

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۴

## یک شاخص غیرخطی ارزیابی پایداری ولتاژ مبتنی بر روش آنالیز برداری و اندازه‌گیری از توان‌های اکتیو و راکتیو سیستم قدرت

مصطفی محمدنیا<sup>۱</sup>، فرهاد نامداری<sup>۲\*</sup>، محمودرضا شاکرمی<sup>۳</sup>، لیلا حاتم‌وند<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

mohamadniaei.mo@fe.lu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

namdari.f@lu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

Shakarami.mr@lu.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

hatamvand.le@fe.lu.ac.ir

چکیده: این مقاله به ارائه یک شاخص جدید سنجش پایداری ولتاژ مبتنی بر روش آنالیز برداری می‌پردازد. اساس استخراج شاخص پیشنهادی، اندازه‌گیری به‌هنگام از توان‌های اکتیو و راکتیو ورودی و خروجی شینه‌های متصل به شینه‌های ژنراتوری است. در این راستا با توجه به قضیه حداکثر توان انتقالی از یک ژنراتور به بار متصل به آن، حدی برای شروع فروپاشی ولتاژ تعیین می‌شود. از طرفی در مواردی که سیستم قدرت نیازمند حذف بار است، یک حذف بار جدید ولتاژی/فرکانسی ارائه شده است. ساختار این حذف بار به‌گونه‌ای است که با تقسیم‌بندی بارهای شبکه به‌عنوان بارهای مجاز و غیرمجاز جهت خروج و اولویت‌بندی خروج بارهای مجاز، پایداری ولتاژ و فرکانس شبکه تضمین خواهد شد. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار دیگسایلنت بر روی شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE. صحت و کاربرد بسیار مناسب روش پیشنهادی را نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز برداری، پایداری ولتاژ، پایداری فرکانس، حذف بار.

## ۱. مقدمه

معادل تونن<sup>۱۳</sup>، شاخص‌های ارزیابی پایداری ولتاژ از فازورهای ولتاژ و جریان در محل شینه تولید شده است. این کار منجر به افزایش سرعت محاسبات شاخص خواهد شد. در مقابل کاهش قابلیت اطمینان شاخص را به دنبال دارد؛ زیرا مدل‌سازی تمام عناصر مؤثر در تحلیل پایداری ولتاژ، به وسیله مدار معادل تونن ممکن نیست.

هرچند روش‌هایی وجود دارد که بدون نیاز به مدل سیستم، پایداری ولتاژ را ارزیابی می‌کنند [۱۰]. در مرجع [۱۰] به منظور پایش<sup>۱۴</sup> پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، شاخصی بدون نیاز به مدل‌سازی سیستم و با استفاده از نماهای لیاپانوف<sup>۱۵</sup> زمان محدود پیشنهاد شده است. به طوری که با منفی شدن نمای بیشینه سیستم، مسیرهای مجاور به یکدیگر همگرا و سیستم پایدار است و با مثبت شدن نمای بیشینه، مسیرهای مجاور از یکدیگر واگرا و سیستم به سمت ناپایداری ولتاژ حرکت می‌کند. اما این روش نیازمند رؤیت‌پذیری کامل سیستم است.

از الگوریتم‌های فرا ابتکاری<sup>۱۶</sup> و شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۱۷</sup> به منظور تحلیل پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت<sup>۱۸</sup> استفاده می‌شود. در مرجع [۱۱] شاخص ارزیابی ولتاژ کوتاه‌مدت با استفاده از الگوریتم SSA<sup>۱۹</sup> ارائه شده است که سرعت بالایی در تعیین وضعیت پایداری ولتاژ سیستم دارد. اما الگوریتم‌های فرا ابتکاری با مشکل نداشتن جواب بهینه کلی مواجه‌اند. به علاوه آموزش و تعیین پارامترهای مختلف الگوریتم‌ها دشوار است. مشکل آموزش اولیه، در شاخص‌های مبتنی بر شبکه عصبی نیز وجود دارد [۵ و ۱۲]. به همین منظور در مرجع [۱۳] شاخصی بر اساس شبکه عصبی SVM<sup>۲۰</sup> و اندازه‌گیری‌های بهنگام از ولتاژهای شینه‌های سیستم ارائه شده است. با توجه به ترکیب این دو، آموزش شاخص به صورت نسبتاً دقیقی انجام می‌گیرد. اما در شاخص‌های شبکه‌های عصبی، محاسبات پیچیده بوده و نیازمند حافظه زیادی هستند. لذا در سیستم‌های قدرت بزرگ، احتمال بروز کمبود حافظه وجود دارد [۱۰].

بنابراین در مرجع [۱۴] به منظور شناسایی وضعیت پایداری ولتاژ، شاخصی مبتنی بر حدود آستانه<sup>۲۱</sup> ارائه شده است. این شاخص با پایش بهنگام شبکه، سرعت تشخیص زیادی دارد. به علاوه ارزیابی به وسیله این شاخص، نیازمند استفاده از حجم حافظه زیادی در سیستم نیست.

سیستم‌های قدرت وظیفه تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی را بر عهده دارند و به منظور عمل‌کرد مناسب در برابر انواع حادثه‌ها و اغتشاش‌ها<sup>۱</sup> مورد حفاظت قرار می‌گیرند. مهم‌ترین مشکلی که به خصوص طی سال‌های اخیر سیستم‌های قدرت را به چالش کشانده است؛ خاموشی‌های سراسری<sup>۲</sup> و از دست رفتن همه یا بخش بزرگی از تولید و مصرف سیستم است [۱]. از جمله دلایل اصلی خاموشی‌های سراسری، تغییر در وضعیت پایداری<sup>۳</sup> بوده که ناپایداری<sup>۴</sup> و فروپاشی ولتاژ<sup>۵</sup> نمونه‌ای از این موارد هستند. به طوری که اگر با ورود اغتشاش، اندازه ولتاژ شینه‌ها در حد قابل قبولی نباشد، ناپایداری ولتاژ رخ می‌دهد و احتمال وقوع فروپاشی و در ادامه خاموشی سراسری وجود دارد [۲]. بنابراین لازم است که همواره وضعیت پایداری ولتاژ ارزیابی و در صورت نیاز با اعمال روش‌های حفاظتی مناسب از قبیل حذف بار<sup>۶</sup>، از فروپاشی ولتاژ جلوگیری شود [۳ و ۴].

به همین منظور محققان شاخص‌ها<sup>۷</sup> و روش‌هایی برای ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ ارائه داده‌اند. از جمله در مرجع [۵] نقاط کار سیستم با توجه به وضعیت‌های مختلف پایداری طبقه‌بندی و شناسایی می‌شوند. سپس یک شاخص ارزیابی مقاومت شینه با استفاده از منحنی<sup>۸</sup> Q-V پیشنهاد شده است. اما منحنی‌های پایداری یک روش استاتیک هستند و به منظور تحلیل مسائل پایداری چندان مناسب نیستند؛ زیرا پایداری ولتاژ به دلیل ساختار غیرخطی<sup>۹</sup> سیستم قدرت، ماهیتی دینامیکی دارد [۶ و ۷]. لذا تخمین حاشیه پایداری<sup>۱۰</sup> با منحنی‌های استاتیکی چندان مطلوب نیست.

بنابراین مرجع [۸] با استفاده از اطلاعات به دست آمده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری<sup>۱۱</sup> (PMUs) به ارائه روشی به منظور تخمین حاشیه پایداری ولتاژ با توجه به بیشترین زمان حد بارگذاری پرداخته است. اما این روش نیازمند رؤیت‌پذیری<sup>۱۲</sup> کامل سیستم قدرت است. به همین سبب در مواردی که به هر دلیلی سیستم کاملاً رویت‌پذیر نباشد، این روش کاربرد ندارد. در مرجع [۹] با تخمین شینه بار به وسیله مدار

1. Disturbances
2. Blackouts
3. Stability Status
4. Instability
5. Voltage Collapse
6. Load Shedding
7. Indices
8. Curve
9. Nonlinear
10. Stability Margin
11. Phasor Measurement Units
12. Observability

13. Thevenin equivalent
14. Monitoring
15. Lyapunov
16. Meta-heuristic Algorithm
17. Artificial Neural Network
18. Short Term
19. Salp Swarm Algorithm
20. Support Vector Machine
21. Threshold Limits

پیشنهادی با مشکل عدم قطعیت روبه‌رو نبوده و سرعت بالایی در ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ دارد. به‌علاوه رؤیت‌پذیر نبودن کامل سیستم، خللی در سنجش پایداری ولتاژ به‌وسیله روش پیشنهادی به وجود نمی‌آورد. همچنین حذف بار در سیستم‌های قدرت امروزی به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است.

از طرفی معمولاً خروج یا بروز اغتشاش در واحدهای تولیدی، خطوط و ادواتی از قبیل ترانسفورماتورهای قدرت ممکن است باعث ناپایداری و در نهایت فروپاشی ولتاژ شوند. در این موارد علاوه بر تغییر در وضعیت پایداری ولتاژ، احتمال تغییر پایداری فرکانس نیز وجود دارد. لذا در این مقاله، از یک شاخص جدید حذف بار ولتاژی/فرکانسی استفاده شده است. شاخص پیشنهادی در ابتدا بارهایی را به‌عنوان بارهای مجاز و غیرمجاز مشخص می‌کند؛ سپس بارهای شینه‌های مجاز را به‌منظور خروج اولویت‌بندی می‌کند. بنابراین با حذف بار پیشنهادی، علاوه بر حفظ پایداری ولتاژ، پایداری فرکانس تضمین و بارهای سیستم به‌اشتباه حذف نمی‌شوند.

