

یک سامانه حفاظت ویژه جدید جهت جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ بلندمدت در مقابل حملات گرافیتی

سیاوش یاری^۱، حمید خوشخو^{۲*}، عرفان اسدی^۳

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند
(دریافت: ۹۸/۱۲/۰۹، پذیرش: ۹۹/۰۲/۳۱)

چکیده

بمب‌های گرافیتی از جمله سلاح‌های غیر مخرب مدرن هستند که با ایجاد اتصال کوتاه در سامانه‌های قدرت منجر به وقوع خاموشی سراسری در این شبکه‌ها می‌شوند. هدف اصلی این مقاله ارائه یک سامانه حفاظت ویژه (SPS) جهت جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ بلندمدت پس از حملات گرافیتی است. در این سامانه حفاظت ویژه، برای آنکه اقدامات اصلاحی با هماهنگی مناسبی انجام شود و خطر ناپایداری کاهش یابد، با استفاده از مفهوم فاصله الکتریکی، شبکه قدرت به چند ناحیه کنترل ولتاژ (VCA) تقسیم می‌شود. سپس با توجه به وضعیت پایداری ولتاژ در هر ناحیه که به کمک شاخص RPRI تعیین می‌شود، سامانه حفاظت ویژه ارائه شده برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ بلندمدت مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این مقاله، با استفاده از محیط نرم‌افزار DPL نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory، سامانه حفاظت ویژه پیشنهاد شده بر روی شبکه‌های IEEE 39-Bus و Nordic32 پیاده‌سازی و آزمایش شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در شرایط وقوع اغتشاش‌های N-1، N-2 و N-3 مختلف و مقایسه آن‌ها با روش‌های پیشین، تأیید کننده عملکرد مناسب روش پیشنهاد شده است.

کلید واژه‌ها: بمب گرافیتی، ناپایداری ولتاژ بلندمدت، سامانه حفاظت ویژه.

A Novel Special Protection System to Prevent Long-Term Voltage Instability against Graffiti Attacks

S. Yari, H. Khoshkhoo*, E. Asadi

Sahand University of Technology

(Received: 28/02/2020; Accepted: 20/05/2020)

Abstract

Graffiti bombs are one of the modern non-destructive weapons that by causing short circuit in the power systems result in blackout in these networks. The main purpose of this paper is to propose a Special Protection System (SPS) to prevent long-term voltage instability after graffiti attacks. In this SPS, the power grid is divided into several voltage control area (VCAs) in order to carry out corrective actions in a coordinated manner and reduce the risk of the instability. Then, according to the voltage stability status of each area determined by RPRI index, the proposed SPS will be used to prevent long-term voltage instability. In this paper, using the DPL environment of DIgSILENT PowerFactory software, the proposed SPS is implemented and tested on IEEE 39-Bus and Nordic32 networks. The results of simulations performed under different N-1, N-2 and N-3 contingencies and comparison of them with previous ones verify the appropriate performance of the proposed method.

Keywords: Graffiti Bombs, Long Term Voltage Stability, Special Protection System.

۱. مقدمه

تجهیزات غیر عایقی که در فضای باز قرار می‌گیرند (مانند خطوط انتقال) می‌توانند مورد حمله بمب‌های گرافیتی قرار گیرند. این بمب‌ها با ایجاد اتصال الکتریکی بین تجهیزات شبکه قدرت، موجب وقوع اتصال کوتاه بر روی این تجهیزات می‌شوند. از این رو، عدم وجود یک سامانه حفاظت گسترده مناسب برای جلوگیری از وقوع ناپایداری‌های مختلف در شبکه قدرت، منجر به وقوع خاموشی سراسری خواهد شد. برای مثال در سال ۱۳۸۲ و در پی حمله ایالات متحده آمریکا به کشور عراق، موشک‌های آمریکایی حامل بمب‌های گرافیتی با اصابت به نیروگاه بصره موجب خاموشی سراسری در این کشور گردیدند. بر این اساس، حفظ پایداری و کنترل عملکرد مناسب شبکه با استفاده از روش‌های مؤثر و بهینه، یکی از الزامات مهم جهت مقابله با حملات مختلف متجاوزگران است [۵].

در همین راستا، همواره روش‌های کنترلی مختلفی در جهت جلوگیری از وقوع ناپایداری در شبکه‌های قدرت ارائه شده‌اند [۶-۷]. در بین این راهبردها، روش‌های مبتنی بر سامانه حفاظت ویژه (SPS) به نظر مؤثرتر و کارآمدتر از سایر روش‌ها هستند. براساس تعریف ارائه شده توسط SPS، NERC^۲ سامانه حفاظت خودکاری است که به منظور شناسایی شرایط غیرطبیعی یا از پیش تعیین شده شبکه طراحی می‌گردد، تا با انجام اقدامات اصلاحی از قبل مشخص شده (به غیر از جداسازی تجهیزات خط‌دار که توسط سامانه حفاظت معمول انجام می‌شود) پایداری شبکه قدرت را حفظ کند [۸]. الگوریتم‌های مبتنی بر SPS برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ از برخی اقدامات اصلاحی مانند: بهره‌برداری مؤثر از منابع تولید، حذف بار و کنترل تجهیزات شبکه (مانند سامانه‌های OLTC^۳، AVR^۴ و ادوات FACTS^۵) بهره می‌برند. این اقدامات اصلاحی می‌تواند پایداری شبکه‌های قدرت را که سامانه‌های بزرگ، پیچیده و غیرخطی هستند بهبود ببخشند [۹-۱۹].

الگوریتم‌های مبتنی بر SPS به‌طور کلی به ۲ دسته تقسیم می‌شوند [۹]:

- SPS‌های مبتنی بر رخداد (Event-based)
- SPS‌های مبتنی بر اندازه‌گیری متغیرهای شبکه (Response-based)

در SPS‌های مبتنی بر رخداد، روش کنترلی و اقدامات اصلاحی بر اساس وقوع اغتشاش‌های خاصی طراحی می‌شوند تا در هنگام وقوع این اغتشاشات از وقوع ناپایداری در شبکه قدرت

در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش قابل توجه بارگذاری در شبکه قدرت، نقاط کار این شبکه در سراسر جهان به سمت مرزهای پایداری حرکت کرده‌اند که سبب کاهش امنیت سامانه قدرت در مقابل اغتشاشات و حملات شده است [۳-۱۱]. یکی از حملات مخرب به تجهیزات شبکه قدرت استفاده از بمب گرافیتی است. این بمب که بنا به درخواست نیروی هوایی آمریکا ساخته شده و اثرات نامطلوبی روی انسان ندارد، نوعی مهمات هوا به زمین است که هدف آن غیرعملیاتی کردن ژنراتورهای شبکه قدرت و خطوط انتقال برق است. این بمب با کمک دستگاه ارتفاع‌سنج در ارتفاع خاصی منفجر می‌شود و ابری از گرافیت با وسعت چند صد متر بر فراز تأسیسات تولید انرژی یا مراکز ارتباطی به وجود می‌آورد. این ابر گرافیتی به تدریج در محدوده هدف نشست می‌کند و به علت رسانا بودن موجب ایجاد اتصال کوتاه در کلیدها و مدارات و سوختن قطعات دستگاه‌ها می‌شود و به این ترتیب، مراکز تولید انرژی و مخابرات را غیرفعال یا ناتوان می‌کند. اولین بار در سال ۱۹۹۹، بمب‌های گرافیتی به وسیله هواپیماهای جنگنده آمریکایی علیه مراکز نیروگاهی و سامانه‌های الکتریکی و الکترونیکی یوگسلاوی به کار گرفته شد که ضمن خسارات بسیار سنگین، ۷۰٪ کشور را در خاموشی فرو برد.

