

حفاظت ناحیه گسترده به منظور پیشگیری از فروپاشی ولتاژ به کمک یک شاخص ترکیبی به‌هنگام جدید

فرهاد نامداری^۱، استادیار، لیلا حاتم‌وند^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد، نادر شجاعی^۳، مربی

۱- دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق، قدرت - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - namdari.f@lu.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق، قدرت - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - hatamvand.le@fe.lu.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق، قدرت - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران - shojae.n@lu.ac.ir

چکیده: خاموشی سراسری در شبکه‌های قدرت به دلایل مختلفی اتفاق می‌افتد. فروپاشی ولتاژ به عنوان یکی از مهم‌ترین این دلایل به خصوص طی سال‌های اخیر گزارش شده است، از این رو اهمیت بررسی موضوع فروپاشی ولتاژ آشکار می‌شود. در این راستا مقاله پیش رو هدف تحقیق در زمینه پایداری گذرای ولتاژ و جلوگیری از فروپاشی را در پیش گرفته و برای رسیدن به هدف خود از سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده استفاده می‌کند. به منظور ارزیابی گذرای پایداری ولتاژ از یک شاخص ترکیبی جدید که عملکرد سریعی در ارزیابی دارد استفاده شده است. فروپاشی ولتاژ ریشه در کمبود توان راکتیو در شبکه دارد. از این رو شاخص جدید سه‌بخشی مورد استفاده، در یکی از بخش‌های خود توان راکتیو تولیدی کل سیستم را مورد پایش قرار می‌دهد. حوادث مهمی همچون از دست رفتن واحدهای تولیدی، قطع خطوط مهم شبکه و افزایش در بارگذاری به عنوان نمونه‌هایی هستند که در مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج شبیه‌سازی طرح مقاله در محیط نرم‌افزار DigSILENT بر روی شبکه دینامیکی ۳۹ شینه IEEE عملکرد سریع‌تر و مطمئن‌تر طرح پیشنهادی را نسبت به روش‌های نظیر نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پایداری ولتاژ، واحد اندازه‌گیری فازوری، شاخص گذرای ارزیابی، حذف بار تطبیقی

Wide Area Protection against Voltage Collapse using a Novel Online Composite Index

F. Namdari¹, L. Hatamvand², N. Shojaei³

1, 2 & 3- Faculty of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Abstract: One of the three aspects of the stability in power systems is voltage stability. Since voltage collapse can be a reason of the global blackout in power networks, the importance of this study is revealed. In this regard, this paper focuses on transient voltage stability problem and to achieve this goal we use wide area measurement system. To transient voltage stability assessment, a novel fast index is used. The index in one of its three parts monitors the produced reactive power in the network. Important events like generator outage, line outage and load increasing are studied in the paper. Simulation results in the DIGSILENT Power Factory software on IEEE 39 buses dynamic system demonstrate the efficiency of proposed approach with respect to other methods.

Keywords: Voltage Stability, Phasor Measurement Unit, Transient assessment Index, Adaptive Load Shedding.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۹/۱۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۹

نام نویسنده مسئول: دکتر فرهاد نامداری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خرم‌آباد - کیلومتر ۵ جاده بروجرد - دانشگاه لرستان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق، قدرت

۱- مقدمه

هدف [۱۱] نیز جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در شرایط پر تنش سیستم و افزایش ظرفیت باردهی شبکه عنوان شده است. تحقیق روی پایداری ولتاژ با دینامیک طولانی مدت و درحالی که از سیستم^۱ SCADA برای حصول و پردازش اطلاعات استفاده می شود تمرکز دارد.

در [۱۴-۱۲] تنظیم ناحیه گسترده^۲ ولتاژ و یک طرح حفاظت ناحیه گسترده^۳ برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ مطرح می شود و در آن ها به حفاظت ناحیه گسترده به عنوان یک طرح کنترلی اضطراری نگریسته می شود. حفاظت ناحیه گسترده و تنظیم ناحیه گسترده درعین حال که باید وظایف مختلف خود را به موقع انجام دهند لازم است با همدیگر هماهنگ باشند. در راستای این طرح، سه فاز تنظیم ولتاژ اولیه، ثانویه و ثالثیه صورت می پذیرد. نتایج این طرح بر روی شبکه واقعی شمال ایتالیا مورد مطالعه قرار گرفته است. [۱۵] به کمک شبکه گسترده ای از واحدهای اندازه گیری فازوری^۴ ناپایداری را بادی های برنجی حاشیه پایداری و مقدار ذخیره توان راکتیو واحدهای تولیدی تشخیص می دهد. در نقطه فروپاشی که در آن توان انتقالی ماکزیمم می شود، مقدار افت ولتاژ روی خط برابر با ولتاژ محل بار می شود. بنابراین شاخص ناپایداری را به صورت نسبت این دو مقدار تعریف کرده است.

مرجع [۱۶] سه طرح حذف بار تطبیقی را برای مقابله با حوادث وخیم در شبکه پیشنهاد می دهد. هدف، بهبود پایداری فرکانسی و پایداری ولتاژ و در نتیجه افزایش حاشیه پایداری حین اغتشاشات بزرگ عنوان شده است. سیگنال های ولتاژ و فرکانس به صورت زمان-واقعی^۵ پایش می شوند و از روی آن ها و با توجه به یک منحنی تحت عنوان منحنی معیار طرح حذف بار اجرا می شود.

همه تحقیقات و روش های مرتبط با موضوع حفظ پایداری ولتاژ که در بالا به برخی از مهم ترین آن ها اشاره شد، یا بر اساس معادلات پخش بار شبکه شکل گرفته و در نتیجه بیش تر برای ارزیابی استاتیک یا حالت ماندگار شبکه مناسب تر هستند و یا این که دارای مراحل محاسباتی پیچیده و زمان بر هستند که این نیز از سرعت تحلیل آن ها برای دوره گذرا می کاهد. بنابراین ارزیابی پایداری ولتاژ در دوره گذرا مستلزم استفاده از روش ها و شاخص های با سرعت بالا و درعین حال دقیق است. در [۱۷] به عنوان آخرین راه نجات سیستم قدرت در شرایط پرتنش جهت جلوگیری از ناپایداری و حرکت به سمت فروپاشی ولتاژ و فرکانس اجرای یک طرح حذف بار پیشنهاد شده است. ایده پیاده سازی این طرح به صورت تطبیقی با شرایط شبکه با استفاده از یک شاخص ارزیابی فرکانس و یک شاخص دینامیکی ارزیابی پایداری ولتاژ عنوان شده است. از $VSRP$ در محل هر باس مصرفی و یک شاخص که عدم توازن توان اکتیو را بیان می کند، به ترتیب برای پایش پایداری ولتاژ و فرکانس شبکه استفاده شده است. $VSRP$ دارای روند محاسباتی بسیار ساده ای بوده و استفاده از سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده در شبکه نیز محاسبه سریع آن را ممکن می سازد. اما با این وجود برای اعلام هشدار حرکت به سمت فروپاشی

بقای یک سیستم قدرت در گرو داشتن عملکردی پایدار است. پایداری ولتاژ یکی از جنبه های پایداری است که مطالعه در زمینه آن، حفاظت شبکه های قدرت را در مقابل آسیب های جدی یاری می دهد. مساله خاموشی سراسری که در مواردی به دلیل فروپاشی ولتاژ در شبکه اتفاق می افتد [۱]، چالش جدیدی در شبکه های قدرت مدرن شده است. شبکه هایی که مقادیر بزرگ توان را طی مسافت های طولانی انتقال می دهند اما به دلیل محدودیت های اقتصادی و مسائل زیست محیطی امکان توسعه بیش تر ندارند [۲]. به هر حال تامین نیاز مصرف کنندگان وظیفه اصلی شبکه های قدرت بوده و محقق شدن این هدف جز با غلبه بر چنین مسائلی میسر نمی شود.

تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه حفظ پایداری ولتاژ و جلوگیری از رسیدن به مرحله ی پدیده فروپاشی انجام شده است. مرجع [۳] شاخص پایداری ولتاژی ارائه می دهد که به دلیل سادگی محاسبات مناسب برای مقاصد حفاظتی است. این شاخص برای خطوط شبکه با مدل π تعریف شده است.

هدف [۴-۵] پیاده سازی یک طرح حذف بار بهینه چندهدفه به منظور بهبود پایداری و پروفیل ولتاژ با حداقل حذف بار ممکن است.

مرجع [۶] هدف تعیین موثرترین اقدامات کنترلی به منظور به کارگیری منابع افزایش توان راکتیو در سرتاسر شبکه را دنبال می کند. به این صورت که ابتدا حساسیت ذخیره ی توان راکتیو در شبکه نسبت به اعمال کنترلی ممکن محاسبه شده و سپس از طریق یک بهینه سازی، برای حداقل عمل کنترلی لازم جهت افزایش ذخیره توان راکتیو تصمیم گیری می شود. بدین ترتیب روش فوق می تواند حاشیه های مناسب پایداری را حفظ کند.

مرجع [۷] با استفاده از سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده و به کمک الگوریتم درخت تصمیم گیری به ارزیابی به هنگام پایداری ولتاژ برای جلوگیری از وقوع خاموشی در مقیاس بزرگ پرداخته است. این روش مطالعه حالت ماندگار پایداری ولتاژ را با استفاده از تغییرات روزانه تولید و بار بررسی می کند. [۸] نیز با استفاده از تحلیل معادلات پخش بار در شبکه پایداری ولتاژ را در حالت ماندگار مورد بررسی قرار داده و در نتیجه جنبه دینامیکی قدرت مندی ندارد.

در [۹] طرح حفاظت هماهنگ سیستم در برابر فروپاشی ولتاژ بر اساس روش کنترل پیش بین مدل و جستجوی درخت ارائه شده است. این طرح انواع کنترل های موجود در شبکه همچون کنترل روی ژنراتورها، مکان پله تنظیم ترانس های دارای ویژگی تغییر پله تنظیم و کنترل های روی حذف بار را با در نظر گرفتن قیود مربوطه به صورت بهینه با هم هماهنگ کرده و در مقایسه با طرح های کلاسیک نظیر خود عملکرد مناسب تری دارد.

مرجع [۱۰] یک شاخص خطی برای ارزیابی پایداری ولتاژ استفاده می کند و عمده تمرکز خود را بر روی مدل سازی دینامیکی بارهای از نوع موتور القایی قرار داده است.

ولتاژ، گذشت مدت زمان ۵ ثانیه پس از حادثه در نظر گرفته شده است. این موضوع در حالی است که در مواردی ناپایداری ولتاژ در مدت زمانی کم تر از ۵ ثانیه شبکه را به سمت فروپاشی می کشاند. به همین منظور در تحقیق حاضر نیز به کمک سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده به ارزیابی گذرای پایداری ولتاژ و اجرای طرح های کنترلی و اقدامات حفاظتی مثل حذف بار پرداخته شده است. هدف مقاله پیش رو در واقع ارائه یک شاخص ترکیبی به هنگام جدید برای ارزیابی پایداری گذرای ولتاژ است که می تواند با اجرای حذف بار از فروپاشی ولتاژ به هنگام حوادث سنگین جلوگیری کند. لازم به ذکر است که شاخص پیشنهادی نسبت به $VSRI$ به اندازه ی ۳ ثانیه سریع تر بوده و به دلیل پایش نرخ ولتاژ و نیز نرخ توان راکتیو تولیدی در شبکه شاخص قابل اعتمادتری است. نمونه های شبیه سازی گواهی بر این مدعا خواهند بود.

۳- شاخص ترکیبی بهنگام جدید

همان گونه که قبلاً ذکر شد $VSRI$ دارای مراحل محاسباتی ساده بوده و پس از ۵ ثانیه قدرت ارزیابی پایداری ولتاژ را دارد. اما در تحقیق پیش رو هدف این است که با به کارگیری شاخصی دیگر که آن هم بر اساس روش اندازه گیری محاسبه می شود به یک ارزیابی سریع تر و مطمئن تر از پایداری ولتاژ دست یافت. به همین منظور شاخص پیشنهادی مقاله تحت عنوان $VSRI^{am}$ ترکیبی از سه بخش و به ترتیب شامل نرخ تجمعی تولید توان راکتیو کل توسط ژنراتورهای شبکه $(Q-ar^a)$ ، نرخ تجمعی ولتاژ باس های مصرفی $(V-ar^a)$ و یک بخش $VSRI-am^1$ است.

۳-۱- محاسبه $VSRI-am$

فرض می شود که واحدهای اندازه گیری فازوری در فرکانس ۶۰ هرتز در هر ۱ ثانیه تعداد ۳۰ پنجره نمونه برداری استفاده می کنند [۲۱]. با استفاده از روش نمونه برداری بازگشتی به طوری که در هر لحظه داده های ۲ ثانیه قبل در محاسبات مدنظر باشند، نسبت به محاسبه $VSRI-am$ اقدام می شود:

مرحله اول: فرض می شود با استفاده از واحد اندازه گیری فازوری از یک موج بردار M عضوی زیر اندازه گیری شده باشد:

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_M] \quad (1)$$

که اعضای $y_i, i=1, 2, \dots, M$ همان ولتاژ باس های مصرفی و به صورت مقادیر موثر هستند.

مرحله دوم: z امین مقدار متوسط متحرک یا به عبارتی میانگین به روش بازگشتی برای اعضای بردار بالا به صورت زیر تعریف می شود:

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^j y_i}{j}, \quad j=1, 2, \dots, N \quad \text{اگر } j \leq N \quad (2)$$

$$v_j = \frac{\sum_{i=j-N+1}^j y_i}{N}, \quad j = N+1, \dots, M \quad \text{اگر } j > N \quad (3)$$

N تعداد مقادیر متوسطی است که در هر دوره بازگشتی که به اندازه ۲ ثانیه منظور شده، محاسبه می شود و در این مقاله عدد ۶۰ برای آن در نظر گرفته شده است.

ولتاژ، گذشت مدت زمان ۵ ثانیه پس از حادثه در نظر گرفته شده است. این موضوع در حالی است که در مواردی ناپایداری ولتاژ در مدت زمانی کم تر از ۵ ثانیه شبکه را به سمت فروپاشی می کشاند. به همین منظور در تحقیق حاضر نیز به کمک سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده به ارزیابی گذرای پایداری ولتاژ و اجرای طرح های کنترلی و اقدامات حفاظتی مثل حذف بار پرداخته شده است. هدف مقاله پیش رو در واقع ارائه یک شاخص ترکیبی به هنگام جدید برای ارزیابی پایداری گذرای ولتاژ است که می تواند با اجرای حذف بار از فروپاشی ولتاژ به هنگام حوادث سنگین جلوگیری کند. لازم به ذکر است که شاخص پیشنهادی نسبت به $VSRI$ به اندازه ی ۳ ثانیه سریع تر بوده و به دلیل پایش نرخ ولتاژ و نیز نرخ توان راکتیو تولیدی در شبکه شاخص قابل اعتمادتری است. نمونه های شبیه سازی گواهی بر این مدعا خواهند بود.