این مقاله در قسمت‌های مختلفی تدوین شده است. در بخش دوم حفاظت ناحیه گسترده و رابطه توان‌های اکتیو و راکتیو در تأمین بارهای سیستم بررسی می‌شوند. بخش سوم شاخص‌های ارزیابی پایداری ولتاژ و حذف بار پیشنهادی تشریح می‌گردند. در بخش چهارم شبیه‌سازی‌هایی بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شینه IEEE ارائه و نتایج آن با سایر روش‌ها مقایسه شده است. نتیجه مقاله را می‌توان در بخش پنجم مشاهده کرد.

## ۲. پیش‌زمینه

### ۲.۱. حفاظت ناحیه گسترده

افزایش روزافزون مصرف از یک سو و انتقال مقادیر عظیم تولید از طریق خطوط انتقال در گستره‌ای که بنا به دلایل مربوط به مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی از حدی بیشتر امکان توسعه ندارد از سوی دیگر، اصلی‌ترین دلایل خاموشی‌های سراسری اخیر هستند [۲۲]. بنابراین وجود طرح‌های حفاظتی با توانایی پایش فراگیر از سیستم و توانایی اتخاذ تصمیماتی جامع ضروری است. نتیجه این طرح، رفع سریع اغتشاش در سیستم و حداقل‌سازی محدوده آن خواهد بود.

چنین طرح‌هایی تحت عنوان طرح‌های حفاظتی جامع یا حفاظت ناحیه گسترده<sup>۱</sup> معرفی می‌شوند [۲۳]. طرح حفاظتی ناحیه گسترده به دو صورت پشتیبان و اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۳]. در حالت اول، این طرح ناظر بر هر یک از طرح‌های حفاظتی بوده و برای عناصر یا محدوده‌های مختلف سیستم در نظر گرفته می‌شوند. در صورتی که

اما تعیین حدود آستانه بر اساس شبیه‌سازی‌های مکرر صورت می‌گیرد که در سیستم قدرت واقعی، امکان شبیه‌سازی تمامی رخدادها و تعیین حد آستانه بهینه کلی وجود ندارد [۱۵]. از این رو در مرجع [۱۵] شاخص حدود آستانه با استفاده از آنالیز حساسیت<sup>۱</sup> تعیین می‌شود. اما روش‌های روش‌های آنالیز حساسیت به‌دلیل وابستگی به ساختار سیستم، حساسیت‌های متفاوتی دارند و تعیین حساسیت در سیستم‌های مختلف، محاسبات متعددی را به‌همراه دارد. لذا در مرجع [۱۶] شاخص معرفی شده که با استفاده از آنالیز مودال<sup>۲</sup> حد آستانه ولتاژ شینه ضعیف<sup>۳</sup> را تعیین می‌کند. این روش به ساختار سیستم وابسته نیست. اما شاخص‌های آنالیز مودال به‌دلیل محاسبات پیچیده در سیستم‌هایی با توانایی پردازش معمولی یا ضعیف با مشکل مواجه هستند [۲].

از طرفی پس از تشخیص فروپاشی ولتاژ، سیستم قدرت نیازمند حذف بار است. به همین منظور در مرجع [۱۷] شاخص حذف باری ارائه شده که به‌صورت حذف درصدی از چند بار، پایداری ولتاژ را برقرار می‌کند. اما در سیستم واقعی باید حذف بار کامل باشد. بنابراین شاخص‌های حذف بار درصدی در عمل کاربرد ندارند. به همین منظور در مرجع [۱۸] روش حذف باری ارائه شده که در صورت نیاز، کل بار شینه انتخاب و از سیستم خارج شود.

به‌علاوه حذف بار مشترک بر اساس ولتاژ و فرکانس به‌دلیل وابستگی به توان‌های سیستم، بهتر از حذف بار جداگانه آن‌هاست. از این رو شاخص مراجع [۱۹-۲۱]، حذف بار ولتاژی/فرکانسی را به‌صورت هم‌زمان معرفی می‌کنند. اما این شاخص‌ها فقط میزان حذف بار را تعیین می‌کنند و توانایی مشخص کردن شینه بار را ندارند. درحالی‌که تعیین شینه بار به‌منظور حذف بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا با اعاده مناسب توان شینه بار در حین اغتشاش، نیاز به حذف بار در آن شینه نیست [۱].

بنابراین با توجه به مشکلات و محدودیت‌های شاخص‌های پایداری، در مقاله پیش رو به‌منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ کوتاه‌مدت، شاخص جدیدی ارائه شده است. این شاخص برگرفته از پایش وضعیت سیستم در هر لحظه از زمان است. اساس محاسبات این روش، با توجه به تئوری میزان توان انتقالی از شینه ژنراتوری به شینه متصل به آن است. این شاخص با تقسیم‌بندی انواع اغتشاش‌ها به دو بخش داخلی و خارجی، به‌صورت بهنگام و بر اساس معادلات دینامیکی، به ارزیابی پایداری ولتاژ می‌پردازد. به ساختار و مدل سیستم وابسته نبوده و دارای جواب بهینه کلی است. محاسبات اندک شاخص، عدم نیاز به استفاده از حافظه زیاد را به‌دنبال دارد. از طرفی شاخص

1. Sensitivity Analysis
2. Modal Analysis
3. Weak Bus

سیستم را شناسایی کرد. در شکل (۲)، نحوه توان انتقالی به بار در قبل از اغتشاش تا زمان فروپاشی ولتاژ بررسی می‌شود. دو کمیت  $P$  و  $Q$  در حال اندازه‌گیری هستند. مقادیر اندازه‌گیری شده این دو کمیت، از لحظه صفر تا لحظه  $t_1$  در هر لحظه از زمان با مقدارشان در لحظه قبل برابر هستند. بنابراین ولتاژ سیستم در زمان قبل از اغتشاش پایدار است. با فرض ورود اغتشاش در لحظه  $t_1$  داریم:

۱. از زمان  $t_1$  تا  $t_2$  سیستم به سمت ناپایداری در حال حرکت است، اما به دلیل وجود ولتاژ قابل قبول شینه و اعاده مناسب بار، مشکلی وجود ندارد.

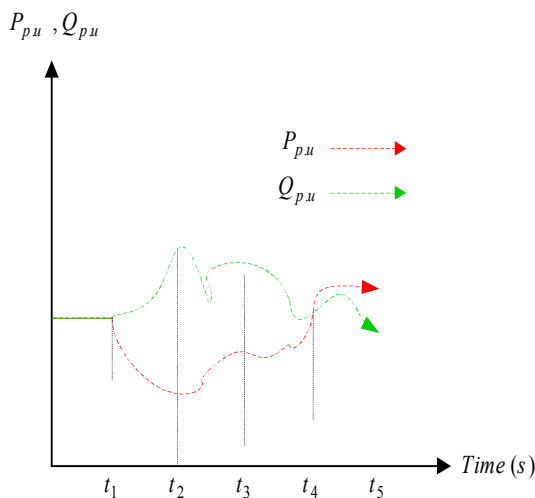
۲. در فاصله زمانی  $t_2$  تا  $t_3$  به دلیل تغییرات توان، احتمال بروز ناپایداری ولتاژ بالا است.

۳. با ورود به لحظه  $t_3$ ، ناپایداری ولتاژ اجتناب‌ناپذیر است.

۴. در فاصله زمانی بین  $t_3$  و  $t_4$  با توجه به عملکرد وسایل کنترلی و حفاظتی سیستم، هیچ‌گونه اقدام کنترلی خارجی به منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ نیاز نیست.

۵. با ورود به لحظه  $t_4$ ، حداکثر توان تولیدی به بار انتقال می‌یابد.

۶. فاصله زمانی  $t_4$  تا  $t_5$  به منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ اقدامات کنترلی خارجی از قبیل حذف بار نیاز است. در غیر این صورت وضعیت سیستم به لحظه  $t_5$  می‌رسد. در این زمان فروپاشی ولتاژ اجتناب‌ناپذیر است.



شکل (۲): نمودار زمانی توان اکتیو و راکتیو انتقالی در حین اغتشاش

حفاظت‌های اصلی به هر دلیلی وظایف خود را به درستی انجام ندهند، حفاظت ناحیه گسترده به‌عنوان پشتیبان عمل می‌کند. در حالت دوم، حفاظت ناحیه گسترده نقش اصلی را ایفا می‌کند و به‌طور مستقیم قطع، وصل و کنترل ادوات به‌وسیله این ساختار انجام می‌شود [۲۱].

## ۲.۲. تحلیل توان انتقالی در سیستم

در این بخش به تحلیل حداکثر توان انتقالی از طریق خطوط انتقال پرداخته می‌شود. این موضوع با استفاده از یک سیستم ساده، مطابق شکل (۱) بیان شده است. در این شکل و در حالت بدون تلفات (با فرض صفر بودن مقاومت خط انتقال)، تولید توان راکتیو ژنراتور برابر با مجموع توان راکتیو بار و تلفات راکتیو شبکه است.

$$Q_g = Q_l + XI^2 \quad (1)$$

که جریان عبوری از خط با توجه به توان ظاهری ژنراتور به‌صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{S_g}{E} = \frac{\sqrt{P_g^2 + Q_g^2}}{E} \quad (2)$$

با جایگزینی  $I$  در رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$Q_g = Q + \frac{X}{E^2} (P_g^2 + Q_g^2) \quad (3)$$

همچنین می‌توان این معادله را به‌صورت رابطه (۴) بازنویسی کرد:

$$Q_g^2 - \frac{E^2}{X} Q_g + \frac{E^2}{X} P_g^2 + P_g^2 = 0 \quad (4)$$

با حل رابطه (۴) نسبت به  $Q_g$  به دست می‌آید [۹]:

$$Q_g = \frac{E^2}{2X} \pm \sqrt{\left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 - \frac{QE^2}{X} - P_g^2} \quad (5)$$