بمب‌های گرافیتی که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته و شناسایی شده‌اند از نظر مواد گرافیتی و عملکرد به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- بمب گرافیتی الیافی
- بمب گرافیتی پودری

بمب‌های گرافیتی الیافی عموماً دارای وزنی در حدود ۴۵۰ کیلوگرم بوده و از نظر قیمت در مقایسه با بمب‌های جنگی بسیار ارزان قیمت می‌باشند. عملکرد این بمب‌ها به‌طوری است که بعد از رها شدن از هواپیما، پوسته خارجی آن منفجر شده و الیاف درونی آن خارج شده و در فضا منتشر می‌شود و به تدریج بر روی کابل‌های برق فشارقوی در مراکز نیروگاهی فرود می‌آید و با ایجاد اتصال کوتاه و آتش‌سوزی باعث خسارات سنگین به این‌گونه مراکز می‌گردد [۴].

در نوع پودری آن، کپسول از دو قسمت تشکیل می‌شود و به وسیله چتر فرود می‌آیند و در میانه راه قسمت پایین کپسول جدا شده و پودر زغالی بسیار نرم و سبکی از آن خارج شده که در فضا منتشر می‌شود و به تدریج روی محل اتصالات مراکز نیروگاهی و پست‌های انتقال و فوق توزیع می‌نشیند و منجر به قطع تمام مدارات و جریانات ارتباطی می‌گردد [۴].

^۱ Special Protection System

^۲ North American Electric Reliability Corporation

^۳ On Load Tap Changer

^۴ Automatic Voltage Regulator

^۵ Flexible AC Transmission Systems

جلوگیری شود. SPS های مبتنی بر اندازه گیری متغیرهای شبکه، برخلاف روش قبلی، اقدامات اصلاحی مناسب را مبتنی بر رفتار شبکه و اندازه گیری متغیرهای سامانه قدرت (از قبیل ولتاژ شین ها و ...) اجرا می کنند و از این رو عملکرد آنها محدود به اغتشاش خاصی نیست [۹].

$$SVSI_i = \frac{\Delta V_i}{\beta \times V_i} = \frac{|\vec{V}_g - \vec{V}_i|}{\beta \times V_i} \quad (3)$$

در این مقاله یک SPS مبتنی بر اندازه گیری متغیرهای شبکه (Response-based)، با استفاده از بانک های خازنی، ابزار حذف بار، و کنترل عملکرد تپ چنجرهای ترانسفورماتورهای شبکه، جهت پیشگیری از ناپایداری ولتاژ بلندمدت ارائه شده است. بر این اساس، در بخش ۲ از این مقاله، ابزارهای مورد نیاز برای روش پیشنهادی ارائه می گردد. در این بخش، ناحیه بندی سامانه قدرت به چندین VCA، تعیین شین های ضعیف با استفاده از شاخص پایداری شین SVSI^۱ و بررسی توانایی ژنراتورهای سنکرون برای تولید توان راکتیو با استفاده از شاخص RPRI^۲ توضیح داده خواهد شد. سپس در بخش ۳، SPS پیشنهادی ارائه شده است. بخش ۴ نتایج شبیه سازی ها را ارائه می دهد و در بخش ۵ نتیجه گیری ارائه خواهد شد.

$$\beta = 1 - (\max(|V_m| - |V_l|))^2 \quad (4)$$

که در آن، V_i ولتاژ شین i و V_g ولتاژ ترمینال نزدیک ترین ژنراتور به شین i (که توسط ED تعیین می شود) و β به عنوان ضریب تصحیح به صورت رابطه (۴) محاسبه می شود [۲۳]:

ضریب تصحیح β بر اساس بیشترین اختلاف ولتاژ بین دو (m و n) شین از شبکه محاسبه می گردد.

۳-۲. ارزیابی ژنراتورهای سنکرون با استفاده از شاخص RPRI در این مقاله، به منظور اجرای اقدامات کنترلی مورد نیاز برای حفظ پایداری سامانه، وضعیت پایداری ولتاژ و انتخاب اقدامات اصلاحی بهینه بر مبنای قابلیت ژنراتورهای سنکرون در تولید توان راکتیو مورد نیاز بارها ارزیابی می شود. به این منظور، طبق معادله (۵) می توان با استفاده از شاخص RPRI، وضعیت ژنراتورهای سنکرون شبکه را از منظر قابلیت تولید توان راکتیو اضافی بررسی کرد [۲۴]:

$$RPRI = \min_{i \in G} \left(\frac{Q_i^{max} - Q_i}{Q_i^{max}} \right) \quad (5)$$

در این مقاله، به منظور اجرای اقدامات کنترلی مورد نیاز برای حفظ پایداری سامانه، وضعیت پایداری ولتاژ و انتخاب اقدامات اصلاحی بهینه بر مبنای قابلیت ژنراتورهای سنکرون در تولید توان راکتیو مورد نیاز بارها ارزیابی می شود. به این منظور، طبق معادله (۵) می توان با استفاده از شاخص RPRI، وضعیت ژنراتورهای سنکرون شبکه را از منظر قابلیت تولید توان راکتیو اضافی بررسی کرد [۲۴]:

$$Q_i^{max} = \frac{V E_{FD}^{max}}{x_d} \cos(\delta - \theta) - V^2 \left(\frac{\sin^2(\delta - \theta)}{x_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{x_d} \right) \quad (6)$$

در آن، V به عنوان ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون، E_{FD}^{max} بیشینه ولتاژ داخلی تولید شده در ژنراتور، x_q و x_d به عنوان راکتانس های محور d و q ، δ به عنوان زاویه روتور و θ به عنوان زاویه ولتاژ ترمینال در نظر گرفته شده است. از این رو، آن دسته از ژنراتورهایی که RPRI آن ها به صفر برسد، دیگر نمی توانند توان راکتیو تولید کنند و در کنترل پایداری ولتاژ نقش داشته باشند.

۳. سامانه حفاظت ویژه پیشنهادی

در این بخش، برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ بلندمدت، یک الگوریتم مؤثر با بار محاسباتی کم ارائه شده است تا بتواند در زمان کوتاه تصمیمات مناسب برای بهبود پایداری ولتاژ را اتخاذ کند. در این روش، سامانه قدرت به چندین VCA تقسیم می شود و در هر ناحیه، بر اساس شاخص RPRI و اندازه دامنه ولتاژ

در این مقاله یک SPS مبتنی بر اندازه گیری متغیرهای شبکه (Response-based)، با استفاده از بانک های خازنی، ابزار حذف بار، و کنترل عملکرد تپ چنجرهای ترانسفورماتورهای شبکه، جهت پیشگیری از ناپایداری ولتاژ بلندمدت ارائه شده است. بر این اساس، در بخش ۲ از این مقاله، ابزارهای مورد نیاز برای روش پیشنهادی ارائه می گردد. در این بخش، ناحیه بندی سامانه قدرت به چندین VCA، تعیین شین های ضعیف با استفاده از شاخص پایداری شین SVSI^۱ و بررسی توانایی ژنراتورهای سنکرون برای تولید توان راکتیو با استفاده از شاخص RPRI^۲ توضیح داده خواهد شد. سپس در بخش ۳، SPS پیشنهادی ارائه شده است. بخش ۴ نتایج شبیه سازی ها را ارائه می دهد و در بخش ۵ نتیجه گیری ارائه خواهد شد.

