 MW به 2 MW



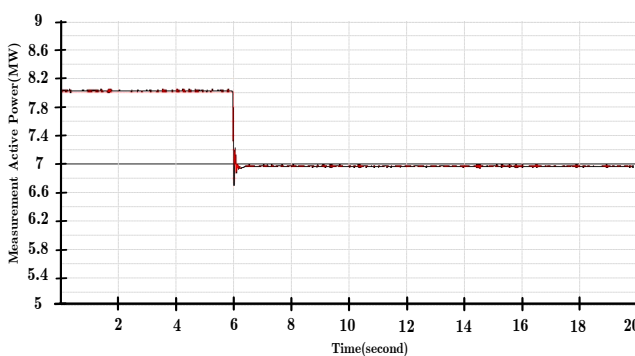
د- تغییر توان راکتیو اندازه‌گیری ناشی از تغییر توان مکانیکی موتور
A6.6/0.4 یا T6.6/0.4 از 1.15 MW به 0.38 MW



ج- تغییر توان اکتیو اندازه‌گیری ناشی از تغییر توان مکانیکی موتور
A6.6/0.4 یا T6.6/0.4 از 1.15 MW به 0.38 MW

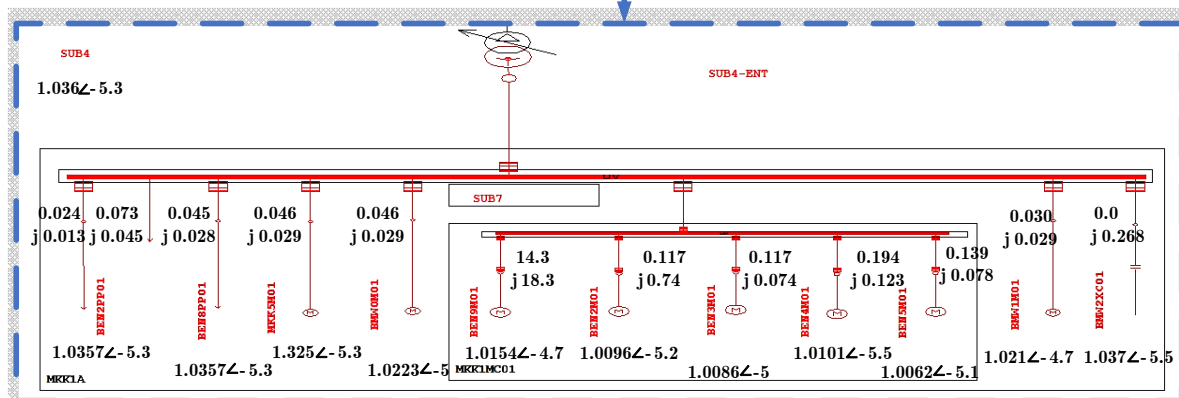
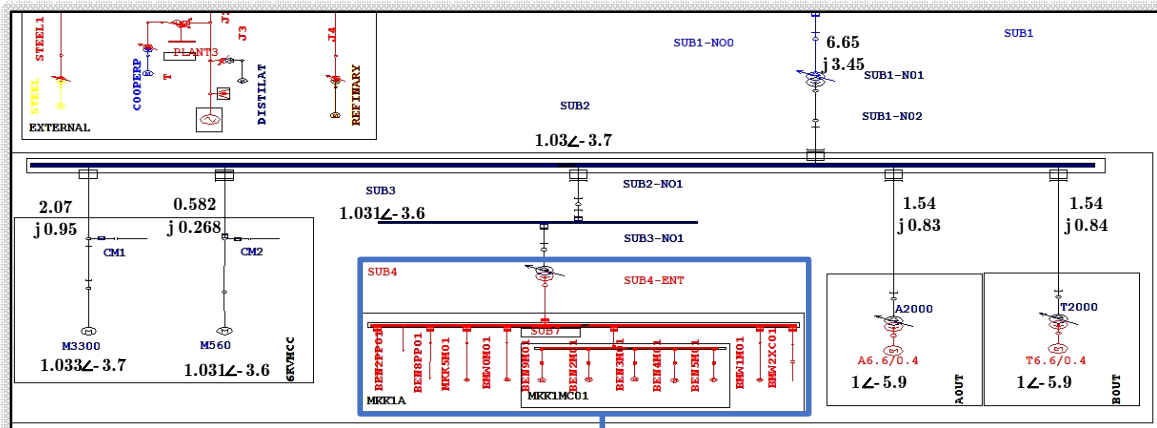