با ساده‌سازی رابطه (۵)، حداکثر توان اکتیو و راکتیو انتقالی

ژنراتور نسبت به یکدیگر محاسبه می‌شوند:

$$Q_g = \frac{E^2}{X} - E \sqrt{\frac{Q}{X}} - P_g \quad (6)$$



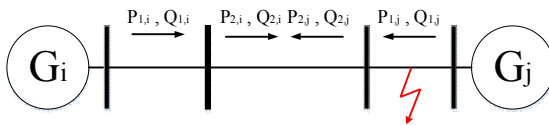
شکل (۱): ژنراتور متصل به شینه بار

بنابراین، دلیل عمده ناپایداری ولتاژ در حین اغتشاش، کاهش توان تحویلی به بارهاست [۲]. لذا در معادله (۶) با برابری توان اکتیو و راکتیو انتقالی، اعاده بیشتر توان در بار ممکن نیست. به‌علاوه به‌دلیل ساختار غیرخطی سیستم قدرت، احتمال تغییر در توان انتقالی به بار وجود دارد [۱ و ۲]. لذا با پایش مناسب می‌توان بارهای حساس حین اغتشاش در

### ۳. جلوگیری از فروپاشی ولتاژ ناحیه گسترده

#### ۳.۱. شاخص پایداری ولتاژ

با توجه به رابطه توان‌های انتقالی با پایداری، در این قسمت شاخص برداری ارائه می‌شود. در این روش، شاخص به دو قسمت تقسیم می‌شود: الف. شاخص داخلی: به منظور ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ در اثر ورود اغتشاش‌هایی که قبل از شینه متصل به شینه ژنراتوری به سیستم وارد می‌شوند، از قسمت داخلی شاخص استفاده می‌شود. در شکل (۳)، نمونه ای از اغتشاش‌های داخلی نشان داده شده است.



شکل (۳): نمایش اغتشاش داخلی در شاخص برداری

به منظور ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ با استفاده از شاخص داخلی به دست می‌آید:

$$P_{1,i}(t) - P_{2,i}(t) = P_{li}(t) \quad (7)$$

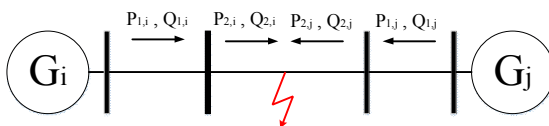
$$Q_{1,i}(t) - Q_{2,i}(t) = Q_{li}(t)$$

$$P_i^{int} = \frac{P_{li}(t)}{P_{li\ ref}} \quad (8)$$

$$Q_i^{int} = \frac{Q_{li}(t)}{Q_{li\ ref}}$$

ب. شاخص خارجی: ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ در همه اغتشاش‌های بعد از شینه متصل به شینه ژنراتوری، توسط قسمت خارجی شاخص انجام می‌شوند. در شکل (۴)، نمونه‌ای از اغتشاش‌های خارجی نشان داده شده است. وضعیت پایداری ولتاژ در این نوع اغتشاش‌ها، توسط شاخص خارجی در رابطه (۹) ارزیابی می‌شوند.

$$\begin{cases} P_i^{ex} = P_{1,i}(t) - P_{2,i}(t) \\ Q_i^{ex} = Q_{1,i}(t) - Q_{2,i}(t) \\ P_j^{ex} = P_{1,j}(t) - P_{2,j}(t) \\ Q_j^{ex} = Q_{1,j}(t) - Q_{2,j}(t) \end{cases} \quad (9)$$



شکل (۴): نمایش اغتشاش خارجی در شاخص برداری

نکته:

۱. شینه‌های اسلک<sup>۱</sup> متصل به شینه ژنراتوری که در حالت عادی

توان اکتیو یا راکتیو به آن‌ها تزریق نمی‌شود، توانایی سنجش پایداری ولتاژ را ندارند.

۲. هرگونه اغتشاش و رخداد در ژنراتور یا شینه متصل به آن که از

دو سمت به سیستم قدرت متصل هستند، با استفاده از شاخص خارجی ارزیابی می‌شود.

۳. در حین ارزیابی توسط شاخص داخلی یا خارجی، زمان

سریع‌ترین شینه تشخیص دهنده فروپاشی، زمان تشخیص شاخص است.

#### ۳.۲. حذف بار

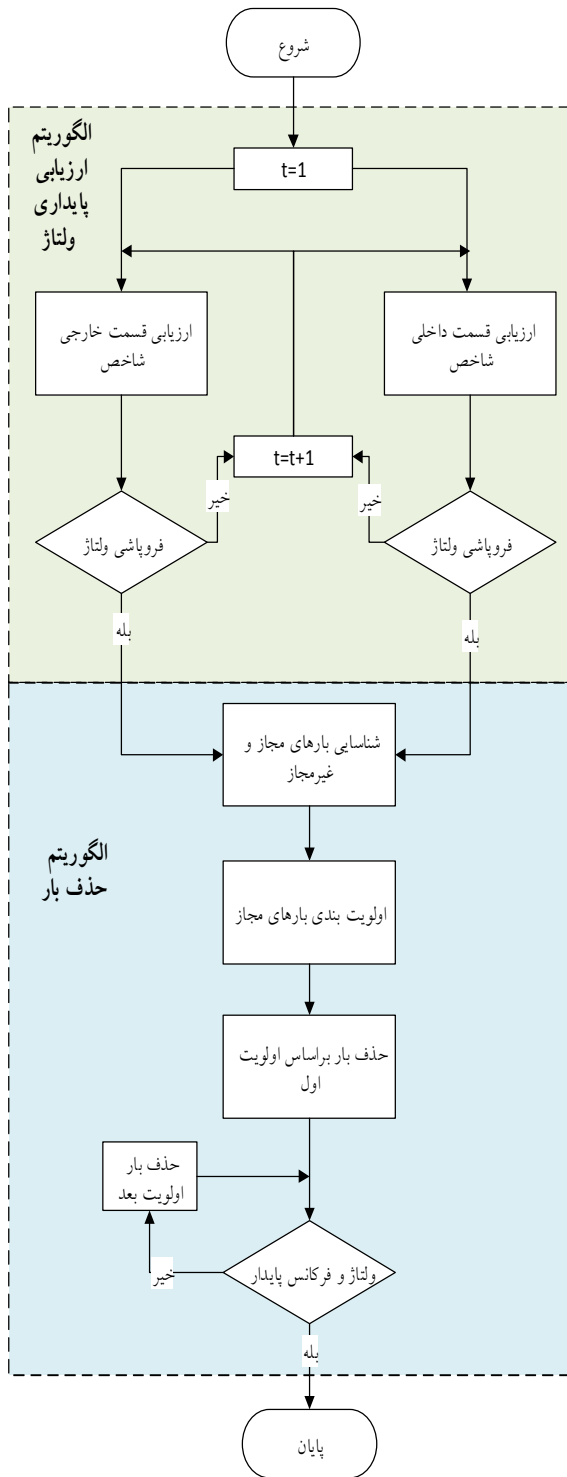
خاموشی‌های سراسری در سیستم‌های قدرت همواره به‌عنوان یکی از مسائل مهم در صنعت برق مطرح بوده است. از طرفی در سال‌های اخیر به‌واسطه مشکلات مالی و محدودیت‌های زیست‌محیطی، بهره‌برداران به توسعه سیستم قدرت با افزونگی کمتر و بهره‌برداری در حدود مرزهای پایداری سیستم‌ها پرداخته‌اند [۲۴]. لذا با بروز هرگونه اغتشاش، احتمال فروپاشی ولتاژ سیستم وجود دارد [۲۰]. بنابراین حذف بار در سیستم‌های قدرت امروزی به‌گزینه مهمی در طرح‌های حفاظتی مبدل شده و آخرین راهکار در جلوگیری از فروپاشی ولتاژ است [۲۰ و ۲۱]. به‌علاوه فروپاشی ولتاژ به‌دلیل خروج واحدهای تولیدی، بارگذاری‌های سنگین، قطع خطوط و اختلال در عملکرد سایر ادوات سیستم قدرت از قبیل ترانسفورماتورها پدید می‌آید [۲۰]. این اغتشاش‌ها معمولاً منجر به عدم هماهنگی بین تولید و مصرف خواهند شد [۲]. بنابراین احتمال وقوع فروپاشی فرکانس به‌همراه فروپاشی ولتاژ وجود دارد [۲۰، ۲۱ و ۲۵]. به همین دلیل، در این مقاله یک شاخص حذف بار ولتاژ/فرکانسی ارائه شده تا علاوه بر پایداری ولتاژ، پایداری فرکانس نیز تضمین گردد.

عملکرد این شاخص به‌گونه‌ای است که در مرحله اول، بارهای مجاز و غیرمجاز در حذف بار شناسایی می‌شوند. در مرحله دوم بارهای مجاز به‌منظور خروج از سیستم اولویت‌بندی می‌شوند. سپس حذف بارهای مجاز، به‌ترتیب اولویت تا زمان پایدار شدن ولتاژ و فرکانس سیستم ادامه می‌یابد.

#### ۳.۲.۱. تعیین بارهای مجاز و غیرمجاز به‌منظور حذف بار

۱. توان‌های تزریقی اکتیو و راکتیو به شینه‌های بار طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} P_g - P_{loss}^i &= P_{inj}^i \\ Q_g - Q_{loss}^i &= Q_{inj}^i \end{aligned} \quad (10)$$



شکل (۵): الگوریتم روش پیشنهادی به منظور حفظ پایداری ولتاژ

### ۳.۳ سیستم تحت مطالعه

شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE با فرکانس نامی ۶۰ هرتز، دارای ۳۶ خط انتقال، ۱۰ ژنراتور و تعداد ۱۲ ترانسفورماتور است [۲۱، ۲۶ و ۲۷].

۲. به منظور اندازه‌گیری تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شینه بار در هر لحظه داریم:

$$P_{inj}^i = \frac{P_{inj}^i(t)}{P_{inj,ref}^i} \quad (11)$$

$$Q_{inj}^i = \frac{Q_{inj}^i(t)}{Q_{inj,ref}^i}$$

۳. با توجه به رابطه (۶)، در بیشترین حد توان انتقالی به بار، یکی از دو شرط زیر برقرار است:

الف. اگر برای هر بار موجود حین اغتشاش،  $Q_{inj}^i \geq P_{inj}^i$  باشد، اعاده توان در این بار انجام شده و به‌عنوان بار غیرمجاز در شاخص حذف بار تعیین می‌گردد.