۲. ابزارهای مورد نیاز

۲-۱. ناحیه بندی شبکه قدرت و مفهوم ناحیه کنترل ولتاژ

برای ارزیابی پایداری ولتاژ، تقسیم شبکه به چندین VCA می تواند سبب سهولت نظارت بر پایداری شبکه و اجرای روش های کنترل ولتاژ شود [۲۰]. در این مقاله، سامانه قدرت با استفاده از مفهوم فاصله الکتریکی (ED^۳) به چندین VCA تقسیم می شود. در این روش، ED بین شین n و شین m طبق معادله (۱) محاسبه می شود:

$$ED_{mn} = ED_{nm} = -\log(a_{mn} \times a_{nm}) \quad (1)$$

که در آن، a_{mn} و a_{nm} با استفاده از ماتریس ژاکوبین پخش بار [۲۱] یا ماتریس سوسپتانس قابل محاسبه است [۲۲]:

$$a_{mn} = \left(\frac{\partial V_m}{\partial Q_n} \right) / \left(\frac{\partial V_n}{\partial Q_n} \right); a_{nm} = \left(\frac{\partial V_n}{\partial Q_m} \right) / \left(\frac{\partial V_m}{\partial Q_m} \right) \quad (2)$$

۲-۲. تعیین محل نصب خازن های موازی در شبکه قدرت با استفاده از شاخص SVSI

در این مقاله برای تعیین ضعیف ترین شین ها شبکه قدرت جهت نصب خازن های موازی از شاخص SVSI استفاده شده است. [۲۳]. در این راستا، SVSI برای همه شین ها (در هر

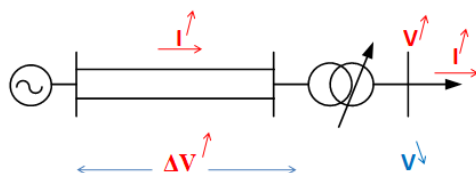
^۱ Voltage Control Area

^۲ Simple Voltage Stability Index

^۳ Reactive Power Reserve Index

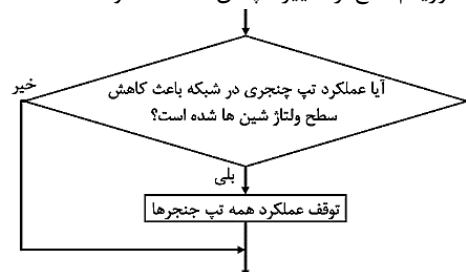
^۴ Electrical Distance

به دلیل آنکه معمولاً بارها وابسته به ولتاژ هستند) سبب افزایش توان و جریان بارها می شود که این موضوع سبب افزایش افت ولتاژ در شبکه انتقال خواهد شد (ΔV در شکل (۲)). بنابراین، در شرایط پرباری که شبکه به سختی قادر به تأمین توان مورد نیاز بارها است، ممکن است که افت ولتاژ در سامانه انتقال بر افزایش ولتاژ (ناشی از تغییر تپ OLTC) غلبه کند و تغییر تپ OLTC منجر به کاهش بیشتر ولتاژ شین مورد نظر شود.



شکل ۲. تأثیر نامطلوب عملکرد OLTCها بر کنترل سطح ولتاژ.

از این رو، بر اساس شکل (۳)، در این گام اگر عملکرد تپ چنجرهای ترانسفورماتورهای شبکه تأثیر معکوس بر روی وضعیت پایداری شبکه داشته باشند، دستور توقف عملکرد آنها صادر شده و الگوریتم وارد گام سوم می شود. در غیر این صورت، الگوریتم وارد گام سوم می شود. لازم به ذکر است که این گام به طور مستمر اجرا می شود. بنابراین، اگر در حین اجرای سایر اقدامات اصلاحی عملکردی نامناسب از سوی هر OLTC مشاهده شود، الگوریتم مانع از تغییر تپ آن OLTC خواهد شد.



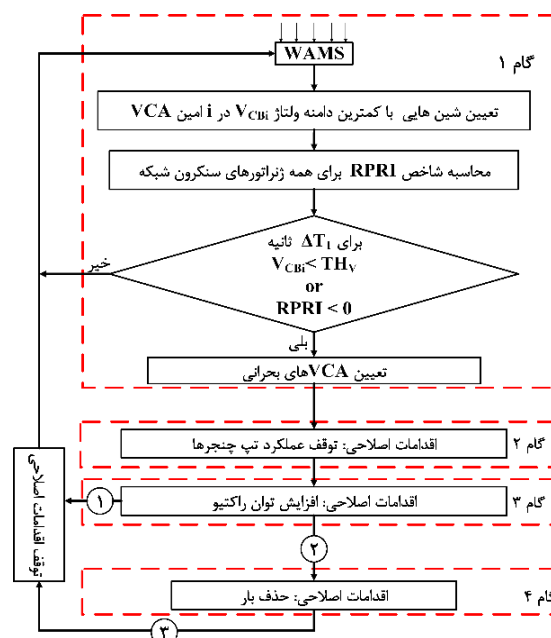
شکل ۳. گام ۲ از SPS پیشنهادی برای جلوگیری از وقوع ناپایداری.

۳-۳. گام ۳ (افزایش توان راکتیو از طریق خازن های موازی)

روندنامی این گام، که در VCAهای بحرانی اجرا می شود، در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق این شکل:

- گام ۳-۱: اگر در هر یک از VCAها شین بحرانی وجود داشته باشد، این شین ها که دارای اندازه ولتاژ کمتر از TH_V هستند، تعیین و به صورت نزولی مرتب می شوند. همچنین در هر VCA، ژنراتورهای سنکرون با RPRI کمتر از صفر شناسایی می شوند و به صورت نزولی مرتب می شوند. پس از آن الگوریتم وارد گام ۳-۲ می شود.

شین ها، وضعیت پایداری شبکه به طور مداوم ارزیابی می شود. روندنامی SPS پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است، که شامل سه گام اصلی است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱. روندنامی SPS پیشنهادی برای جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ.

۳-۱-۱. گام ۱ (تحلیل وضعیت پایداری ولتاژ شبکه قدرت)

در هر نقطه کار، داده های ارسالی از سوی WAMS^۱ دریافت شده و شین های بحرانی که دارای حداقل اندازه ولتاژ (V_{CBI}) در i آمین VCA هستند، تعیین می شوند. علاوه بر این، شاخص RPRI برای هر ژنراتور سنکرون در آن ناحیه محاسبه می شود. در این گام، اگر به مدت ΔT_1 ثانیه ژنراتوری وجود داشته باشد که مقدار RPRI آن از صفر کمتر شود (ژنراتورهای بحرانی) یا شینی وجود داشته باشد که اندازه ولتاژ آن از TH_V پایین تر بماند (شین بحرانی)، آن VCA به عنوان ناحیه بحرانی در نظر گرفته می شود. سپس الگوریتم به گام ۲ وارد می شود. در غیر این صورت الگوریتم به ابتدای گام ۱ باز می گردد.

۳-۲. گام ۲ (توقف عملکرد تپ چنجرها)

در شبکه قدرت پس از وقوع یک اغتشاش شدید، دامنه ولتاژ شین های شبکه دستخوش تغییرات می شوند. حال اگر این اغتشاش موجب کاهش بیش از حد ولتاژ شین هایی که توسط ترانسفورماتورهای تپ چنجر دار (OLTC) کنترل می شود گردد، OLTCها در مقابل این کاهش ولتاژ عکس العمل نشان می دهند تا سطح ولتاژ شین ها به محدوده قابل قبول خود بازگردند.