و- تغییر توان راکتیو اندازه‌گیری ناشی از تغییر توان مکانیکی موتور
A6.6/0.4 یا T6.6/0.4 از 1.15 MW به 0.191 MW



ه- تغییر توان اکتیو اندازه‌گیری ناشی از تغییر توان موتور A6.6/0.4
از 1.15 MW به 0.191 MW

شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی توان‌های اکتیو و راکتیو در سه حالت منتخب



شکل (۷): حالت جدید تخمینی بخشی از شبکه توزیع پالایشگاه شیمیایی در رایانه دوم

۴- نتیجه گیری

شبکه، وضعیت آن را به خوبی تخمین می‌زند. این روش همچنین قابلیت پیاده‌سازی در شبکه‌های کوچک و خانگی را نیز دارد و می‌توان به کمک آن وضعیت شبکه خانگی را در شرایطی که کنترلر هوشمند به عنوان اندازه‌گیر تلقی می‌شود، به طور پیوسته در اختیار مشترک قرار داد. در واقع این دستاورد، شبکه‌های توزیع را هرچه بیشتر به ملزومات شبکه‌های هوشمند نزدیک کرده و امکان پیاده‌سازی آن را فراهم می‌نماید. که روش‌های دینامیک مرسوم، معمولاً بار محاسباتی بالایی دارند در حالیکه در این روش این اشکال برطرف شده است. ذکر این نکته ضروری است که به کمک روش پیشنهادی می‌توان تمامی مزایای مربوط به مبحث اینترنت اشیاء را نیز داشت به علاوه اینکه این روش به لحاظ هزینه و خرابی تجهیزات نسبت به اینترنت اشیاء دارای برتری خواهد بود. در پایان پیشنهاد می‌گردد که می‌توان در مراحل بعدی، افزایش تعداد اندازه‌گیری‌ها و همچنین وجود نویز اندازه‌گیری در روش پیشنهادی را نیز پیاده‌سازی و مورد مطالعه قرار داد.

مراجع

- [۱] حلم زاده، "شناسایی و اصلاح سینماتیک پارامترهای نادرست مدل شبیه سازی سیستم قدرت بر مبنای مقادیر اندازه گیری"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، مهرماه ۱۳۹۵.

روش‌های مرسوم مورد استفاده در تخمین حالت نیاز به انواع دستگاه‌های اندازه‌گیری در نقاط مختلف شبکه دارد. در حالیکه در شبکه توزیع تعداد اندازه‌گیری‌ها خیلی کمتر از شبکه انتقال است. روش پیشنهادی این مقاله سعی در برطرف نمودن این مشکل دارد. در واقع به کمک روش پیشنهادی تخمین حالت با اندازه‌گیری کمتر اما با اطلاعات بیشتری انجام می‌گیرد. چنین دیدگاهی با در نظرگیری اندازه‌گیری‌های مجازی در تخمین حالت استاتیکی قبلاً انجام گرفته است. اما در فرآیند تخمین حالت دینامیکی و به کمک روش ارائه شده می‌توان وضعیت شبکه را به دقت به روزرسانی کرد. با توجه به اینکه شبکه‌های توزیع صنعتی دارای مودهای کاری مشخص و محدودی هستند و در نتیجه حالت‌های پایه شبیه سازی شده از قبل مشخص است و تعداد محدودی دارد، روش ارائه شده بر روی یک شبکه توزیع صنعتی پیاده‌سازی شده است. این روش با یک اندازه‌گیری در شبکه پالایشگاه شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت و به کمک مقادیر اندازه‌گیری دریافتی وضعیت شبکه پایین دست برآورد شد. هرچند افزایش تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌تواند منجر به افزایش دقت تخمین گر شود اما شبیه‌سازی ارائه شده با حداقل تعداد اندازه‌گیری دریافتی از