ب. اگر برای هر بار موجود حین اغتشاش،  $Q_{inj}^i < P_{inj}^i$  باشد، سیستم توانایی اعاده توان این بار را نداشته و به‌عنوان بار مجاز در شاخص حذف بار تعیین می‌شود.

### ۳.۲.۲ اولویت‌بندی بارهای مجاز در حذف بار

مراحل اولویت‌بندی بارهای مجاز به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

۱. با استفاده از PMUها، ولتاژ و فرکانس به‌هنگام شینه بار اندازه‌گیری می‌شوند:

$$v_{l_i} = \left( \frac{v_{l_i}(t)}{v_{l_i,ref}} \right) \quad (12)$$

$$f_{l_i} = \left( \frac{f_{l_i}(t)}{f_{l_i,ref}} \right) \quad (13)$$

۲. با توجه به سرعت و دقت بیشتر شاخص‌های از نوع نرخ [۱۴] به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{l_i} &= \frac{d}{dt} v_{l_i}(t) \\ \dot{f}_{l_i} &= \frac{d}{dt} f_{l_i}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

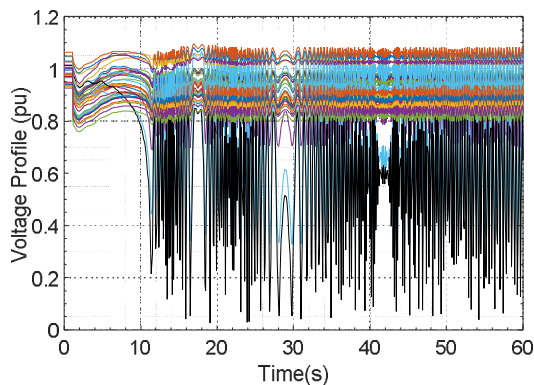
۳. شاخص کلی برای هر یک از شینه‌های بار در معادله (۱۵) قابل محاسبه است:

$$L.S_i = v_{l_i} + f_{l_i} + \dot{v}_{l_i} + \dot{f}_{l_i} \quad (15)$$

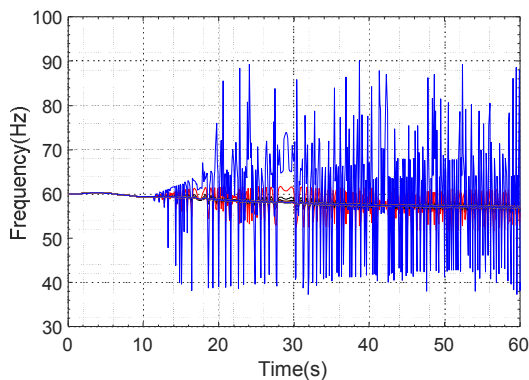
۴. از بین بارهای مجاز، تعیین اولویت با توجه به بیشترین کاهش اندازه شاخص در زمان حذف بار تعیین می‌شود. به‌عبارت دیگر، اندازه شاخص هر یک از شینه‌های بار که کمتر باشد، اولویت مقدم‌تری به‌منظور حذف بار است.

در شکل (۵) طرح‌واره شاخص برداری، شاخص حذف بار و نحوه عملکرد این دو به‌منظور تشخیص و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ و فرکانس نمایش داده شده است.

شکل (۶) زمان تشخیص فروپاشی ولتاژ توسط هریک از شینه‌های شاخص خارجی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تمامی شینه‌ها فروپاشی ولتاژ سیستم را پیش‌بینی می‌کنند. شکل (۷) پروفیل ولتاژ و شکل (۸) پروفیل فرکانس سیستم را در اثر خروج این ژنراتور نشان می‌دهد.



شکل (۷): پروفیل ولتاژ سیستم در اثر خروج ژنراتور شینه ۳۹



شکل (۸): پروفیل فرکانس سیستم بر اثر خروج ژنراتور شینه ۳۹

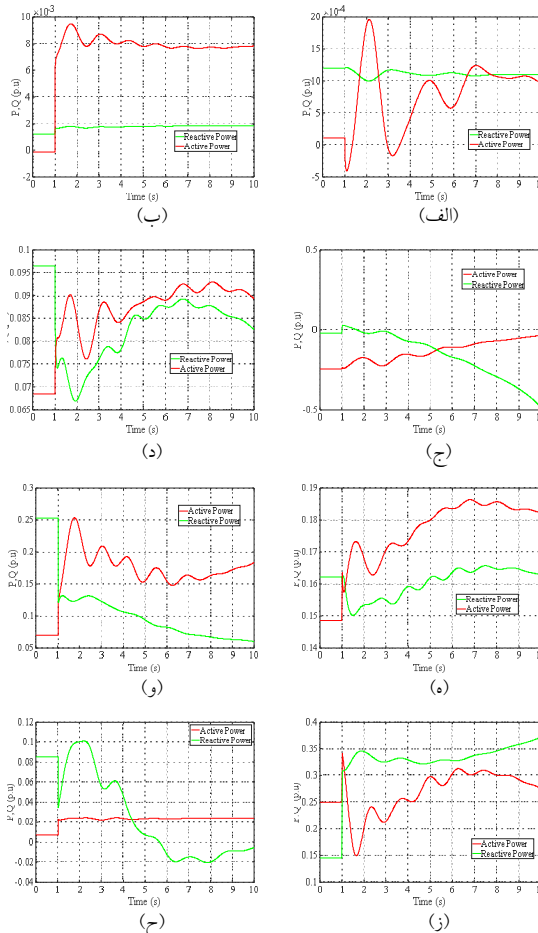
با توجه به شکل (۷)، فروپاشی ولتاژ به درستی توسط شاخص خارجی تشخیص داده شده است. در جدول (۱) زمان تشخیص فروپاشی روش پیشنهادی با سایر مراجع مقایسه شده است. لذا سریع‌ترین تشخیص مربوط به شاخص خارجی پیشنهادی است. در شکل (۹) منحنی PV شینه شماره ۲۲ در زمان‌های قبل از اغتشاش و ۲۰ میلی ثانیه پس از اغتشاش رسم شده است. هر دو منحنی، با حاشیه پایداری ولتاژ سیستم فاصله دارند. بنابراین به وسیله منحنی PV نمی‌توان وضعیت پایداری ولتاژ را در این زمان کوتاه پس از اغتشاش سنجید. پس از شناسایی فروپاشی ولتاژ، ۵/۲ ثانیه به عنوان زمان نظارت گذرا نیاز است [۲۱]. بنابراین به دلیل وجود کنترلرها و ادوات مختلف حفاظتی در سیستم قدرت، هیچ‌گونه اقدام کنترلی خارجی تا ۵/۲ ثانیه بعد از شناسایی فروپاشی ولتاژ مجاز نیست. بعد از این زمان، با نظارت بر پروفیل ولتاژ و همچنین

به منظور شبیه‌سازی دینامیکی از مدل ماشین‌های سنکرون به همراه سیستم تحریک نوع اول IEEE\_DC در شبکه استفاده شده است. بار همه شینه‌های مصرفی به صورت استاتیکی وابسته به ولتاژ مدل شده، جز بارهای موجود در شینه‌های ۳ و ۱۸ که به صورت دینامیکی و با استفاده از موتور القایی مدل شده‌اند [۲۱]. پارامترهای دینامیکی در پیوست ارائه شده است.

## ۴. شبیه‌سازی و نتایج

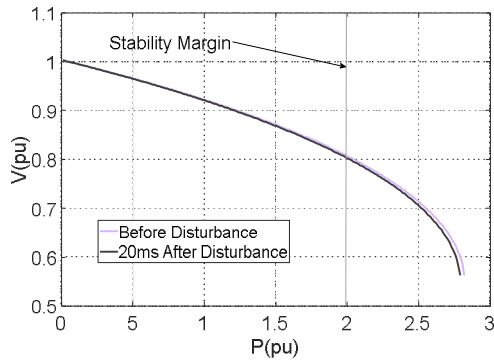
### ۴.۱. خروج ژنراتور شینه شماره ۳۹

با ورود اغتشاش، ژنراتور شینه ۳۹ در ثانیه یک از سیستم خارج می‌شود. با توجه به محل اغتشاش، ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ با استفاده از قسمت خارجی شاخص برداری انجام می‌شود؛ زیرا این ژنراتور از دو سمت به شبکه متصل است. ۲۰ میلی‌ثانیه پس از زمان خروج ژنراتور، شینه شماره ۲۲ فروپاشی ولتاژ را پیش‌بینی می‌کند.



شکل (۶): شینه‌های متصل به شینه‌های ژنراتوری برای شاخص برداری و به ازای خروج ژنراتور شینه ۳۹: (الف) شینه ۱۰، (ب) شینه ۱۹، (ج) شینه ۲۰، (د) شینه ۲۲، (ه) شینه ۲۳، (و) شینه ۲۵، (ز) شینه ۲۹، (ح) شینه ۲

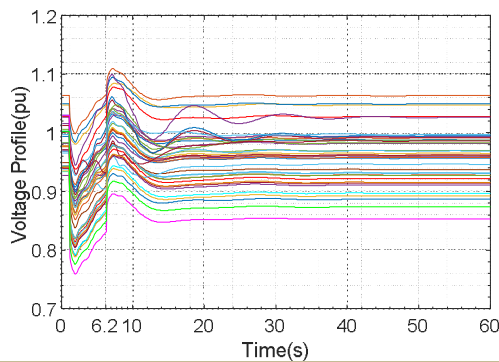
ولتاژ (شکل ۱۰) و فرکانس (شکل ۱۱) در سیستم برقرار می‌شوند. در جدول (۳) حذف بار روش پیشنهادی با روش مراجع [۱۷] و [۱۸] مقایسه شده است. طبق این جدول اگرچه پایداری ولتاژ در روش مرجع [۱۸] با میزان کمتری از حذف بار برقرار می‌شود، فرکانس سیستم همچنان ناپایدار باقی می‌ماند. به‌علاوه حذف بار مرجع [۱۷] به‌صورت درصدی بوده که این روش در سیستم واقعی ممکن نیست، زیرا در سیستم واقعی در حین حذف بار باید کل بار شینه از سیستم حذف گردد.