۲- حفاظت ناحیه گسترده و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ

۲-۱- حفاظت ناحیه گسترده

در طرح های کلاسیک حفاظت سیستم های قدرت برای هر تجهیز مهم یک حفاظت خاص طراحی شده و بدین ترتیب از شبکه در مقابل حوادث احتمالی محافظت به عمل می آید. این گونه طرح های حفاظتی دارای سرعت عملکرد بالا هستند اما باید توجه داشت که در صورت عملکرد اشتباه هر کدام از تجهیزات حفاظتی که به دلایل مختلف می تواند باشد، نه تنها عمل حفاظتی می تواند نابجا باشد بلکه می تواند باعث عمل اشتباه سایر تجهیزات نیز بشود و بدین ترتیب دسته بزرگی از برون رفت های غیر ضروری اتفاق افتد، روندی که می تواند همه یا بخش بزرگی از شبکه را به سمت خاموشی بکشاند؛ چالشی که تحت عنوان خاموشی سراسری به خصوص طی سال های اخیر برای شبکه های قدرت مساله ساز شده است. بنابراین نیاز به طرح های حفاظتی جامع مثل حفاظت ناحیه گسترده است تا بتوان از به وجود آمدن چنین وضعیتی جلوگیری کرد. طرح حفاظتی که در آن با استفاده از سیستم اندازه گیری گسترده همه اطلاعات شبکه به یک مرکز کنترل ارسال شده و با پایش جامع سیستم تصمیم گیری های کلان به عمل می آید تا از وقوع خاموشی سراسری جلوگیری شود [۱۸].

۲-۲- فروپاشی ولتاژ

فروپاشی ولتاژ پدیده ای فراگیر است البته با این تعریف که اغتشاشی محلی مانند خروج واحدهای تولیدی بزرگ، قطع خطوط مهم شبکه و... می تواند سیستم را به سمت برون رفت گسترده ای سوق دهد. برای مهار چنین پدیده فراگیری یک طرح حفاظتی فراگیر باید اندیشیده شود [۱۹]. امروزه در سیستم های قدرت مدرن چنین طرح ها و ارزیابی های جامع از شبکه با استفاده از سیستم اندازه گیری ناحیه

موضوع را تایید خواهند کرد. مقادیر آستانه پس از معرفی مختصر شبکه‌ی مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه می‌شوند.

۳-۳- حذف بار تطبیقی

حذف بار به عنوان آخرین راه نجات سیستم قدرت از حرکت به سمت فروپاشی ولتاژ در هنگام وقوع حوادث سنگین مد نظر است. در این مقاله از یک روش تطبیقی برای پیاده‌سازی حذف بار استفاده می‌شود. با این توضیح که بعد از اعلام هشدار فروپاشی ولتاژ توسط $VSOI$ ، برای تعداد پنج باس مصرفی از شبکه که دارای $VSRI-am$ بزرگ‌تری هستند نسبت مقدار $VSRI-am$ هر یک به مجموع $VSRI-am$ پنج باس، درصد لازم برای حذف بار از هر باس را بیان می‌کند. نمودار جریانی این روش در شکل (۱) مشاهده می‌شود.

$$LSP_i^{**} = \frac{VSRI - am_i}{\sum_{i=1}^5 VSRI - am_i}, i = 1, \dots, 5 \quad (۸)$$

این حذف بار ۰/۲ ثانیه پس از پیش‌بینی فروپاشی انجام می‌شود تا به این ترتیب تاخیر کانال‌های مخابراتی در ارسال اطلاعات به مرکز کنترل منظور شود.

مرحله سوم: در این قسمت درصد انحراف بین Z آمین مقدار اندازه‌گیری و Z آمین مقدار متوسط متحرک نظیر محاسبه می‌شود. این مقدار در واقع بیانگر حساسیت لحظه‌ای ولتاژ است:

$$d_j = \frac{y_j - v_j}{v_j} \times 100, j = 1, \dots, M \quad (۴)$$

مرحله چهارم: این بخش شامل استخراج Z آمین $VSRI$ با استفاده از قاعده انتگرال‌گیری دوزنقه‌ای و با توجه به دو شرط است. لازم به ذکر است که این انتگرال‌گیری از روی مساحتی که منحنی N بخشی درصد انحراف با محور زمان تشکیل می‌دهد، انجام می‌شود.

$$VSRI_j = \frac{1}{j} \left[\frac{\sum_{i=1}^j (d_i + d_{i-1}) \Delta t}{2} \right], \quad \text{اگر } j \leq N \quad (۵)$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

$$VSRI_j = \frac{1}{N} \left[\frac{\sum_{i=j-N+1}^j (d_i + d_{i-1}) \Delta t}{2} \right] \quad \text{و اگر } j > N \quad (۶)$$

$$j = N+1, \dots, M$$

به Δt که زیربازه انتگرال‌گیری به روش دوزنقه‌ای است مقدار ۱ داده می‌شود.

مرحله پنجم: Z آمین $VSRI-am$ به صورت تجمع اندازه‌ی مقادیر به دست آمده از مرحله‌ی قبل محاسبه می‌شود.

$$VSRI_j - am = \sum_{i=1}^j |VSRI_i|, j = 1, 2, \dots, M \quad (۷)$$

۳-۲- حد آستانه‌ی $VSOI$

در [۱۷] مقدار آستانه $VSRI$ با استفاده از شبیه‌سازی‌های مکرر، ۰/۲-پریونیت انتخاب شده است. ۵ ثانیه پس از رخداد حادثه در سیستم از طریق مقایسه شاخص برای هر باس مصرفی با مقدار آستانه در نظر گرفته شده باس یا باس‌های مساله‌دار معلوم می‌شوند و بدین ترتیب در این باس‌ها اقدامات کنترلی و حذف بار صورت می‌گیرد تا از فروپاشی ولتاژ جلوگیری شود اما در واقع در نظر گرفتن این بازه ۵ ثانیه‌ای به دلیل میرا شدن نوسانات $VSRI$ است. پس چنانچه بتوان طول بازه ۵ ثانیه را کاهش داد قطعاً پیش‌بینی فروپاشی ولتاژ سریع‌تر صورت می‌پذیرد و بدین ترتیب بعد از انجام اقدامات لازم پروفیل بهتری از ولتاژهای شبکه را می‌توان انتظار داشت. به همین منظور در مقاله پیشنهادی $VSRI-am$ به عنوان بخشی از $VSOI$ پیشنهاد می‌شود که به صورت تجمع لحظه به لحظه مقادیر اندازه‌ی $VSRI$ تعریف می‌شود. $VSRI-am$ و دو بخش دیگر $VSOI$ که با شبیه‌سازی‌های مکرر مقادیر آستانه‌های مناسبی را برای شبکه ۳۹ شینه می‌گیرند، توانایی ارزیابی صحیح از پایداری گذرای ولتاژ را پس از گذشت یک زمان معین از حادثه دارند. این زمان معین به اندازه ۲ ثانیه برای شبکه ۳۹ شینه منظور شده است. در صورتی که حداقل دو بخش از شاخص سه‌بخشی فراتر از حد مجاز خود رود، شبکه دچار فروپاشی ولتاژ خواهد شد. یادآوری می‌شود که پیش‌بینی سریع‌تر فروپاشی ولتاژ به پروفیل بهتری از ولتاژهای شبکه بعد از اجرای اقدامات کنترلی و حفاظتی منجر خواهد شد. نمونه‌های شبیه‌سازی که در ادامه خواهد آمد این