از سوی دیگر، تلاش OLTCها برای افزایش ولتاژ شین ها

^۱ Wide Area Measurement System

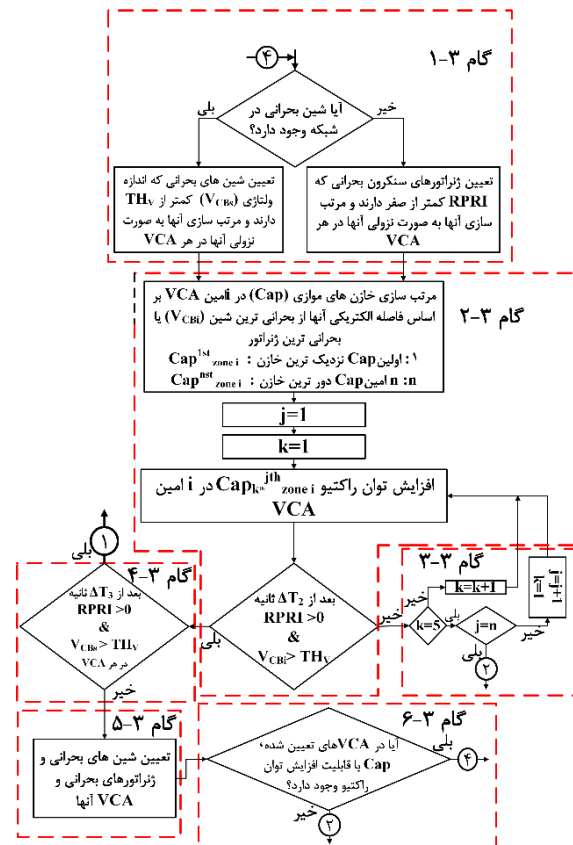
نمانده باشد، الگوریتم وارد گام ۴ خواهد شد.

- گام ۳-۴: اگر بعد از ΔT_3 ثانیه، مقدار دامنه ولتاژ شین‌های بحرانی (V_{CBs}) بیشتر از TH_V شود (در تمام VCA ها) و همچنین مقدار شاخص RPRI برای همه ژنراتور سنکرون در همه نواحی کنترل ولتاژ بیشتر از صفر باشد، دستور توقف اقدامات اصلاحی در آن گام صادر می‌گردد. در غیر این صورت الگوریتم وارد گام ۳-۵ می‌گردد.
- گام ۳-۵: در این گام از الگوریتم پیشنهادی، مجدداً شین‌ها و ژنراتورهای بحرانی و VCA های آنها تعیین می‌گردد. سپس الگوریتم وارد گام ۳-۶ می‌گردد.
- گام ۳-۶: در این گام، اگر بانک‌های خازنی موجود در VCA های بحرانی (تعیین شده از گام ۳-۵)، قابلیت افزایش توان راکتیو داشته باشند، الگوریتم به گام ۳-۱ باز می‌گردد. در غیر این صورت الگوریتم وارد گام ۴ (که در آن حذف بار انجام خواهد شد) می‌شود.

۴-۳. گام ۴ (حذف بار در شبکه قدرت)

روندنمای این گام در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق این شکل:

- گام ۳-۱: در این گام ابتدا ژنراتورهای سنکرون شبکه که دارای شاخص RPRI کمتر از صفر هستند شناسایی شده و به صورت نزولی مرتب می‌گردند. سپس الگوریتم وارد گام ۳-۲ می‌شود.
- گام ۳-۲: در این گام، بارهای هر یک از VCA های بحرانی بر اساس کمترین فاصله الکتریکی نسبت به بحرانی‌ترین ژنراتور سنکرون (که دارای کمترین مقدار شاخص RPRI در آن ناحیه است)، مرتب می‌شوند. سپس اولین بار انتخاب شده و الگوریتم وارد گام ۳-۴ می‌شود.
- گام ۳-۴: در این مرحله حذف بار با مقدار $\frac{1}{2}$ بر روی بار انتخاب شده اعمال می‌گردد و سپس الگوریتم پیشنهادی وارد گام ۳-۴ می‌گردد.
- گام ۳-۴: اگر بعد از ΔT_4 ثانیه، مقدار شاخص RPRI برای ژنراتور سنکرون بحرانی بیشتر از صفر شود، الگوریتم وارد گام ۳-۶ می‌شود. در غیر این صورت الگوریتم وارد گام ۳-۵ می‌شود.
- گام ۳-۵: اگر بار انتخاب شده قابلیت حذف بار را داشته باشد، الگوریتم به گام ۳-۴ باز می‌گردد. در غیر این صورت بار بعدی انتخاب شده و سپس الگوریتم به گام



شکل ۴. گام ۳ از SPS پیشنهادی برای جلوگیری از وقوع ناپایداری.

- گام ۳-۲: در این گام، در ابتدا بانک‌های خازنی (Cap) در VCA های بحرانی که قابلیت افزایش توان راکتیو دارند، بر اساس کمترین فاصله الکتریکی نسبت به بحرانی‌ترین شین مرتب می‌شوند. سپس، افزایش توان راکتیو از نزدیک‌ترین خازن آغاز می‌شود (اگر شین بحرانی وجود نداشته باشد، روند فوق برای بحرانی‌ترین ژنراتور انجام می‌شود). اگر ΔT_2 ثانیه پس از افزایش توان راکتیو خازن انتخاب شده، مقدار دامنه ولتاژ شین بحرانی بیشتر از TH_V شود (و یا مقدار شاخص RPRI برای ژنراتور سنکرون بحرانی بزرگ‌تر از صفر شود)، الگوریتم وارد گام ۳-۴ می‌گردد. در غیر این صورت الگوریتم پیشنهادی وارد گام ۳-۳ می‌شود.
- گام ۳-۳: در این گام، اگر تعداد پله‌های خازن مورد نظر جهت افزایش توان راکتیو به مقدار بیشینه خود نرسیده باشد، پله دیگر برای خازن انتخاب شده و خازن توان راکتیو تزریقی خود به شبکه را افزایش دهد. سپس الگوریتم به گام ۳-۴ وارد می‌شود. در غیر این صورت، خازن بعدی جهت افزایش توان راکتیو انتخاب می‌شود و الگوریتم به گام ۳-۲ باز می‌گردد. همچنین اگر خازن دیگری در ناحیه بحرانی باقی

۴. نتایج شبیه‌سازی‌ها

در این بخش، جهت بررسی عملکرد SPS پیشنهادی در جلوگیری از ناپایداری ولتاژ بلند مدت، از شبکه‌های IEEE 39-Bus و Nordic32 استفاده شده است. در این راستا، این شبکه‌ها در نرم‌افزار PowerFactory پیاده‌سازی شده‌اند. همچنین کنترل‌کننده‌های ژنراتورهای سنکرون (AVR، GOV، PSS) و OLTCها و بارهای وابسته به ولتاژ برای شبیه‌سازی دقیق رفتار دینامیکی شبکه قدرت مدل‌سازی شده‌اند. مقادیر آستانه‌های مورد استفاده در این شبیه‌سازی‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. مقادیر آستانه‌های استفاده شده در SPS پیشنهادی.

آستانه	TH_V (پریونیت)		ΔT_4 ثانیه	ΔT_3 ثانیه	ΔT_2 ثانیه	ΔT_1 ثانیه
	Nordic32	IEEE-39 bus				
مقدار	۱	۰/۹۶	۲	۲۰	۲	۱۰

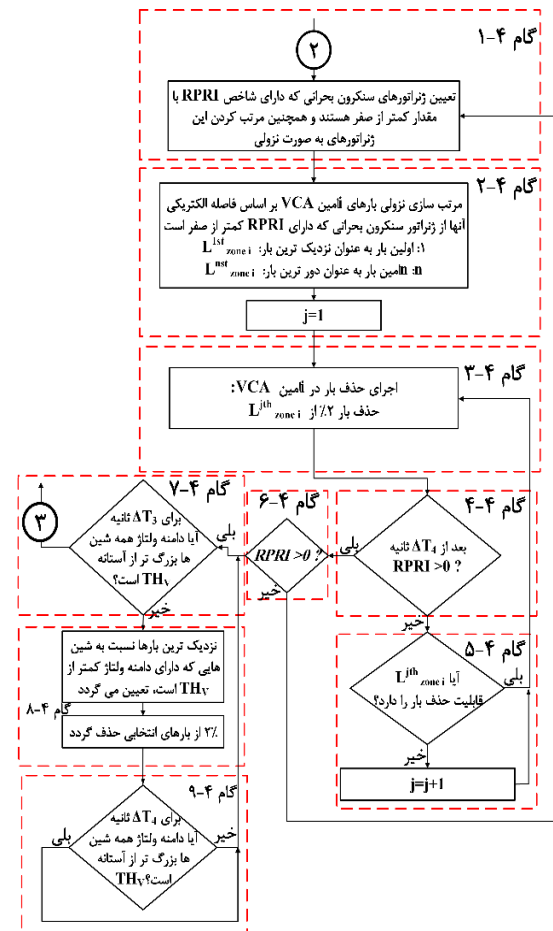
۴-۱. بررسی عملکرد SPS ارائه شده در شبکه IEEE 39-bus

همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد، بر اساس روشی که در [۷] توضیح داده شد، این شبکه به سه VCA تقسیم شده است و در هر VCA، از معیار "SVSI > 0.8" [۲۵]، برای تعیین شین‌های ضعیف جهت نصب بانک‌های خازنی استفاده شده است. از آنجا که هیچ شین ضعیفی در VCA1 وجود ندارد، هیچ بانک خازنی در این VCA نصب نمی‌شوند. از این‌رو خازن‌های موازی فقط در VCA 2 و VCA 3 (با حداکثر ۵۰٪ ظرفیت توان راکتیو بار متصل به شینی که خازن به آن متصل شده است) نصب شده‌اند، که در جدول (۲) و شکل (۶) نشان داده شده است (هریک از این خازن‌ها دارای ۵ پله هستند که قابلیت کلیدزنی دارند). همچنین در این آزمایش سامانه، هر بار از طریق ترانسفورماتورهای OLTC به سامانه انتقال متصل شده است و ترانسفورماتورهای بین bus11-12، 13-15 bus، و 19-20 bus نیز دارای OLTC هستند. همچنین بر روی تمام خطوط انتقال رله دیستانس نصب شده است و تأثیر عملکرد رله‌های حفاظتی برای خروج خطوط در هنگام وقوع خطا در نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی عملکرد SPS پیشنهادی، سه سناریو زیر در نظر گرفته شده است که در ادامه توضیح داده خواهند شد:

- سناریو ۱: خروج خط انتقال ۲۱-۲۲ از VCA 3
- سناریو ۲: خطوط انتقال ۵-۶ و ۵-۸ از VCA 2
- سناریو ۳: خروج خطوط انتقال ۵-۸، ۴-۵ و ۴-۱۴ از VCA 2

۳-۴ باز می‌گردد.

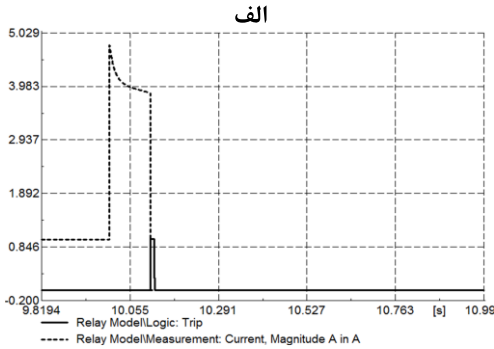
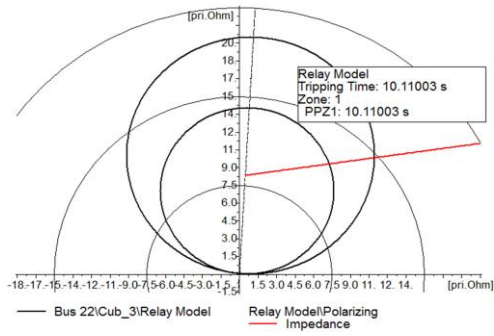


شکل ۵. گام ۴ از SPS پیشنهادی برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ.

- گام ۴-۶: در این گام، اگر مقدار شاخص RPRI برای تمام ژنراتورهای سنکرون بیشتر از صفر باشد، الگوریتم پیشنهادی وارد گام ۴-۷ می‌گردد. در غیر این صورت الگوریتم به گام ۴-۱ باز می‌گردد.
- گام ۴-۷: در این گام، اگر برای ΔT_3 ثانیه، دامنه ولتاژ همه شین‌های شبکه بیشتر از TH_V باشد، دستور توقف اعمال اصلاحی صادر می‌گردد. در غیر این صورت الگوریتم وارد گام ۴-۸ می‌گردد.
- گام ۴-۸: در این گام، نزدیک‌ترین بارهای شبکه به شین‌هایی که دامنه ولتاژ آن‌ها کمتر از TH_V می‌باشند، تعیین می‌شود و به مقدار ۵٪ حذف بار، بر روی آن‌ها اعمال می‌شود. سپس الگوریتم وارد گام ۴-۹ می‌شود.
- گام ۴-۹: در این گام، اگر برای ΔT_4 ثانیه، ولتاژ همه شین‌های شبکه بزرگ‌تر از TH_V باشد، الگوریتم به گام ۴-۷ باز می‌گردد.

جدول ۲. شین‌های بحرانی در هر ناحیه (محل نصب خازن‌ها).

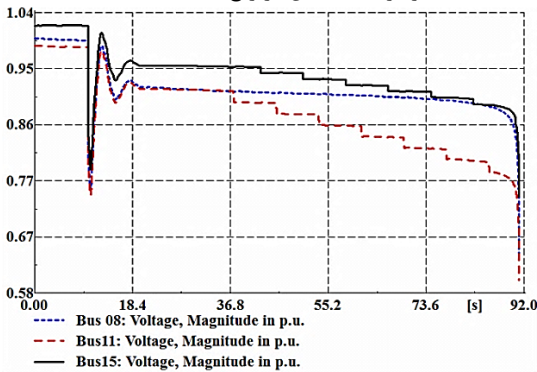
شین‌های بحرانی					ناحیه
شین ۳	شین ۷	شین ۸	شین ۱۲	شین	VCA2
۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۹	۰/۹۷	SVSI	
شین ۲۴	شین ۲۱	شین ۱۶	شین ۱۵	شین	VCA3
۰/۸۱	۰/۸۹	۰/۹	۰/۹۴	SVSI	



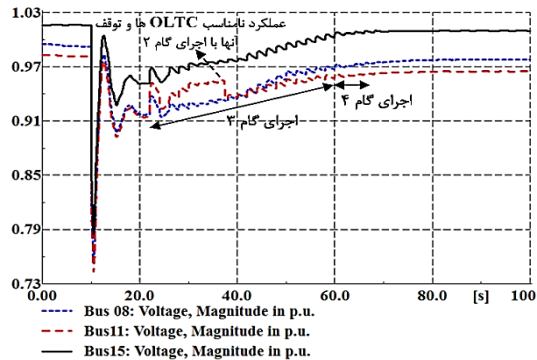
ب

شکل ۷. الف: امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله دیستانس در صفحه

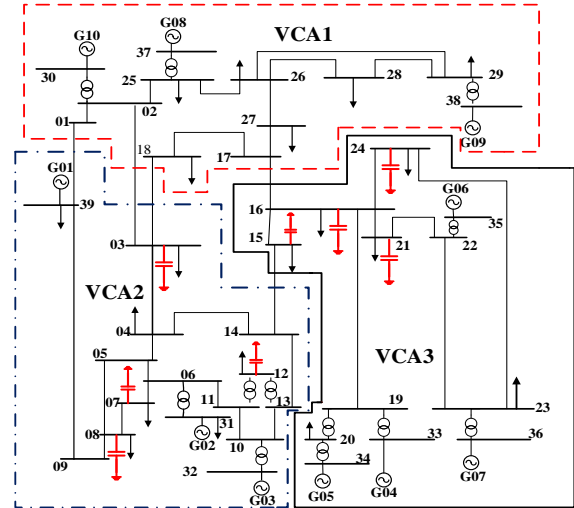
R-X. ب: عملکرد رله دیستانس در رفع خطا.