شکل (۹): منحنی PV شینه شماره ۲۲ قبل از اغتشاش و زمان تشخیص فروپاشی توسط شاخص پیشنهادی

جدول (۳): مقایسه میزان حذف بار به‌منظور پایدار کردن ولتاژ و فرکانس سیستم بر اثر خروج ژنراتور شینه ۳۹

روش	شینه حذف بار	وضعیت پایداری	
		ولتاژ	فرکانس
روش پیشنهادی	۴	بله	بله
مرجع [۱۷]	۴ (۶۰٪) - ۸ (۲۶٪)	بله	بله
مرجع [۱۸]	۱۶	بله	خیر



شکل (۱۰): پروفیل ولتاژ شینه‌ها پس از حذف بار روش پیشنهادی

شاخص برداری، سیستم قدرت نیازمند حذف بار است. بنابراین طبق الگوریتم حذف بار، وضعیت مجاز یا غیرمجاز بودن هر یک از بارها جهت خروج تعیین می‌گردد. سپس به‌وسیله شاخص  $L.S_i$ ، اولویت خروج هر یک از بارها مشخص می‌شود.

جدول (۱): مقایسه زمان تشخیص فروپاشی ولتاژ به‌وسیله شاخص‌های

مختلف بر اثر خروج ژنراتور شینه ۳۹

روش	زمان تشخیص (ثانیه)
روش پیشنهادی	۰/۰۲
مرجع [۲۸]	۱/۵
مرجع [۵]	۱/۵
مرجع [۲۴]	۰/۵
مرجع [۱۴]	۰/۸
مرجع [۲۹]	۰/۹
مرجع [۲۱]	۰/۵۶

جدول (۲): وضعیت شینه‌های بار با توجه به بارهای مجاز و اولویت

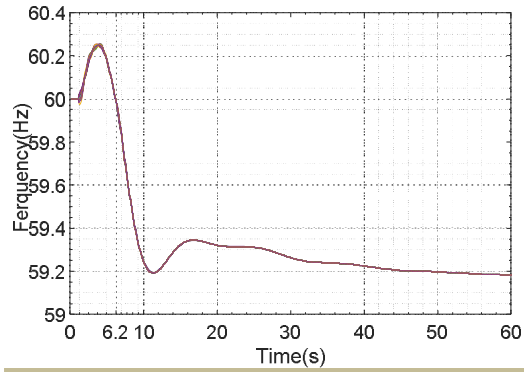
حذف بار بر اثر خروج ژنراتور شینه ۳۹

شینه بار	تعیین بار (مجاز/غیرمجاز)	اولویت	حذف بار
۴	مجاز	۱	بله
۷	مجاز	۳	خیر
۸	مجاز	۲	خیر
۱۲	مجاز	۴	خیر
۱۵	مجاز	۷	خیر
۱۶	مجاز	۸	خیر
۲۰	مجاز	۶	خیر
۲۱	مجاز	۱۰	خیر
۲۳	مجاز	۱۳	خیر
۲۴	مجاز	۹	خیر
۲۵	غیرمجاز	-	-
۲۶	مجاز	۱۴	خیر
۲۷	مجاز	۱۱	خیر
۲۸	غیرمجاز	-	-
۲۹	غیرمجاز	-	-
۳۱	مجاز	۱۲	خیر
۳۹	مجاز	۵	خیر

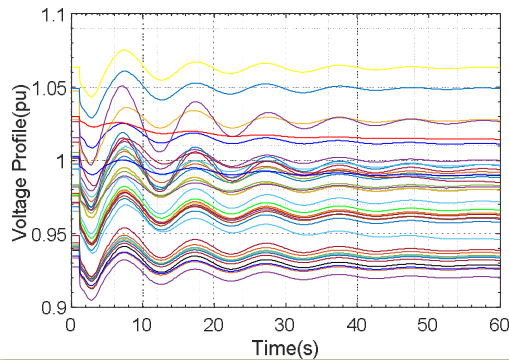
در جدول (۲) بارهای مجاز و غیرمجاز و همچنین اولویت هر یک از بارهای مجاز برای خروج نمایش داده شده است. با توجه به این جدول، با حذف بار موجود بر روی شینه شماره ۴، پایداری



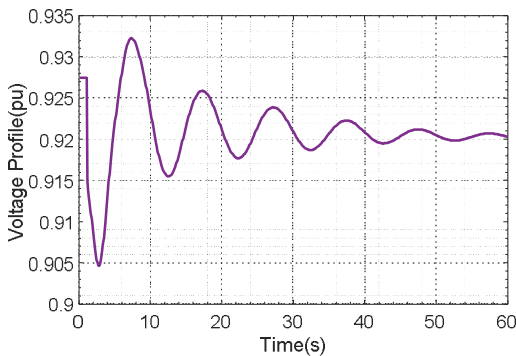
استفاده از قسمت داخلی شاخص ارزیابی می‌شود. با اندازه‌گیری‌های شاخص برداری در شکل (۱۲)، شینه‌های متصل به شینه‌های ژنراتوری، عدم فروپاشی ولتاژ را نمایش می‌دهند. در نتیجه نیازی به هیچ‌گونه اقدام کنترلی خارجی مانند حذف بار نیست. شکل (۱۳) پروفیل ولتاژ شینه‌های سیستم را بر اثر خروج این ژنراتور نشان می‌دهد. با توجه به پروفیل ولتاژ، تشخیص شاخص صحیح است. در شکل (۱۴) پروفیل ولتاژ شینه شماره ۲۵ بر اثر این خروج نشان داده شده است. با توجه به کاهش اندازه ۰/۰۲۲ پریونیت ولتاژ این شینه در لحظه اغتشاش، احتمال اشتباه در تشخیص شاخص‌های مبتنی بر حد آستانه وجود دارد؛ اما شاخص برداری با این مشکل روبه‌رو نیست.



شکل (۱۱): پروفیل فرکانس شینه‌ها پس از حذف بار روش پیشنهادی



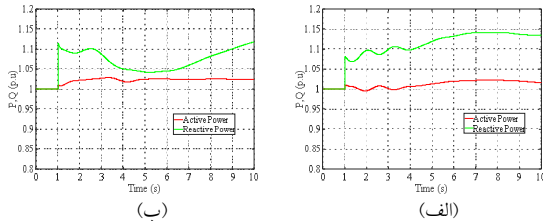
شکل (۱۳): پروفیل ولتاژ سیستم بر اثر خروج ژنراتور شینه ۳۰



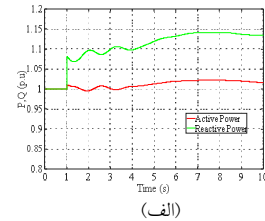
شکل (۱۴): پروفیل ولتاژ شینه ۲۵ بر اثر خروج ژنراتور شینه ۳۰

### ۳.۴. خروج خط ۴-۱۴

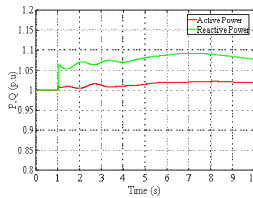
بر طبق شاخص برداری در شکل (۱۵)، خروج خط ۴-۱۴ به‌عنوان خروجی است که تنش بسیار کوچکی را به سیستم وارد می‌کند. این خروج در ثانیه ۱ شبیه‌سازی اتفاق می‌افتد. با توجه به مکان این اغتشاش، قسمت خارجی شاخص برداری وظیفه ارزیابی پایداری ولتاژ را بر عهده دارد. در شکل (۱۶) پروفیل ولتاژ سیستم نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تشخیص شاخص خارجی درست است.



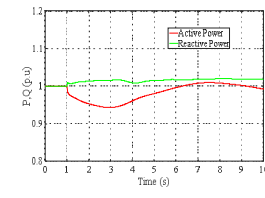
(ب)



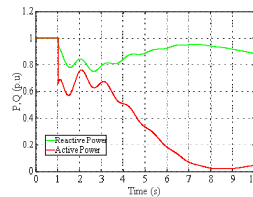
(ف)



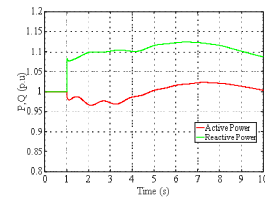
(د)



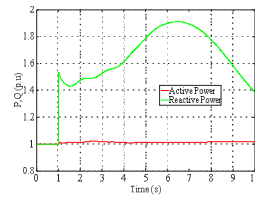
(ج)



(و)



(ه)



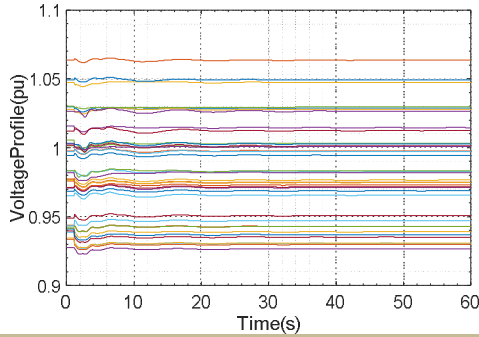
(ز)

شکل (۱۲): شینه‌های متصل به شینه ژنراتوری با توجه به شاخص برداری در خروج ژنراتور شینه ۳۰: (الف) شینه ۱۰، (ب) شینه ۱۹، (ج) شینه ۲۰، (د) شینه ۲۲، (ه) شینه ۲۳، (و) شینه ۲۵، (ز) شینه ۲۹