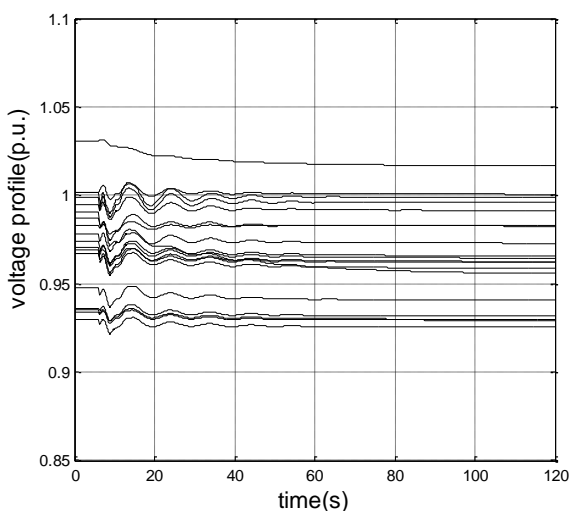
۴-۱- خروج ژنراتور شینه ۳۰

اولین حادثه در شبکه ۳۹ شینه مدل سازی خروج ژنراتور شماره ۱۰ از سیستم در لحظه ۶/۱ ثانیه است. در مورد شبکه مورد مطالعه تجاوز $VSRI-am$ از حد آستانه‌ی خود در مورد حداقل پنج باس، $V-ar$ برای حداقل دو باس و تجاوز $Qg-ar$ از مقدار آستانه خود شرایطی هستند که به عنوان شرایط لازم برای اعلام فروپاشی ولتاژ مد نظر هستند. در صورتی که حداقل دو شرط از سه شرط بالا برقرار باشند، $VSOI$ پس از گذشت ۲ ثانیه از حادثه در سیستم اعلام فروپاشی ولتاژ خواهد کرد. در مورد حادثه فوق مقادیر سه بخش $VSOI$ برای بحرانی‌ترین باس‌های شبکه که نسبت به سایر باس‌ها اوضاع نامناسب‌تری دارند در جدول (۲) مشاهده می‌شود.

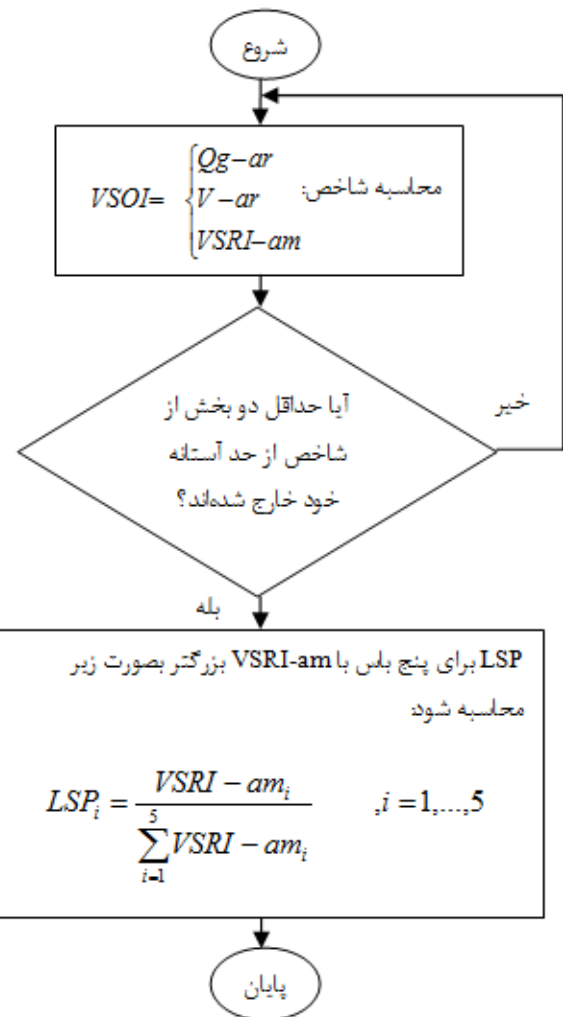
جدول (۲): مقادیر سه بخش $VSOI$ در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۰

Bus number	$Qg-ar$ (MVAR/s)	$VSRI-am$ (p.u.)	$V-ar$ (p.u./s)
20	1.3249e3	2.2128	0.191
23	1.3249e3	1.3594	0.161
21	1.3249e3	1.2757	0.163
29	1.3249e3	1.2743	0.236
24	1.3249e3	1.1528	0.16

از روی این جدول مشاهده می‌شود که $VSOI$ نظر به اعلام عدم فروپاشی ولتاژ را داشته است. زیرا $Qg-ar$ از حد مجاز خود خارج نشده، $VSRI-am$ برای بدترین باس‌ها هم تخلفی نداشته و $V-ar$ نیز در هیچ باسی از مقدار مجاز بیرون نرفته است. شکل (۲) پروفیل ولتاژها پس از رخداد حادثه را نشان می‌دهد. این شکل اعاده‌ی سریع ولتاژها را به تصویر کشانده است.



شکل (۲): پروفیل ولتاژها در حادثه خروج ژنراتور شین ۳۰



شکل (۱): نمودار جریان‌ی طرح حذف بار پیشنهادی

۴-۲ شبکه مورد مطالعه و شبیه‌سازی‌ها

شبکه ۳۹ شینه IEEE_New England با فرکانس نامی ۶۰ هرتز، دارای ۳۶ خط انتقال، ۱۰ ژنراتور و تعداد ۱۲ ترانسفورماتور است [۲۲]. برای هدف شبیه‌سازی دینامیک از مدل مرتبه ۵ ماشین‌های سنکرون به همراه سیستم تحریک از نوع اول IEEE_DC در شبکه استفاده شده است [۲۳]. بار همه شینه‌های مصرفی به صورت استاتیکی وابسته به ولتاژ مدل شده است به جز بارهای موجود در شینه‌های ۳ و ۱۸ که به صورت دینامیکی و با استفاده از مدل موتور القایی پیاده شده‌اند [۱۷].

جدول (۱): مقادیر آستانه برای سه بخش $TVSRI$ در شبکه ۳۹ شینه

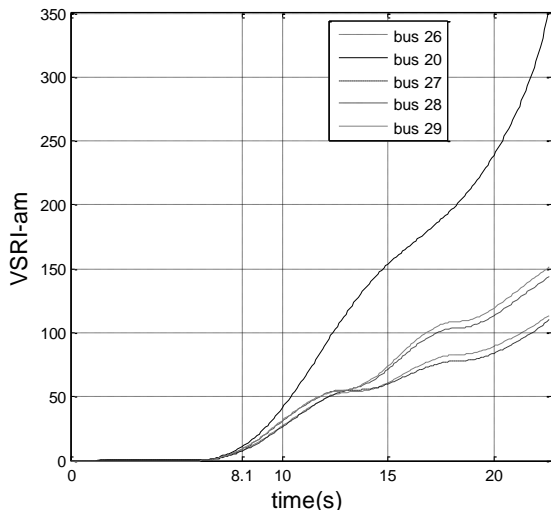
Case study	$Qg-ar$ Threshold (MVAR/s)	$VSRI-am$ Threshold (p.u.)	$V-ar$ Threshold (p.u./s)
39 bus	5.3e3	6	0.6