شکل ۸. وضعیت ولتاژ شین‌ها بدون در نظر گرفتن SPS در سناریو ۱.



شکل ۹. وضعیت ولتاژ شین‌ها با در نظر گرفتن SPS پیشنهادی در سناریو ۱.



شکل ۶. آزمایش سامانه IEEE 39-Bus، تقسیم‌شده به سه VCA.

۴-۱-۱. سناریو ۱: خروج خط انتقال ۲۱-۲۲ از VCA3

در این سناریو، در ثانیه ۱۰ از شبیه‌سازی حوزه زمان خطای اتصال کوتاه سه فاز بر روی خط ۲۱-۲۲ اتفاق می‌افتد. طبق شکل (۷-الف) این خطای رخ داده‌شده در ناحیه ۱ (zone1) از رله‌های دیستانس خط ۲۱-۲۲ قرار گرفته و این رله‌ها دستور خروج خط ۲۱-۲۲ را ۰/۱۱ ثانیه پس از خطای اتصال کوتاه صادر می‌کند. در شکل (۷-ب) نحوه ارسال دستور قطع (Trip) خط ۲۱-۲۲ و صفر شدن جریان گذرنده از این خط نشان داده شده است.

این اغتشاش شدید باعث می‌شود، سامانه قدرت دچار ناپایداری ولتاژ بلندمدت شود، که در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در این سناریو نشان می‌دهند که خروج خط مذکور سبب فعال شدن محدودکننده سامانه تحریک ژنراتور G05 می‌گردد. همچنین افت ولتاژ در شین‌ها باعث فعال شدن برخی از OLTC‌ها می‌شود تا به‌طور خودکار موقعیت تپ خود را برای بهبود پروفیل ولتاژ تغییر دهند. با این حال، این تغییرات وضعیت را بدتر و افت ولتاژ را بیشتر می‌کند و موجب فعال شدن محدودکننده سامانه تحریک ژنراتور G04 می‌گردد. سرانجام، سقوط ولتاژ در حدود ثانیه ۹۰ از شبیه‌سازی حوزه زمان اتفاق می‌افتد.

شین های ۸ (در VCA2) و ۲۴ (در VCA3)، توان راکتیو خود را افزایش می دهند. پس از سپری شدن ΔT_2 ثانیه از به مدار آمدن آخرین پله خازن های مذکور، ولتاژ کلیه شین های شبکه بزرگ تر از TH_V است. اما مقدار RPRI برای G05 هنوز کمتر از صفر است و به همین دلیل، SPS وارد گام ۴ می شود. در این گام با اعمال ۴ مرتبه حذف بار (به مقدار ۲٪) بر روی نزدیک ترین بار به ژنراتور G05 در VCA3 (بار متصل به شین ۲۰) مقدار شاخص RPRI در ثانیه ۶۵ از شبیه سناریو ۱ به مقداری بیش از صفر می رسد و از این زمان به بعد، شبکه در یک نقطه تعادل جدید به عملکرد خود ادامه می دهد.

۴-۱-۲. سناریو ۲: خروج خطوط ۵-۶ و ۵-۸ از VCA 2

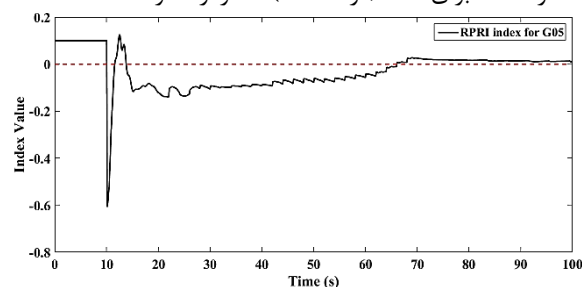
در این سناریو، در ثانیه ۱۰ از شبیه سازی حوزه زمان خطای اتصال کوتاه سه فاز بر روی خطوط ۵-۶ و ۵-۸ اتفاق می افتد. خطاهای اتصال کوتاه سه فاز رخ داده شده در ناحیه ۱ (zone1) از رله های دیستانس خطوط ۵-۶ و ۵-۸ قرار گرفته و رله ها دستور قطع خطوط را حدود ۰/۱۱ ثانیه پس از وقوع اتصال کوتاه صادر می کنند.

در این سناریو، سامانه قدرت دچار ناپایداری ولتاژ بلند مدت می شود (شکل ۱۱). این اغتشاش سبب فعال شدن محدودکننده سامانه تحریک ژنراتور G02 می گردد. همچنین افت ولتاژ در شین ها باعث فعال شدن برخی از OLTC ها می شود تا به طور خودکار موقعیت تپ خود را برای بهبود پروفیل ولتاژ تغییر دهند. با این حال، این تغییرات افت ولتاژ را بیشتر می کند و سرانجام سقوط ولتاژ در ثانیه ۹۵ اتفاق می افتد. با این وجود، طبق شکل (۱۲)، SPS پیشنهادی می تواند باعث رسیدن نقطه کار شبکه به یک نقطه تعادل شده و از ناپایداری ولتاژ جلوگیری کند. بر اساس شکل (۱۲) با وقوع این اغتشاش ها، تنها ولتاژ برخی از شین ها در VCA 2 به مقدار کمتر از TH_V رسیده است. همچنین بر اساس شکل (۱۳)، از بین تمام ژنراتورهای شبکه، فقط مقدار RPRI برای G02 به مقداری کمتر از صفر می رسد. از این رو، شین ۰۷ به عنوان ضعیف ترین شین VCA 2 انتخاب می شود و خازن های متصل به شین های ۰۷، ۰۸، ۱۲ و ۰۳ (طبق الگوریتم ارائه شده) به ترتیب از ثانیه ۲۰ تا ۶۰ وارد شبکه می شوند تا شرایط پایداری ولتاژ را بهبود دهند. با ورود این خازن ها به شبکه، همان طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، مقدار شاخص RPRI برای ژنراتور G02 به بیش از صفر می رسد. ذکر این نکته ضروری است که در ثانیه ۳۴ از این سناریو، با عملکرد نامناسب تپ چنجرهای برخی ترانسفورماتورهای شبکه در VCA2، ولتاژ چند شین کاهش می یابد. بر این اساس، الگوریتم طبق گام ۲ دستور توقف عملکرد این ترانسفورماتورها را اجرا می کند.

با این حال، طبق شکل (۹)، SPS پیشنهادی مانع از وقوع ناپایداری ولتاژ جلوگیری می شود و سبب می شود که نقطه کار شبکه به یک نقطه تعادل جدید برسد. همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، بعد از وقوع اغتشاش، دامنه ولتاژ در شین ۱۱ در VCA 2 (در ثانیه ۲۰ از شبیه سازی) کمترین مقدار بوده و به همین دلیل این شین به عنوان بحرانی ترین شین در VCA2 انتخاب می گردد. همچنین شین ۱۵ در VCA 3 به عنوان بحرانی ترین شین در این ناحیه انتخاب می شود (دامنه ولتاژ شین ها در VCA 1 به TH_V نمی رسد). بر این اساس، در ثانیه ۲۰ از شبیه سازی، SPS وارد گام ۳ می شود. در این گام، نزدیک ترین خازن به شین ۱۱ (که در شین ۱۲ نصب شده است) و شین ۱۵ (در شین ۱۵)، توان راکتیو خود را طی ۱۰ ثانیه و ۵ پله افزایش می دهند. این اقدام سبب می شود که در ثانیه ۳۰ دامنه ولتاژ شین ۱۵ از مقدار آستانه TH_V افزایش پیدا می کند. با این حال، همچنان دامنه ولتاژ شین ۱۱ کمتر از مقدار آستانه TH_V است.