- Estimation of Generators in Power Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 5, pp. 2665-2675, Sept. 2015.
- [19] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Dynamic State Estimation in Power System by Applying the Extended Kalman Filter With Unknown Inputs to Phasor Measurements," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 4, pp. 2556-2566, Nov. 2011.
- [20] <http://www.tomcad.com/>.
- [21] J. Song, J. Zhao, F. Dong, J. Zhao, Z. Qian and Q. Zhang, "A Novel Regression Modeling Method for PMSLM Structural Design Optimization Using a Distance-Weighted KNN Algorithm," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 5, pp. 4198-4206, Sept.-Oct. 2018.
- [2] J. Zhao et al., "Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies, and Future Work," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 4, pp. 3188-3198, July 2019.
- [۳] علیرضا حسن‌نژاد مرزونی، علیرضا ذکریازاده "مکان‌یابی دستگاه‌های اندازه‌گیری به صورت چند هدفه با استفاده از تخمین حالت در شبکه‌های توزیع"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۶، شماره ۱-۲ (۱۳۹۸)، اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۸.
- [4] R. Ghaniabadi, S. M. Kouhsari, I. Pourkeivani and M. Abedi, "Power System Model-Based Dynamic State Estimation Using Wide-Area Measurements(WAMS)" 2019 34th International Power System Conference (PSC), Tehran.
- [5] I. Pourkeivani, M. Abedi, S. M. Kouhsari and R. Ghaniabadi, "A Novel Index to Predict the Voltage Instability Point in Power Systems Using PMU-based State Estimation " 2019 14th International Conference on Protection & Automation in Power System, Tehran.
- [6] A. Primadianto and C. Lu, "A Review on Distribution System State Estimation," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 5, pp. 3875-3883, Sept. 2017.
- [7] D. L. Lubkeman, J. Zhang, A. K. Ghosh, and R. H. Jones, "Field results for a distribution circuit state estimator implementation," IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 1, pp. 399-406, Jan. 2000.
- [8] D. Atanackovic and V. Dabic, "Deployment of real-time state estimator and load flow in BC Hydro DMS - Challenges and opportunities," in Proc. 2013 IEEE Power & Energy Soc. General Meeting, Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 1-5.
- [9] Schweeppe, F.C., and Wildes, J. 1970. Power system static state estimation, part I: exact model," IEEE Trans. Power Apparatus and Syst., PAS-89(2): 120-125.
- [10] Schweeppe, F.C., and Rom, D.B. 1970. Power system static state estimation, part II: approximation model. IEEE Trans. Power Apparatus and Syst., PAS-89(2): 125-130.
- [11] Schweeppe, F.C. 1970. Power system static state estimation, part III: implementation. IEEE Trans. Power Apparatus and Syst., PAS-89(2): 130-135.
- [12] Debs, A.S., and Larson, R.E. 1970. "A dynamic estimator for tracking the state of a power system." IEEE Trans. Power Apparatus and Syst., PAS-89(7): 1670-1678.
- [13] Clazunova, A.M. 2010. Forecasting power system state variables on the basis of dynamic state estimation and artificial neural networks. IEEE Region 8 SIBIRCON. July 11-15, Irkutsk Listvyanka, Russia, pp. 470-475.
- [14] Souza, J.C.S., Silva, A.M.L., and Silva, A.P.A. 1996. Data debugging for real time power system monitoring based on pattern analysis. IEEE Trans. Power Syst., 11(3): 1592 1599.
- [15] Lin, J.M., Huang, S.J., and Shih, K.R. 2003. Application of sliding surface enhanced fuzzy control for dynamic state estimation of a power system. IEEE Trans. Power Syst., 18(2): 570-577.
- [16] Huang, S.J., and Lin, J.M. 2004. Enhancement of anomalous data mining in power system predicting-aided state estimation. IEEE Trans. Power Syst., 19(1): 610-619.
- [17] Valverde, G., and Terzija, V. 2011. Unscented kalman filter for power system dynamic state estimation. IET Gener. Transm. Distrib., 5(1): 29-37.
- [18] K. Emami, T. Fernando, H. H. Iu, H. Trinh and K. P. Wong, "Particle Filter Approach to Dynamic State

زیر نویس‌ها

¹ Real-time

² Weighted Least Square

³ Unscented Kalman Filter

⁴ Particle Filter

⁵ Online

⁶ Stochastic

⁷ Distributed control system

⁸ Power_system Online_simulation Unveil Your Analysis

⁹ K-Nearest Neighbors