۴-۲- خروج ژنراتور شینه ۳۳

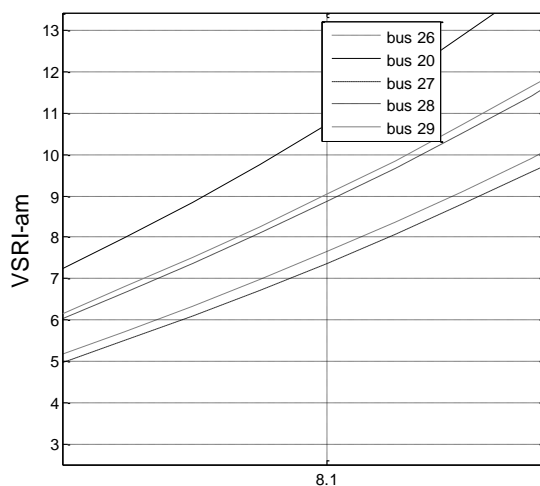
در این قسمت خروج ژنراتور موجود در شینه ۳۳ شبکه یعنی ژنراتور شماره ۴ که فروپاشی ولتاژ را برای سیستم نتیجه می‌دهد شبیه‌سازی می‌شود. خروج در لحظه ۶/۱ ثانیه اتفاق می‌افتد. هم چون حادثه قبل، مقادیر ۲ ثانیه بعد شاخص مورد توجه واقع می‌شوند. مقادیر سه بخش شاخص در جدول (۳) آمده است. از روی این جدول مشخص است که به ترتیب شینه‌های شماره ۲۰، ۲۹، ۲۸، ۲۶ و ۲۷ مقادیر $VSRI-am$ بزرگ‌تری دارند و از حد مجاز بیش‌تر هستند. هم برای شینه‌های ۲۸ و ۲۷ و $Qg-ar$ نیز تخلف کرده‌اند.

جدول (۳): مقادیر سه بخش $VSRI$ در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳

Bus number	$Qg-ar$ (MVAR/s)	$VSRI-am$ (p.u.)	$V-ar$ (p.u./s)
20	5.3196e3	10.7279	0.3
29	5.3196e3	9.0388	0.316
28	5.3196e3	8.859	0.768
26	5.3196e3	7.6538	0.548
27	5.3196e3	7.3731	0.726



شکل (۴): نمودار $VSRI-am$ در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳



شکل (۵): نمودار $VSRI-am$ از نمای بزرگ‌تر در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳

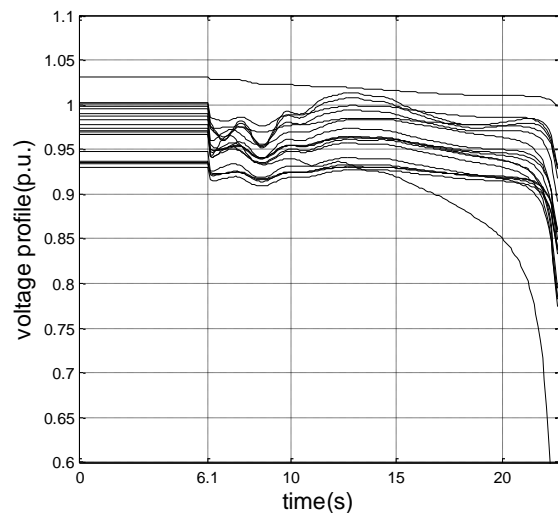
حذف بار تطبیقی: حذف بار برای حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳ در مورد پنج باس با $VSRI-am$ بزرگ‌تر و بعد از ۰/۲ ثانیه از اعلام فروپاشی ولتاژ پیاده می‌شود. جدول (۴) درصد‌های حذف بار را نشان می‌دهد.

جدول (۴): درصد‌های حذف بار در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳

Bus number	$VSRI-am$	LSP
20	10.7279	25
29	9.0388	21
28	8.859	20
26	7.6538	18
27	7.3731	17

ولتاژ باس‌های مصرفی شبکه پس از حذف بار و همگرایی $VSRI-am$ برای باس شماره ۲۰ که مقادیر بزرگ‌تری از شاخص قبل از حذف بار را دارد در شکل‌های (۶) و (۷) مشهود است.

این شرایط نشان از حرکت به سمت فروپاشی ولتاژ دارد. پروفیل ولتاژ باس‌های مصرفی و $VSRI-am$ برای ۵ باس مذکور در شکل‌های (۳) و (۴) نمایان است. شکل (۵) نیز نمای واضحی از مقادیر $VSRI-am$ را نشان می‌دهد.



شکل (۳): پروفیل ولتاژها در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳

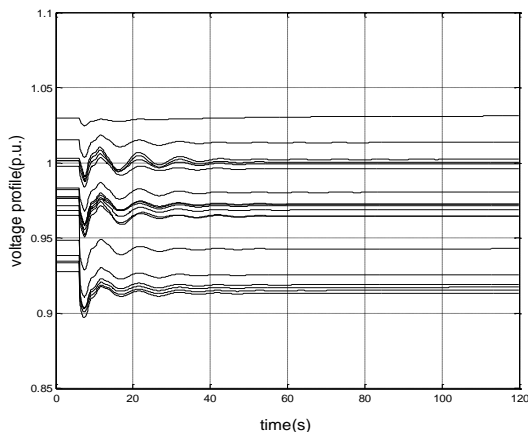
۳-۴- خروج ژنراتور باس ۳۱

در این بخش خروج ژنراتور شماره ۲ به عنوان موردی که فروپاشی را در پیش نخواهد داشت، بررسی می‌شود. جدول (۵) مقادیر سه بخش *VSOI* را در خود دارد.

جدول (۵): مقادیر سه بخش *VSOI* در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۱

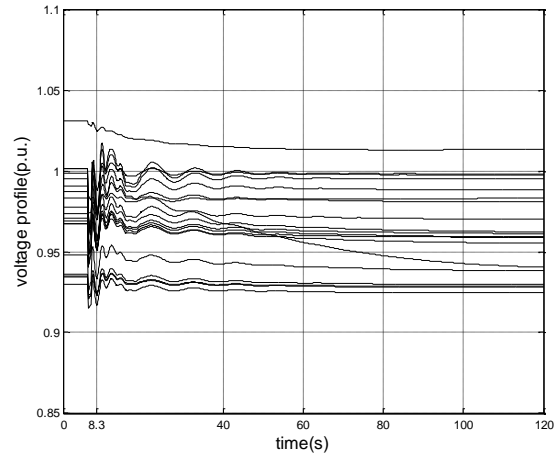
Bus number	Qg-ar (p.u.)	VSRI-am (p.u.)	V-ar (p.u.)
12	3.4298e3	8.4964	0.347
7	3.4298e3	8.9526	0.37
8	3.4298e3	9.3399	0.356
4	3.4298e3	7.5151	0.323
15	3.4298e3	4.498	0.257

از روی این جدول به وضوح مشخص است که حادثه مذکور فروپاشی را در پی نخواهد داشت. زیرا *Qg-ar* و *V-ar* از مقادیر مجاز خود خارج نشده و *VSRI-am* نیز فقط برای تعداد ۴ شینه تخلف کرده است و این‌ها در کنار هم شرایط کافی برای اعلام فروپاشی را تشکیل نمی‌دهند. شکل (۹) نیز اعاده ولتاژها را نشان می‌دهد.