همچنین طبق شکل (۱۰)، مقدار شاخص RPRI برای ژنراتور G05 (در VCA3) کمتر از صفر است. بنابراین در ثانیه ۳۰، خازن متصل به شین ۷ (در VCA 2) به عنوان نزدیک ترین خازن به شین ۱۱ و خازن متصل به شین ۱۶ به عنوان نزدیک ترین خازن موازی به G05، توان راکتیو خود را افزایش می دهند (در مدت ۱۰ ثانیه و در پنج پله). اگرچه این اقدامات سبب بهبود وضعیت پایداری می شود، در ثانیه ۳۸، عملکرد نامناسب OLTC ها سبب کاهش ولتاژ شین ۱۱ می شود که بر اثر آن، الگوریتم پیشنهادی (طبق گام ۲) توقف عملکرد آن ها اجرا می کند.

در ادامه این روند، در ثانیه ۴۰، خازن شین ۳ (در VCA 2) به عنوان نزدیک ترین خازن به شین ۱۱ و خازن متصل به شین ۲۱ به عنوان نزدیک ترین خازن موازی به G05، توان راکتیو خود را افزایش می دهند (در مدت ۱۰ ثانیه و در پنج پله). با این حال، مقدار دامنه ولتاژ شین ۱۱ (در VCA2) همچنان کمتر از TH_V و مقدار RPRI برای G05 (در VCA3) کمتر از صفر است.



شکل ۱۰. مقدار شاخص RPRI برای ژنراتورهای سنکرون G05.

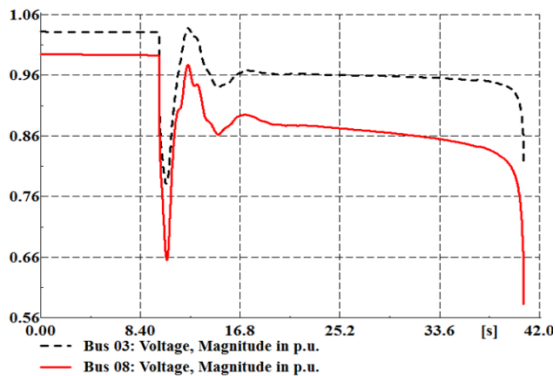
با این وجود، در ثانیه ۵۰، همچنان مقدار دامنه ولتاژ شین ۱۱ از مقدار آستانه TH_V کمتر است و مقدار RPRI برای G05 نیز کمتر از صفر خواهد بود که سبب می شود خازن های متصل به

(zone1) از رله‌های دیستانس خطوط ۵-۸، ۴-۵ و ۴-۱۴ قرار گرفته و رله‌ها دستور قطع خطوط را حدود ۰/۱ ثانیه پس از وقوع اتصال کوتاه صادر می‌کنند.

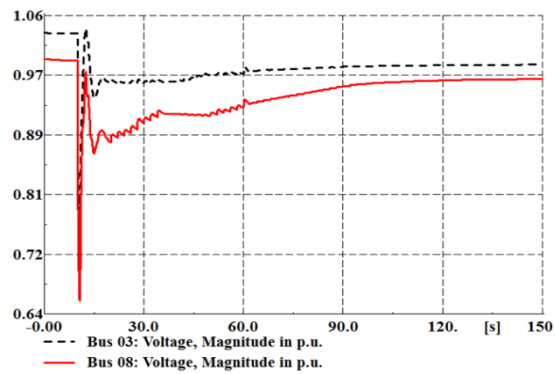
در این سناریو، سامانه قدرت دچار ناپایداری ولتاژ میان مدت می‌شود (شکل ۱۴). این اغتشاش سبب فعال شدن محدودکننده سامانه تحریک ژنراتور G02 می‌گردد. همچنین افت ولتاژ در شین‌ها باعث فعال شدن برخی از OLTCها می‌شود تا به‌طور خودکار موقعیت تپ خود را برای بهبود پروفیل ولتاژ تغییر دهند. با این حال، این تغییرات افت ولتاژ را بیشتر می‌کند و سرانجام سقوط ولتاژ در ثانیه ۴۰ اتفاق می‌افتد.

با این وجود، طبق شکل (۱۵)، SPS پیشنهادی می‌تواند باعث رسیدن نقطه کار شبکه به یک نقطه تعادل شده و از ناپایداری ولتاژ جلوگیری کند. بر اساس شکل (۱۵) با وقوع این اغتشاش‌ها، تنها ولتاژ برخی از شین‌ها در 2 VCA به مقدار کمتر از TH_V رسیده است.

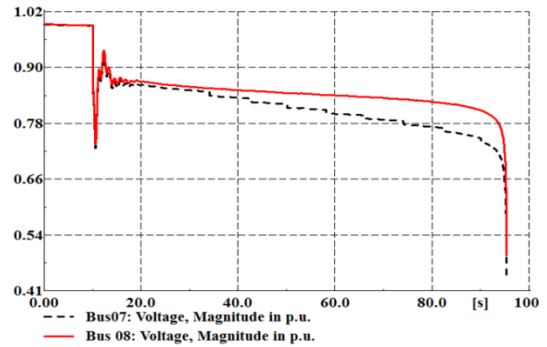
همچنین، بر اساس شکل (۱۶)، از بین تمام ژنراتورهای شبکه، فقط مقدار RPRI برای G02 به مقداری کمتر از صفر می‌رسد.



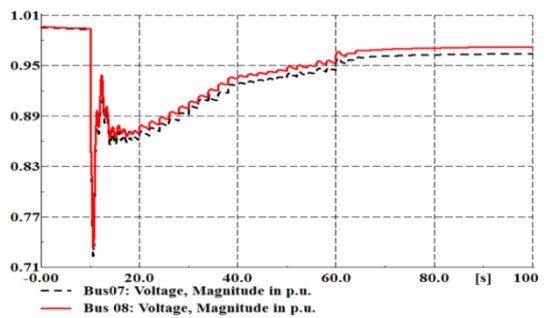
شکل ۱۳. وضعیت ولتاژ شین‌ها بدون SPS پیشنهادی در سناریو ۳.



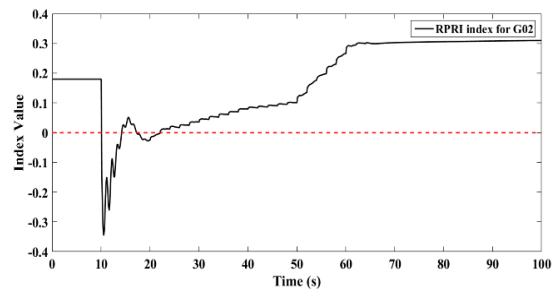
شکل ۱۴. وضعیت ولتاژها با در نظر گرفتن SPS پیشنهادی در سناریو ۳.



شکل ۱۱. وضعیت ولتاژ شین‌ها بدون SPS پیشنهادی در سناریو ۲.



شکل ۱۲. وضعیت ولتاژها با در نظر گرفتن SPS پیشنهادی در سناریو ۲.



شکل ۱۶. مقدار شاخص RPRI برای ژنراتورهای سنکرون G02.

علی‌رغم انجام اقدامات فوق، ولتاژ شین‌های ۰۷ و ۰۸ همچنان کمتر از مقدار آستانه TH_V باقی می‌ماند که در شکل (۱۲) نشان داده شده است. از این‌رو، طبق گام ۴ از الگوریتم پیشنهادی، با انتخاب نزدیک‌ترین بارها به این شین‌ها و اعمال ۴ مرتبه حذف بار به مقدار ۲٪ (۳ مرتبه بر روی بار متصل به شین ۰۸ و ۱ مرتبه بر روی بار متصل به شین ۰۷) دامنه ولتاژ شین‌های ۰۷ و ۰۸ به بیش از مقدار آستانه TH_V می‌رسد و پس از آن، شبکه در یک نقطه تعادل جدید به عملکرد خود ادامه می‌دهد.