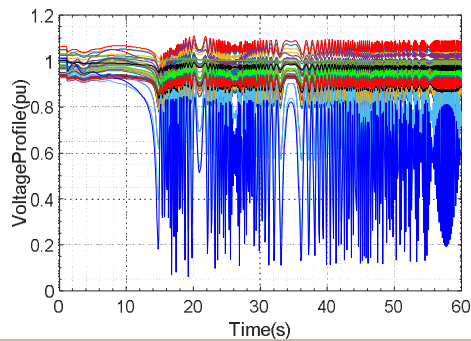
### ۲.۴. خروج ژنراتور شینه شماره ۳۰

در این قسمت، خروج ژنراتور شینه ۳۰ یعنی ژنراتور ۱۰ تحلیل خواهد شد. این ژنراتور در ثانیه ۱ از سیستم خارج می‌شود. این اغتشاش با

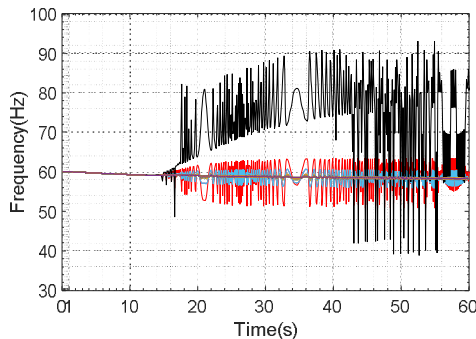
۴. خروج ژنراتور شینه شماره ۳۳



شکل (۱۶): ولتاژ شینه‌ها بر اثر خروج خط شماره ۴-۱۴



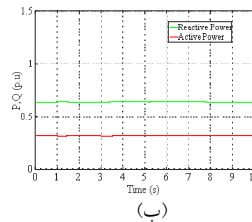
شکل (۱۷): ولتاژ شینه‌ها پس از خروج ژنراتور شینه شماره ۳۳



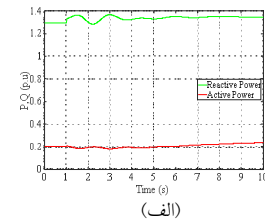
شکل (۱۸): فرکانس شینه‌ها پس از خروج ژنراتور شینه شماره ۳۳

در جدول (۴) وضعیت تشخیص فروپاشی ولتاژ توسط روش پیشنهادی با سایر روش‌ها مقایسه شده است. با توجه به پیش‌بینی شاخص، ۵/۲ ثانیه بعد از خروج، سیستم قدرت نیازمند حذف بار است. در جدول (۵) بارهای مجاز، غیرمجاز و اولویت خروج هر یک از بارهای مجاز نمایش داده شده است. با حذف بار شینه شماره ۲۰ به‌عنوان اولویت اول، پایداری ولتاژ و فرکانس سیستم برقرار می‌شود. در شکل (۲۰) منحنی PV شینه شماره ۲۹ در زمان‌های قبل از اغتشاش و ۲۰ میلی‌ثانیه پس از آن مقایسه شده است. هر دو منحنی، با حاشیه پایداری ولتاژ سیستم فاصله دارند. بنابراین به‌وسیله منحنی PV نمی‌توان وضعیت پایداری ولتاژ را در این زمان کوتاه پس از اغتشاش سنجید. به‌علاوه اگرچه منحنی PV لحظه تشخیص شاخص به حاشیه پایداری نزدیک‌تر است، با قطعیت نمی‌توان حرکت سیستم را به سمت فروپاشی

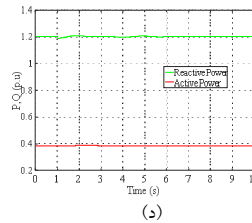
به‌طور معمول تغییر وضعیت پایداری ولتاژ، به‌دلیل وقوع اغتشاش در سیستم است. این اغتشاش‌ها اغلب در شرایط خروج ادوات بزرگ صورت می‌پذیرد. برای مثال، خروج ژنراتور موجود در شینه شماره ۳۳ در ثانیه ۱ شبیه‌سازی، پدیده‌ای است که سیستم را به سمت فروپاشی ولتاژ و فرکانس سوق می‌دهد (شکل ۱۷ و شکل ۱۸). با توجه به شاخص برداری، باید از قسمت شاخص داخلی استفاده کرد. ۰/۴ ثانیه بعد از اغتشاش، فروپاشی ولتاژ به‌وسیله شینه شماره ۲۹ شناسایی می‌شود. در شکل (۱۹) می‌توان ارزیابی شاخص را مشاهده کرد. به‌علاوه اگر به هر دلیلی شینه شماره ۲۹ رؤیت‌پذیر نباشد، شینه شماره ۲۲ بعد از ۰/۴۶ ثانیه فروپاشی ولتاژ سیستم را تشخیص می‌دهد. به‌طوری که در شاخص برداری بدون رؤیت‌پذیری کامل سیستم نیز، تشخیص وضعیت پایداری ولتاژ با مشکلی مواجه نمی‌شود.



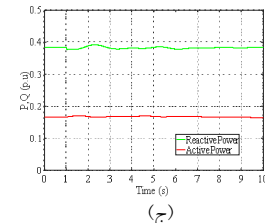
(ب)



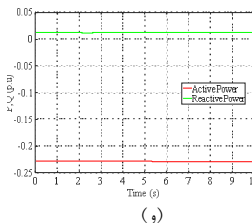
(الف)



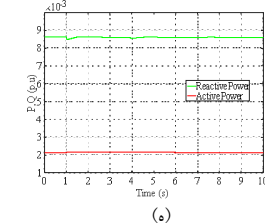
(د)



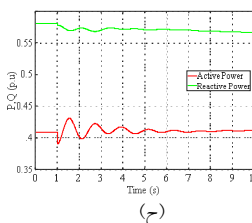
(ج)



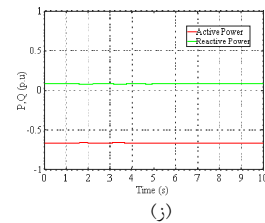
(و)



(ه)

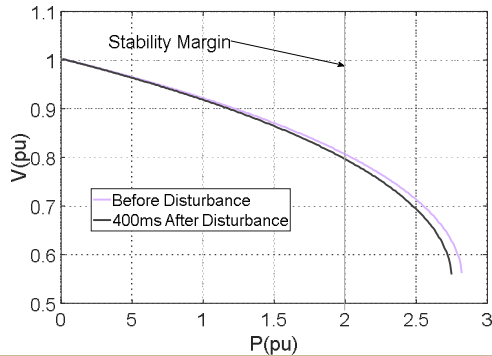


(ح)

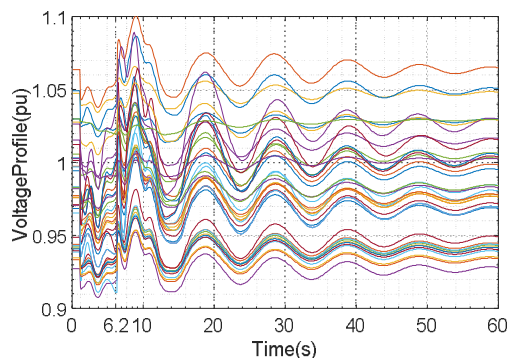


(ز)

شکل (۱۵): شینه‌های متصل به شینه ژنراتوری با توجه به شاخص برداری در خروج خط شماره ۴-۱۴: (الف) شینه ۱۰، (ب) شینه ۱۹، (ج) شینه ۲۰، (د) شینه ۲۲، (ه) شینه ۲۳، (و) شینه ۲۵، (ز) شینه ۲۹، (ز) شینه ۲



شکل (۲۰): منحنی PV در شینه شماره ۲۹ قبل از اغتشاش و زمان تشخیص شاخص پیشنهادی



شکل (۲۱): پروفیل ولتاژ شینه‌ها پس از حذف بار روش پیشنهادی

جدول (۵): وضعیت شینه‌های بار با توجه به بارهای مجاز و اولویت حذف بار بر اثر خروج ژنراتور شینه ۳۹

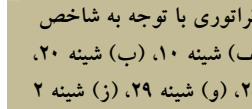
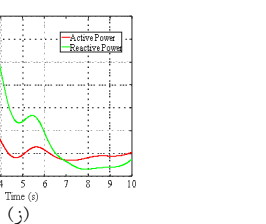
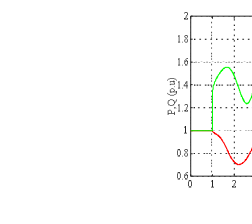
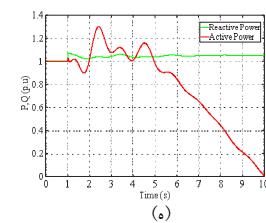
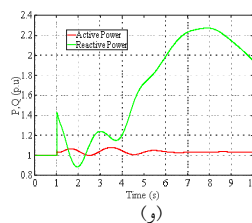
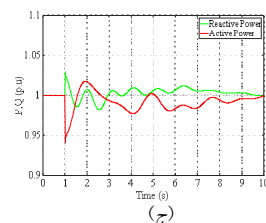
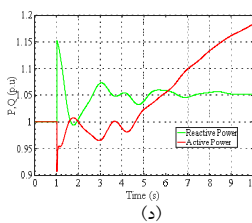
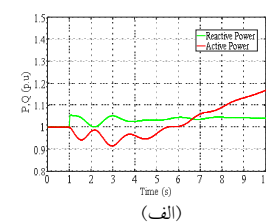
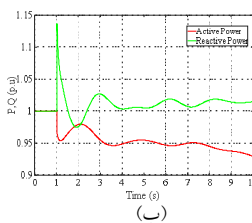
شینه بار	تعیین بار (مجاز/غیرمجاز)	اولویت حذف بار	حذف بار
۴	مجاز	۵	خیر
۷	مجاز	۴	خیر
۸	مجاز	۳	خیر
۱۲	مجاز	۲	خیر
۱۵	مجاز	۶	خیر
۱۶	مجاز	۷	خیر
۲۰	مجاز	۱	بله
۲۱	مجاز	۸	خیر
۲۳	غیرمجاز	-	-
۲۴	مجاز	۹	خیر
۲۵	غیرمجاز	-	-
۲۶	غیرمجاز	-	-
۲۷	مجاز	۱۰	خیر
۲۸	غیرمجاز	-	-
۲۹	غیرمجاز	-	-
۳۱	مجاز	۱۱	خیر
۳۹	غیرمجاز	-	-

مشخص کرد. در مقابل شاخص برداری با توجه به روش تحلیل دینامیکی، فروپاشی ولتاژ را پیش‌بینی می‌کند. در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به ترتیب پروفیل ولتاژ و فرکانس سیستم بر اثر حذف بار نمایش داده شده است. لذا با توجه به این حذف بار علاوه بر ولتاژ، پایداری فرکانس برقرار شد. درحالی‌که با استفاده از حذف بارهای ولتاژی، احتمال پایدار نشدن فرکانس سیستم محتمل است. بنابراین در عمل شاخص‌های حذف بار ولتاژی در این مورد کاربرد ندارند.