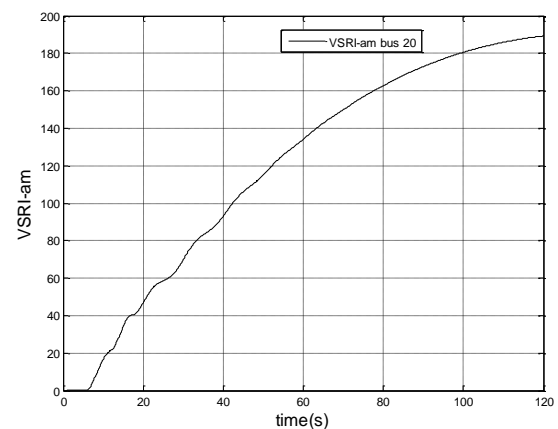


شکل (۹): پروفیل ولتاژها در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۱

آنچه اهمیت دارد تشخیص اشتباه روش *VSRI* در این مورد و در مقابل آن پیش‌بینی درست شاخص پیشنهادی مقاله حاضر است. شکل (۱۰) نمودار *VSRI* را برای شین شماره ۱۲ را نشان می‌دهد.

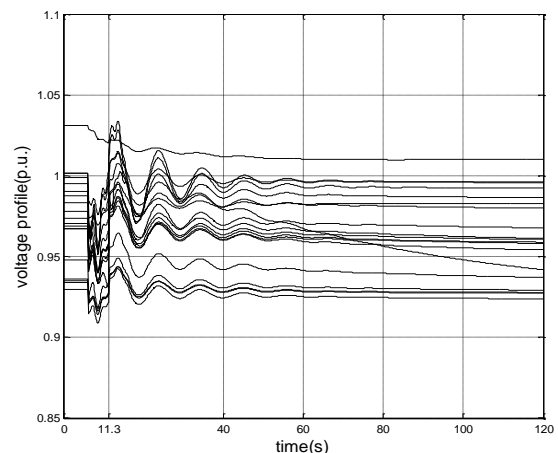


شکل (۶): پروفیل ولتاژها پس از حذف بار برای حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳

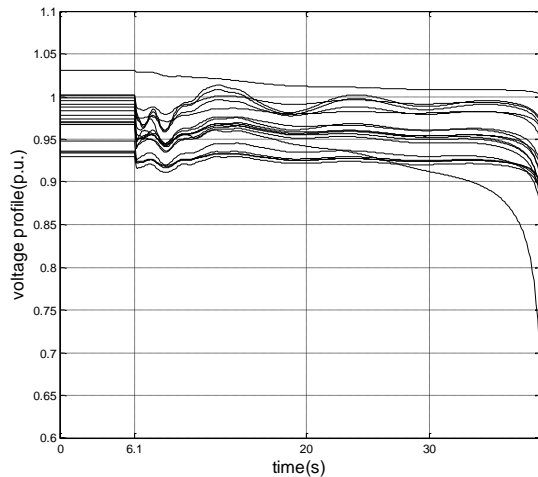


شکل (۷): نمودار همگرایی *VSRI-am* برای باس ۲۰ پس از حذف بار در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳

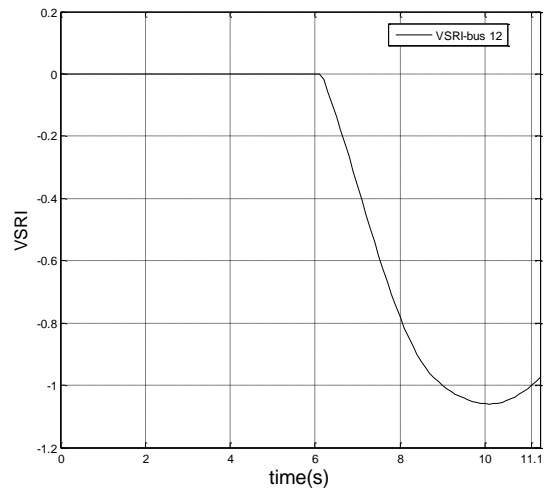
شکل (۸) نیز پروفیل ولتاژی را نشان می‌دهد که بعد از ۵ ثانیه بر اساس پیش‌بینی *VSRI* در مورد حادثه ۲-۴ ایجاد می‌شود. مشاهده می‌شود که حذف بار بر اساس اعلام *VSOI* و مقادیر *VSRI-am* پروفیل ولتاژ مسطح‌تری را نتیجه می‌دهد.



شکل (۸): پروفیل ولتاژ پس از حذف بار بر اساس تشخیص *VSRI* در مورد حادثه ۲-۴



شکل (۱۱): پروفیل ولتاژها در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۶

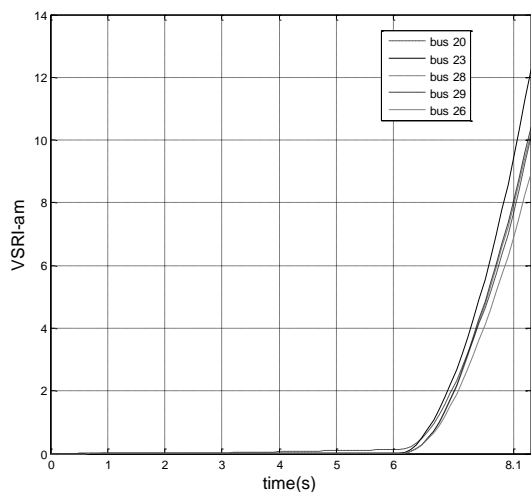


شکل (۱۰): نمودار VSRI برای شین ۱۲ در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۱

ژنراتور در لحظه ۶/۱ ثانیه از مدار خارج می‌شود. بر اساس روش VSRI این انتظار می‌رود که ۵ ثانیه بعد یعنی در ۱۱/۱ ثانیه شاخص از حد آستانه $0.2 p.u$ - بالاتر باشد تا اعلام فروپاشی صورت نپذیرد. اما همان طور که از شکل (۱۰) مشهود است در ۱۱/۱ ثانیه شاخص از حد آستانه پایین‌تر است و هنوز نوسانات شاخص سپری نشده است. بنابراین اعلام فروپاشی می‌کند و این در حالی است که VSRI از این ضعف دور است و بر اساس مقادیر جدول (۵) بعد از ۲ ثانیه از حادثه به درستی از عدم فروپاشی ولتاژ خبر می‌دهد.

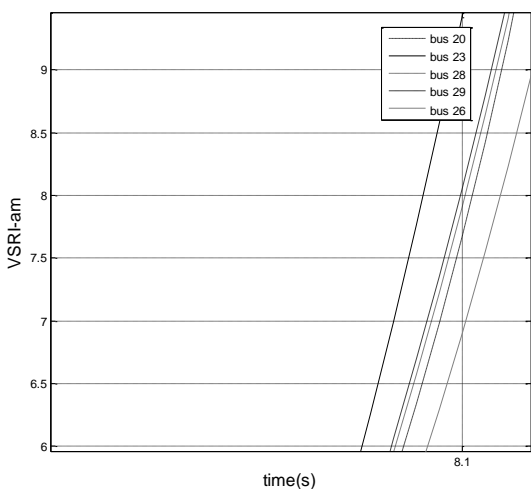
۴-۴- خروج ژنراتور باس ۳۶

در این قسمت، ژنراتور شماره ۷ از شبکه خارج می‌شود. سه بخش VSRI در جدول (۶) و پروفیل ولتاژ و VSRI-am نیز به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) آمده است.



شکل (۱۲): نمودار VSRI-am در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۶

در ضمن واضح است که در ثانیه ۸/۱ مقدار VSRI-am به ترتیب برای باس‌های ۲۳، ۲۹، ۲۸، ۲۰ و ۲۶ بیشینه است (شکل (۱۳)).

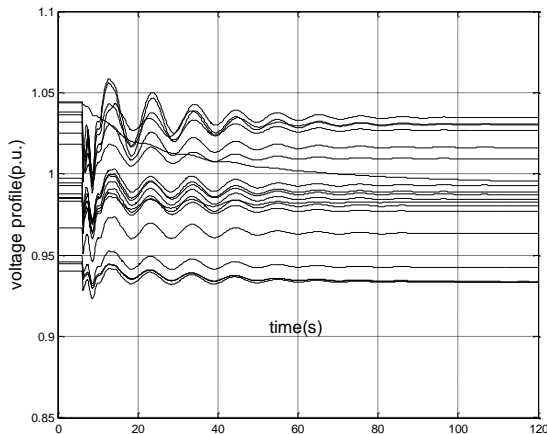


شکل (۱۳): نمودار VSRI-am از نمای بزرگ‌تر در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۶

جدول (۶): مقادیر سه بخش VSRI در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۶

Bus number	Qg-ar (p.u.)	VSRI-am (p.u.)	V-ar (p.u.)
23	7.5057e3	9.4316	0.65
29	7.5057e3	8.0558	0.76
28	7.5057e3	7.9114	0.719
20	7.5057e3	7.6767	0.684
26	7.5057e3	6.9022	0.522

VSRI بر اساس مقادیر جدول (۶) فروپاشی را پیش‌بینی می‌کند.



شکل (۱۵): پروفیل ولتاژها در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۳ در شبکه جبران شده

مشاهده می شود این بار این اتفاق فروپاشی را ایجاد نمی کند.

۴-۶- شبکه جبران شده و خروج خط ۲۳-۲۴ و افزایش بار باس ۲۰

خروج خط ۲۳-۲۴ در لحظه ۶/۱ ثانیه در شبکه جبران شده قسمت قبل و افزایش بار ۲۰ یک ثانیه پس از این اتفاق مورد دیگری از شبیه سازی ها است. مقادیر سه بخش *VSOI* در جدول (۹) دیده می شود.

جدول (۹): مقادیر سه بخش *VSOI* در حادثه خروج خط ۲۳-۲۴ و افزایش بار باس ۲۰ در شبکه جبران شده

Bus number	Qg-ar (MVAR/s)	VSRI-am (p.u.)	V-ar (p.u./s)
20	9.7694e3	48.7082	2.2
23	9.7694e3	30.8649	1.079
24	9.7694e3	26.3144	1.038
16	9.7694e3	25.3822	1.02
21	9.7694e3	22.7937	1.004

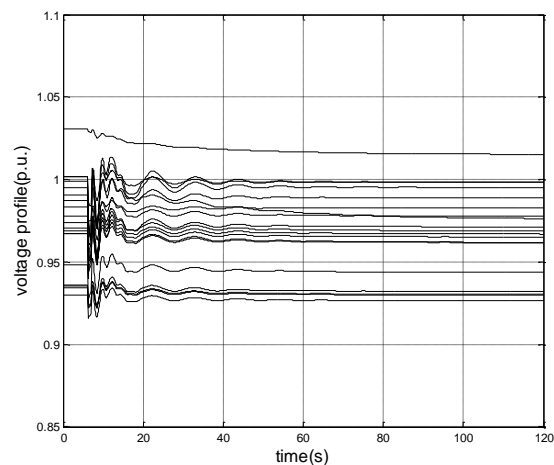
VSOI از روی جدول (۹) فروپاشی را اعلام می کند. زیرا هر سه بخش آن از مقادیر مجاز خود خارج شده اند. شکل (۱۶) نیز این موضوع را تایید می کند.

در جدول (۷) با در نظر گرفتن این پنج باس درصدهای زیر برای حذف بار حاصل می شود:

جدول (۷): درصدهای حذف بار در حادثه خروج ژنراتور باس ۳۶

Bus number	VSRI-am	LSP
23	9.4316	24
29	8.0558	20
28	7.9114	20
20	7.6767	19
26	6.9022	17

پروفیل ولتاژ پس از حذف بار در لحظه ۸/۳ ثانیه، در ۵ باس در شکل (۱۴) مشاهده می شود.



شکل (۱۴): پروفیل ولتاژها پس از حذف بار برای حادثه خروج ژنراتور باس ۳۶

واضح است که با اجرای حذف بار پیشنهادی از رخداد فروپاشی ولتاژ جلوگیری به عمل خواهد آمد.

۴-۵- شبکه جبران شده و خروج ژنراتور شماره ۴

در این بخش بار باس های ۲۰، ۲۹، ۲۸، ۲۶ و ۲۷ توسط خازن هایی از حالت پس فاز به بارهایی پیش فاز به اندازه حالت پس فاز نظیر خود تبدیل می شوند. این باس ها به هنگام خروج ژنراتور ۴ بیشترین مقادیر *VSRI-am* را دارا هستند. برای حدود آستانه ی *VSOI* این بار جدول (۸) ارائه می شود. زیرا شبکه جبران شده و به عبارتی دیگر توانایی سیستم برای تحمل انحرافات ولتاژ افزایش یافته است.

جدول (۸): مقادیر آستانه در شبکه جبران شده برای سه بخش *VSOI*

Case study	Qg-ar Threshold (MVA R/s)	VSRI-am Threshold (p.u.)	V-ar Threshold (p.u./s)
39 bus	7.5e3	10	1

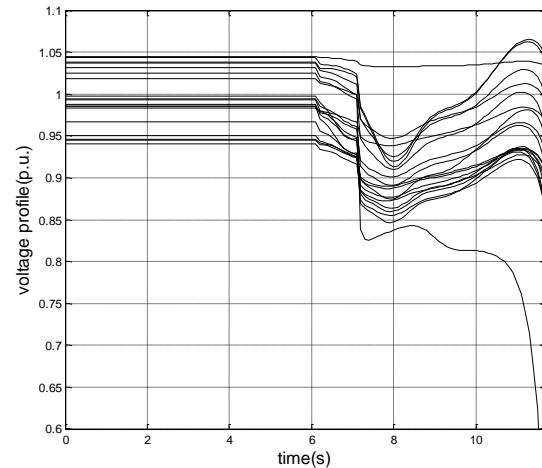
حالا ژنراتور شماره ۴ در ۶/۱ ثانیه از شبکه خارج می شود. شکل (۱۵) ولتاژها را به تصویر می کشد.

۵- نتیجه‌گیری

فروپاشی ولتاژ در سیستم‌های قدرت یکی از دلایل اصلی به وجود آمدن خاموشی سراسری در این شبکه‌ها است. به همین منظور در این مقاله یک شاخص جدید به منظور ارزیابی از پایداری ولتاژ در دوره گذرا ارائه شد تا بتوان از سیستم در مقابل وقوع خاموشی سراسری حفاظت به عمل آورد. این شاخص دارای سه بخش بوده و یکی از امتیازهای اصلی آن در پایش توان راکتیو تولیدی کل در شبکه عنوان شد. چرا که فروپاشی ولتاژ در واقع به دلیل کمبود توان راکتیو در شبکه رخ می‌دهد و در نتیجه با در نظر داشتن این موضوع می‌توان هوشیاری بیش‌تری برای تصمیم‌گیری‌های حفاظتی در هنگام حادثه‌های مختلف در شبکه داشت. نکته دیگر این که شاخص پیشنهادی در مدت زمانی کوتاه به اندازه ۲ ثانیه پس از حادثه در شبکه توانایی ارزیابی صحیح پایداری ولتاژ را داشت. در نتیجه با اجرای سریع‌تر طرح حذف بار تطبیقی در شبکه پروفیل بهتری از ولتاژهای شبکه را نتیجه داد. بدین ترتیب با استفاده از شاخص مذکور و به ازای شبیه‌سازی حوادث وخیم بر روی شبکه دینامیکی ۳۹ شینه IEEE- New England اجرای طرح حذف بار تطبیقی صورت پذیرفت تا از فروپاشی ولتاژ طی دوره گذرا و در نتیجه رخداد خاموشی سراسری در شبکه جلوگیری به عمل آید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده عملکرد بسیار مناسب شاخص ارزیابی پیشنهادی در تشخیص سریع‌تر و مطمئن‌تر نسبت به روش‌های نظیر خود بود.