جدول (۴): مقایسه زمان تشخیص فروپاشی ولتاژ توسط روش پیشنهادی

و سایر روش‌ها بر اثر خروج ژنراتور شینه ۳۳

روش	زمان تشخیص (ثانیه)
روش پیشنهادی	۰/۴
مرجع [۵]	۱/۶
مرجع [۱۴]	۰/۸
مرجع [۲۱]	۱/۶۵
مرجع [۲۴]	۲/۲۵
مرجع [۲۸]	۱/۵
مرجع [۲۹]	۰/۹

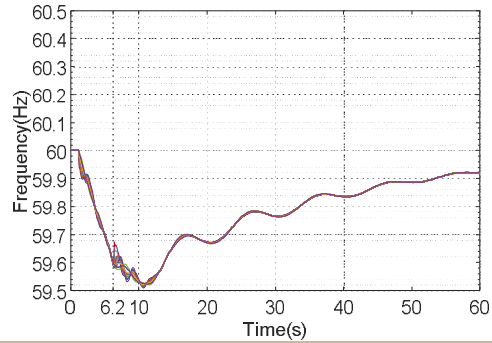


شکل (۱۹): شینه‌های متصل به شینه ژنراتوری با توجه به شاخص برداری در خروج ژنراتور شینه ۳۳: (الف) شینه ۱۰، (ب) شینه ۲۰، (ج) شینه ۲۲، (د) شینه ۲۳، (ه) شینه ۲۵، (و) شینه ۲۹، (ز) شینه ۲

اندازه‌گیری‌های بهنگام، امکان کاربرد شاخص را در سیستم‌های واقعی ممکن می‌سازد. برخلاف شاخص‌های حدود آستانه، با مشکل تعیین حدود آستانه برای هر سیستم روبه‌رو نیست. توانایی تشخیص لحظه شروع فروپاشی ولتاژ، یکی دیگر از مزیت‌های شاخص برداری است. از طرفی یکی از موضوعات مهم در سیستم‌های قدرت امروزی حذف بار است. به همین منظور، در این مقاله روش جدیدی از حذف بار، با عنوان حذف بار ولتاژی/ فرکانسی ارائه شد. این مدل حذف بار، تقسیم‌بندی جامعی بر روی بارهای سیستم انجام می‌دهد. با این تقسیم‌بندی، بارهایی که اعاده بار آن‌ها در حین اغتشاش همچنان به‌درستی انجام می‌شود، در سیستم باقی می‌مانند. سپس با توجه به میزان کاهش شاخص حذف بار، اولویت خروج هر بار مجاز را به‌منظور حذف از سیستم مشخص می‌کند. با توجه به احتمال بالای فروپاشی فرکانس به‌همراه ولتاژ، شاخص حذف بار به‌گونه‌ای طراحی شده که علاوه بر ولتاژ، فرکانس سیستم پایدار گردد.

### پیوست‌ها

اطلاعات سیستم ۳۹ شینه در جدول‌های (۶)، (۷) و (۸) ارائه شده است.



شکل (۲۲): پروفیل فرکانس شینه‌ها پس از حذف بار روش پیشنهادی

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌منظور ارزیابی وضعیت پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت، یک شاخص جدید با عنوان شاخص برداری ارائه شده است. این شاخص وضعیت پایداری سیستم قدرت را به‌صورت غیرخطی و در هر لحظه از زمان می‌سنجد. بنابراین در مواردی که روش‌های استاتیکی توانایی سنجش وضعیت پایداری را ندارد، این روش، ارزیابی درستی از وضعیت ولتاژ سیستم دارد. حجم محاسبات شاخص، منجر به استفاده اندکی از حافظه سیستم شده است. به‌علاوه سرعت تشخیص بالا به‌دلیل

جدول (۶): پارامترهای دینامیکی سیستم استاندارد ۳۹ شینه IEEE [۲۱، ۲۶ و ۲۷]

شماره واحد	H(s)	x <sub>l</sub>	T <sub>qo</sub>	T <sub>do</sub>	x <sub>q</sub>	x <sub>d</sub>	x' <sub>q</sub>	x' <sub>d</sub>	R <sub>a</sub>
۱	۵۰۰	۰/۰۰۳	۰/۷	۷	۰/۰۱۹	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰
۲	۳۰/۳	۰/۰۳۵	۱/۵	۶/۵۶	۰/۲۸۲	۰/۲۹۵	۰/۱۷	۰/۰۶۹۷	۰
۳	۳۵/۸	۰/۰۳۰۴	۱/۵	۵/۷	۰/۲۳۷	۰/۲۴۹۵	۰/۰۸۷۶	۰/۰۵۳۱	۰
۴	۲۸/۶	۰/۰۲۹۵	۱/۵	۵/۶۹	۰/۲۵۸	۰/۲۶۲	۰/۱۶۶	۰/۰۴۳۶	۰
۵	۲۶	۰/۰۵۴	۰/۴۴	۳/۴	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۱۶۶	۰/۱۳۲	۰
۶	۳۴/۸	۰/۰۲۲۴	۰/۴	۷/۳	۰/۲۴۱	۰/۲۵۴	۰/۰۸۱۴	۰/۰۵	۰
۷	۲۶/۴	۰/۰۳۲۲	۱/۵	۵/۶۶	۰/۲۹۲	۰/۲۹۵	۰/۱۶۶	۰/۰۴۹	۰
۸	۲۴/۳	۰/۰۲۸	۰/۴۱	۶/۷	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۰۹۱۱	۰/۰۵۷	۰
۹	۳۴/۵	۰/۰۲۹۸	۱/۹۶	۴/۷۹	۰/۲۰۵	۰/۲۱۰۶	۰/۰۵۸۷	۰/۰۵۷	۰
۱۰	۴۲	۰/۰۱۲۵	۰	۱۰/۲	۰/۰۶۹	۱	۰/۰۰۸	۰/۰۳۱	۰

جدول (۷): بارهای سیستم انتقال استاندارد ۳۹ شینه IEEE [۲۱، ۲۶ و ۲۷]

شینه بار	توان راکتیو (مگاوات)	توان راکتیو (مگاوات)	شینه بار	توان اکتیو (مگاوات)	توان راکتیو (مگاوات)
۲۳	۲۴۷	۸۴	۳	۱۰۰۰ (موتور)	۲/۴
۲۴	۳۰۸/۶	-۹۲/۲	۴	۵۰۰	۱/۰۳
۲۵	۲۲۴	۴۷/۲	۷	۲۳۳/۸	۸۴۰
۲۶	۱۳۹	۱۷	۸	۵۲۲	۱۷۶
۲۷	۲۸۱	۷۵/۵	۱۲	۸/۵	۸۸
۲۸	۲۰۶	۲۷/۶	۱۵	۳۰	۱۵۳
۲۹	۲۸۳/۵	۱۲۶/۹	۱۶	۳۲۹/۴	۳۲۳
۳۱	۹/۲	۴/۶	۱۵	۱۰۰۰ (موتور)	۳۰
۳۹	۱۱۰۴	۲۵۰	۲۰	۶۸۰	۱۰۳
			۲۱	۶۸۰	۱۰۳

جدول (۸): توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها سیستم ۳۹ شیئته IEEE

ژنراتور	شیئته	نوع شیئته	P(MW)	Q(Mvar)
G1	۳۹	PV	۱۰۰۰	۱/۰۳
G2	۳۱	Slack	N.A	۰/۹۸
G3	۳۲	PV	۶۵۰	۰/۹۸۳۱
G4	۳۳	PV	۶۳۲	۰/۹۹۷۲
G5	۳۴	PV	۵۰۸	۱/۰۱۲۳
G6	۳۵	PV	۶۵۰	۱/۰۴۹۳
G7	۳۶	PV	۵۶۰	۱/۰۶۳۵
G8	۳۷	PV	۵۴۰	۱/۰۲۷۸
G9	۳۸	PV	۸۳۰	۱/۰۲۶۵
G10	۳۰	PV	۲۵۰	۱/۰۴۷۵

### فهرست علائم

$Q_g$	توان راکتیو تولیدی ژنراتور
$S_g$	توان ظاهری ژنراتور
$Q_i$	توان راکتیو بار
$I$	جریان عبوری از خط انتقال
$Q_{ref}$	توان راکتیو تزریقی به شیئته متصل به شیئته ژنراتوری قبل از اغتشاش
$P_i^{int}$	مقدار شاخص توان اکتیو شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $i$ در حین اغتشاش داخلی شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $j$
$P_i^{ex}$	مقدار شاخص توان اکتیو شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $i$ در حین اغتشاش خارجی
$P_j^{ex}$	مقدار شاخص توان اکتیو شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $j$ در حین اغتشاش خارجی
$P_{1,i}(t)$	توان اکتیو تزریقی به شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $i$ در هر لحظه از زمان
$P_{1,j}(t)$	توان اکتیو تزریقی به شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $j$ در هر لحظه از زمان
$P_{2,i}(t)$	توان اکتیو خروجی از شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $i$ در هر لحظه از زمان
$P_{2,j}(t)$	توان اکتیو خروجی از شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $j$ در هر لحظه از زمان
$P_{loss}^i$	تلفات توان اکتیو خط انتقال متصل به شیئته بار $i$
$P_{inj}^i$	توان اکتیو تزریقی به شیئته بار $i$
$P^i(t)$	توان اکتیو شیئته بار $i$ در هر لحظه از زمان
$P_{inj}^i(t)$	توان اکتیو تزریقی به شیئته بار $i$ در هر لحظه از زمان

### مراجع

[1] Kundur, P., Balu, N. and Lauby, M., *Power system stability and control*, London, U.K.: Mc- Graw-Hill: 1994.

[2] Cutsem, TV. and Vournas, C., *Voltage stability of electric power systems*, Springer, 2008.

$P_{inj,ref}^i$	توان اکتیو تزریقی به شیئته بار $i$ قبل از اغتشاش
$P_{inj}^i$	مقدار توان اکتیو تزریقی به شیئته بار $i$
$v_{l_i}$	مقدار ولتاژ شیئته بار $i$
$v_{l_i}^{ref}$	ولتاژ شیئته بار $i$ قبل از اغتشاش
$v_{l_i}(t)$	ولتاژ شیئته بار $i$ در هر لحظه از زمان
$\dot{v}_{l_i}$	مقدار مشتق ولتاژ شیئته بار $i$
$P_g$	توان اکتیو تولیدی ژنراتور
$X$	امپدانس خط انتقال
$E$	ولتاژ تولیدی ژنراتور
$L.S_i$	شاخص حذف بار برای شیئته بار $i$
$P_{ref}$	توان اکتیو تزریقی به شیئته متصل به شیئته ژنراتوری قبل از اغتشاش
$Q_i^{int}$	مقدار شاخص توان راکتیو شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $i$ در حین اغتشاش داخلی شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $j$
$Q_i^{ex}$	مقدار شاخص توان راکتیو شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $i$ در حین اغتشاش خارجی
$Q_j^{ex}$	مقدار شاخص توان راکتیو شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $j$ در حین اغتشاش خارجی
$Q_{1,i}(t)$	توان راکتیو تزریقی به شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $i$ در هر لحظه از زمان
$Q_{1,j}(t)$	توان راکتیو تزریقی به شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $j$ در هر لحظه از زمان
$Q_{2,i}(t)$	توان راکتیو خروجی از شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $i$ در هر لحظه از زمان
$Q_{2,j}(t)$	توان راکتیو خروجی از شیئته متصل به شیئته ژنراتوری $j$ در هر لحظه از زمان
$Q_{loss}^i$	تلفات توان راکتیو خط انتقال متصل به شیئته بار $i$
$Q_{inj}^i$	توان راکتیو تزریقی به شیئته بار $i$
$Q^i(t)$	توان راکتیو شیئته بار $i$ در هر لحظه از زمان
$Q_{inj}^i(t)$	توان راکتیو تزریقی به شیئته بار $i$ در هر لحظه از زمان
$Q_{inj,ref}^i$	توان راکتیو تزریقی به شیئته بار $i$ قبل از اغتشاش
$Q_{inj}^i$	مقدار توان راکتیو تزریقی به شیئته بار $i$
$f_{l_i}$	مقدار فرکانس شیئته بار $i$
$f_{l_i}^{ref}$	فرکانس شیئته بار $i$ قبل از اغتشاش
$f_{l_i}(t)$	فرکانس شیئته بار $i$ در هر لحظه از زمان
$\dot{f}_{l_i}$	مقدار مشتق فرکانس شیئته بار $i$

- [3] Talaat M., Hatata, AY., Alsayyari, AS. and Alblawi, A., "A smart load management system based on the grasshopper optimization algorithm using the under-frequency load shedding approach", Energy, Vol. 190, No. 1, pp. 1-16, 2020.
- [۴] دودانگه، مصطفی، غفارزاده، نوید، «جایابی بهینه HTSFLها با در نظر گرفتن امنیت، پایداری و هماهنگی رله‌های جریان زیاد و انتخاب هوشمند مشخصه رله جریان زیاد در شبکه‌های متصل به نیروگاه بادی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه ۲۹-۱۲، ۱۳۹۹.
- [5] Marujo, D., Zambroni de Souza, AC., Lopes, BIL., Santos, M.V. and Lo, KL., "On Control Actions Effects by Using QV Curves", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 3, pp. 1298-12305, 2015.
- [6] Zhu, R. and Liu, CC., "Online voltage stability monitoring and control using limited synchrophasor measurements", IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT pp. 1-5, 2015
- [7] Mohammadniaei, M., Namdari, F. and Shakarami, MR., "Voltage Collapse Detection and Prevention Based on PMUs Measurement", International Power System Conference (PSC) IEEE 2019, pp. 497-503.
- [8] Su, H-Y. and Liu, C-W., "Estimating the Voltage Stability Margin Using PMU Measurements", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 4, pp. 3221-3229, 2016.
- [9] Liu, J-H. and Chu, C-C., "Wide-Area Measurement-Based Voltage Stability Indicators by Modified Coupled Single-Port Models", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 2, pp. 756-764, 2014.
- [10] Dasgupta, S., Paramasivam, M., Vaidya, U. and Ajarapu, V., "Real-Time Monitoring of Short-Term Voltage Stability Using PMU Data", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 4, pp. 3702-3711, 2013.
- [11] El-Fergany, AA. and Hasanien, HM., "Salp swarm optimizer to solve optimal power flow comprising voltage stability analysis", Neural Computing and Applications Vol. 32, No. 9, pp. 5267-5283, 2020.
- [۱۲] باقری، امیر، ربیعی، عباس، گلوآنی، سجاد، فلاحی، فرزاد، «جایابی بهینه ادوات FACTS در شبکه برق منطقه‌ای گیلان با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات مبتنی بر DPL نرم‌افزار DigSILENT»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه ۲۵-۱۴، ۱۳۹۹.
- [13] Pérez-Londoño, S., Rodríguez, LF. and Olivar, G., "A simplified voltage stability index (SVSI)", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 63, pp. 806-813, 2014.
- [14] Mohammadniaei, M., Namdari, F. and Shakarami, MR., "A Novel Zoning Index for Protecting Power Systems against Voltage Collapse", 31th International Power System Conference (PSC), pp. 2147-2151, 2016.
- [15] Alzaareer, K., Saad, M., Mehrjerdi, H., Ziad El-Bayeh, C., Asber, D. and Lefebvre, S., "A new sensitivity approach for preventive control selection in real-time voltage stability assessment", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 122, pp. 1-10, 2020.
- [16] Lee, DHA., "Voltage Stability Assessment Using Equivalent Nodal Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 1, pp. 454-463, 2016.
- [17] Xu, Y., Liu, W. and Gong, J., "Stable multi-agent-based load shedding algorithm for power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 2006-2014, 2011.
- [18] Sayed, F., Kamel, S., Yu, J. and Jurado, F., "Optimal Load Shedding of Power System Including Optimal TCSC Allocation Using Moth Swarm Algorithm", Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering, Vol. 44, No. 2, pp. 741-765, 2020.
- [19] Tang, J., Member, GS., Liu, J. and Member, GS., "Adaptive Load Shedding Based on Combined Frequency and Voltage Stability Assessment Using Synchrophasor Measurements", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 2, pp. 2035-2047, 2013.
- [20] Mehrabi, K., Golshannavaz, S. and Afsharnia, S., "An improved adaptive wide-area load shedding scheme for voltage and frequency stability of power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 821-842, 2019.
- [21] Singh, S K. and Srivastava, SC., "A Synchrophasor Assisted Frequency and Voltage Stability Based Load Shedding Scheme for Self-Healing of Power System", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No. 2, pp. 221-230, 2011.
- [22] Ariff, MAM. and Pal, BC., "Adaptive Protection and Control in the Power System for Wide-Area Blackout Prevention", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 4, pp. 1815-1825, 2016.
- [23] Bertsch, J., Carnal, C., Karlsson, D., McDaniel, J. and Vu K., "Wide-area protection and power system utilization", Proc. IEEE, vol. 93, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 97, No. 5, pp. 997-1003, 2005.
- [24] Li, H., Bose, A. and Venkatasubramanian, VM., "Wide-Area Voltage Monitoring and Optimization", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 2, pp. 785-793, 2015.
- [25] Mohammadniaei, M., Namdari, F., Valadbeigi, AP. and Shakarami, MR., "A new method for analyzing the probability of voltage and frequency stability status based on Markov Chain", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 125, Article 106500, 2021.
- [26] Zhang, Z., Yue, P. and Shi, W., "A new method for over-voltage online monitoring based on chain parameters", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC pp. 1-4, 2010.
- [27] Zimmerman, RD., Murillo-Sanchez, CE. and Thomas, RJ., "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 1, pp. 12-19, 2011.
- [28] Adewuyi, OB., Shigenobu, R., Ooya, K., Senjyu, T. and Howlader, AM., "Static voltage stability improvement with battery energy storage considering optimal control of active and reactive power injection", Electric Power Systems Research, Vol. 172, pp. 303-312, 2019.
- [29] Musirin, I. and Abdul Rahman, TK., "Novel fast voltage stability index (FVSI) for voltage stability analysis in power transmission system", Student Conference on Research and Development: Globalizing Research and Development in Electrical and Electronics Engineering, SCORED, pp. 265-268, 2002.