مراجع

- [1] M. D. Zhong, "China's protection technique in preventing power system blackout to world," The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, IEEE, 2011.
- [2] Ch. F. Yang, G. G. Lai, Ch. H. Lee, Ch. T. Su and G. W. Chang, "Optimal setting of reactive compensation devices with an improved voltage stability index for voltage stability enhancement," Electrical Power and Energy Systems, Elsevier, Vol. 37, p.p. 50-57, 2011.
- [3] X. Y. Chen, D. M. Zhao and X. Zhang, "A novel voltage stability prediction index based on wide area measurement," Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific, 28-31 March, 2010.
- [4] S. Jalilzadeh, S.H. Hosseini and M. Derafshian-Maram, "Optimal load shedding to prevent voltage instability based on multi-objective optimization using modal analysis and PSO," International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), IEEE, 18-20 Oct, 2010.
- [5] S. Dehghan, M. Darafshian-Maram, H. A. Shayanfar and A. Kazemi, "Optimal load shedding to enhance voltage stability and voltage profile based on a multiobjective optimization technique," The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection ,IEEE, 19-23 June, 2011.
- [6] B. Leonardi and V. Ajarapu, "An approach for real time voltage stability margin control via reactive power reserve sensitivities," IEEE Trans. on Power systems, Vol. 28, No. 2, p.p. 615 – 625. 2013.



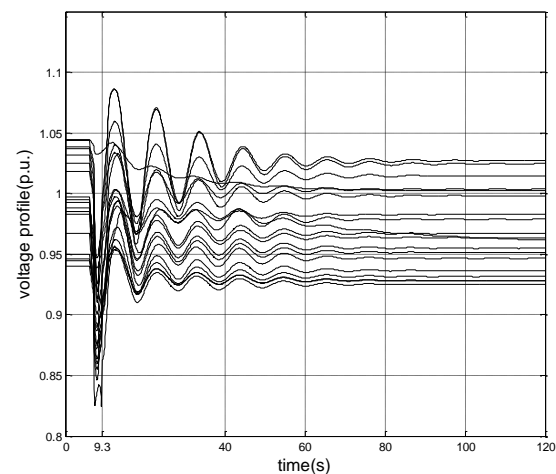
شکل (۱۶): پروفیل ولتاژها در حادثه خروج خط ۲۳-۲۴ و افزایش بار باس ۲۰ در شبکه جبران‌شده

به منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ پیش‌بینی شده در شبکه با توجه به روند کار مقاله از روی مقادیر شاخص برای باس‌های ۲۰، ۲۳، ۲۴، ۱۶ و ۲۱ در ثانیه‌ی ۹/۳ و از روی جدول شماره (۱۰) نسبت به اجرای حذف بار اقدام می‌شود.

جدول (۱۰): درصد‌های حذف بار در حادثه خروج خط ۲۳-۲۴ و افزایش بار باس ۲۰ در شبکه جبران‌شده

Bus number	VSRI-am	LSP
20	48.7082	32
23	30.8649	20
24	26.3144	17
16	25.3822	16
21	22.7937	15

با توجه به شکل (۱۷) مشخص است که با اجرای حذف بار پیشنهادی دیگر فروپاشی ولتاژ در شبکه رخ نخواهد داد.



شکل (۱۷): پروفیل ولتاژها پس از حذف بار برای حادثه خروج خط ۲۳-۲۴ و افزایش بار باس ۲۰ در شبکه جبران‌شده

-
- 4 Phasor Measurement Unit
 5 Real-Time
 6 Voltage Stability Risk Index
 7 Voltage Stability Online Index
 8 Accumulative Rate of Qg
 9 Accumulative Rate of V
 10 Accumulative Magnitude of VSRI
- [7] M. Beiraghi and A.M. Ranjbar, "Online voltage security assessment based on wide-area measurements," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 28, No. 2, p.p. 989 – 997, 2013.
- [8] M. Eidiani, "A reliable and efficient method for assessing voltage stability in transmission and distribution networks," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 33, pp.453-456, 2011.
- [9] M. Larsson and D. Karlsson, "Coordinated system protection scheme against voltage collapse using heuristic search and predictive control," IEEE Trans. on Power systems, Vol. 18, No. 3, p.p. 1001-1006, 2003.
- [10] W. Gu and Q. Wan, "Linearized voltage stability index for wide-area voltage monitoring and control," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, PP.333–336, 2010.
- [11] B. Ingelssonl, P. O. Lindstrom, D. Karlsson, G. Runvik and J. O. Sjodin, "Wide-area protection against voltage collapse," IEEE Computer Applications in Power, Vol. 10, No. 4, pp. 30-35, Oct. 1997.
- [12] S. Corsi, "Wide Area Voltage Protection," Journal of Generation, Transmission & Distribution, IET Vol. 4 , No.10, p.p. 1164 – 1179, October 2010.
- [13] S. Corsi, "Wide area voltage regulation & protection," IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest, Romania, 28 June-2 July, 2009.
- [14] S. Corsi, "Wide area voltage regulation in Italy and related wide area protection," Power and Energy Society General Meeting, Conference IEEE, 24-29 July 2011.
- [15] B. Milosevic and M. Begovic, "Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements," IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 18, No.1, February, 2003.
- [16] A. Saffarian and M. Sanaye Pasand, "Enhancement of power system stability using adaptive combinational load shedding methods," IEEE Trans. on Power System, Vol. 26, No. 3, August 2011.
- [17] K. Seethalekshmi, S.N. Singh and S.C. Srivastava, "A synchrophasor assisted frequency and voltage stability based load shedding scheme for self-healing of power system," IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 2, No. 2, June 2011.
- [18] F. Namdari, S. Jamali and P. A. Crossley, "Power differential based wide area protection," Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 77, No.12, p.p. 1541-1551, 2007.
- [19] T. Amraee, *Wide Area Protection Against Voltage Instability*, Ph.D. Thesis, Sharif University of Technology Department of Electrical Engineering, Iran, June, 2010.
- [20] Y. V. Makarov, D. Pengwei, L. Shuai, T. B. Nguyen, G. Xinxin, J. W. Burns, J. F. Gronquist and M. A. Pai, "PMU-based wide-area security assessment: concept, method, and implementation," IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 3, No.3 , p.p. 1325 – 1332, 2012.
- [21] IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE Standard C37.118, 2005.
- [22] M.A. Pai, *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Boston, MA: Kluwer, 1989.
- [23] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.

زیر نویس ها

-
- ¹ Supervisory Control And Data Acquisition
² Wide Area Regulation
³ Wide Area Protection