۴-۱-۳. سناریو ۳: خروج خطوط انتقال ۵-۸، ۴-۵ و ۴-۱۴ از VCA 2

در این سناریو، در ثانیه ۱۰ از شبیه‌سازی حوزه زمان خطای اتصال کوتاه سه فاز بر روی خطوط ۵-۸، ۴-۵ و ۴-۱۴ اتفاق می‌افتد. خطاهای اتصال کوتاه سه فاز رخ داده‌شده در ناحیه ۱

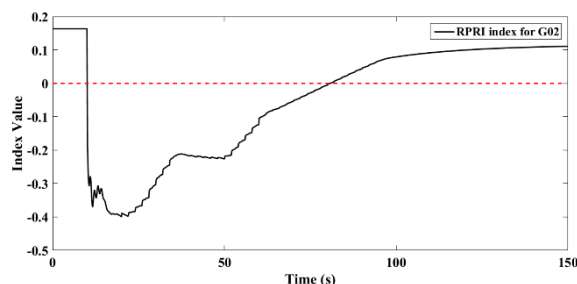
از شبیه سناریو ۳ به مقداری بیش از صفر می‌رسد. ولی همچنان مقدار دامنه ولتاژ شین ۸ از مقدار آستانه TH_V کمتر است از این رو SPS وارد گام ۴-۷ می‌شود. در این گام با اعمال ۷ مرتبه حذف بار (به مقدار ۲٪) بر روی نزدیک‌ترین بار به شین ۸ در VCA2 (بار متصل به شین ۸) مقدار دامنه ولتاژ شین ۸ در ثانیه ۹۶ از شبیه سناریو ۳ به مقداری بیش از مقدار آستانه TH_V می‌رسد و از این زمان به بعد، شبکه در یک نقطه تعادل جدید به عملکرد خود ادامه می‌دهد.

۲-۴. بررسی عملکرد SPS ارائه شده در شبکه Nordic32

در این قسمت، از شبکه Nordic32 برای ارزیابی عملکرد SPS ارائه شده استفاده می‌شود. بر اساس مطالب ارائه شده در بخش ۲-۲ و طبق شکل (۱۷)، با استفاده از معیار " $SVSI > 0.8$ " شین‌های ضعیف موجود در نواحی کنترل ولتاژ مختلف جهت نصب بانک‌های خازنی (هریک از این خازن‌ها دارای ۵ پله هستند که قابلیت کلید زنی دارند) در این شبکه تعیین شده‌اند (VCA1 و VCA2 دارای شین ضعیفی نیستند). در این بخش، برای ارزیابی عملکرد SPS پیشنهادی، سناریوی وقوع اتصال کوتاه بر روی خط ۴۰۳۲-۴۰۴۴ و عملکرد رله‌های حفاظتی برای خروج این خط در نظر گرفته شده است.

در این سناریو، در ثانیه ۱۰ از شبیه‌سازی حوزه زمان خطای اتصال کوتاه سه فاز بر روی خط ۴۰۳۲-۴۰۴۴ اتفاق می‌افتد. این خطای اتصال کوتاه سه فاز موجب عملکرد رله‌های دیستانس خط ۴۰۳۲-۴۰۴۴ می‌گردد و حدود ۰/۱۱ ثانیه پس از وقوع اتصال کوتاه دستور قطع خط از شبکه به کلیدهای قدرت ارسال می‌شود.

این اغتشاش شدید منجر به وقوع ناپایداری ولتاژ بلند مدت می‌شود که در شکل (۱۸) نشان داده شده است. با این حال، طبق شکل (۱۹)، SPS پیشنهادی می‌تواند باعث رسیدن نقطه کار شبکه به یک نقطه تعادل شده و از ناپایداری ولتاژ جلوگیری کند. طبق این شکل، الگوریتم در ثانیه ۳۵ وارد گام ۳ شده و خازن‌های متصل به شین‌های ۱۰۴۴، ۱۰۴۲، ۱۰۴۱ و ۱۰۴۵ را به ترتیب تا ثانیه ۷۵ وارد شبکه می‌کند. با این وجود، در ثانیه ۷۵ همچنان ولتاژ شین ۱۰۴۴ از مقدار آستانه TH_V کمتر است و به همین دلیل الگوریتم وارد گام (۴) شده و با اعمال ۸ مرتبه حذف بار به مقدار ۲٪ بر روی بار متصل به شین ۱۰۴۴، دامنه ولتاژ شین ۱۰۴۴ به مقداری بیش از TH_V می‌رسد (شکل ۱۸). همچنین طبق شکل (۲۰)، SPS ارائه شده باعث دور شدن



شکل ۱۶. مقدار شاخص RPRI برای ژنراتورهای سنکرون G02.

بعد از وقوع اغتشاش، دامنه ولتاژ در شین ۸ در VCA 2 (در ثانیه ۲۰ از شبیه‌سازی) کمترین مقدار بوده و به همین دلیل این شین به عنوان بحرانی‌ترین شین در VCA2 انتخاب می‌گردد. بر این اساس، در ثانیه ۲۰ از شبیه‌سازی، SPS وارد گام ۳ می‌شود. در این گام، نزدیک‌ترین خازن به شین ۸ (که در شین ۸ نصب شده است) توان راکتیو خود را طی ۱۰ ثانیه و ۵ پله افزایش می‌دهد. با این حال در ثانیه ۳۰ از شبیه‌سازی، همچنان دامنه ولتاژ شین ۸ کمتر از مقدار آستانه TH_V خواهد بود. همچنین طبق شکل (۱۶)، مقدار شاخص RPRI برای ژنراتور G02 (در VCA2) کمتر از صفر است. بنابراین در ثانیه ۳۰، خازن متصل به شین ۷ (در VCA2) به عنوان نزدیک‌ترین خازن به شین ۸ توان راکتیو خود را افزایش می‌دهد (در مدت ۱۰ ثانیه و در پنج پله). اگرچه این اقدامات سبب بهبود وضعیت پایداری می‌شود، در ثانیه ۳۶ عملکرد نامناسب OLTC‌ها سبب کاهش ولتاژ شین ۳ می‌شود که بر اثر آن، الگوریتم پیشنهادی (طبق گام ۲) توقف عملکرد آن‌ها را اجرا می‌کند.

در ادامه این روند، در ثانیه ۴۰، خازن متصل به شین ۳ (در VCA 2) به عنوان خازن نزدیک به شین ۸ توان راکتیو خود را افزایش می‌دهد (در مدت ۱۰ ثانیه و در پنج پله). با این حال، مقدار دامنه ولتاژ شین ۸ (در VCA2) همچنان کمتر از TH_V و مقدار RPRI برای G02 (در VCA2) کمتر از صفر است.

در ثانیه ۵۰، همچنان مقدار دامنه ولتاژ شین ۸ از مقدار آستانه TH_V کمتر است و مقدار RPRI برای G02 نیز کمتر از صفر خواهد بود که سبب می‌شود خازن متصل به شین ۱۲ (در VCA2) توان راکتیو خود را افزایش دهد. پس از سپری شدن ΔT_2 ثانیه از به مدار آمدن آخرین پله خازن مذکور، همچنان مقدار دامنه ولتاژ شین ۸ از مقدار آستانه TH_V کمتر است و مقدار RPRI برای G02 نیز کمتر از صفر خواهد بود و به همین دلیل، SPS وارد گام ۴ می‌شود. در این گام با اعمال ۱۰ مرتبه حذف بار (به مقدار ۲٪) بر روی نزدیک‌ترین بار به ژنراتور G02 در VCA2 (بار متصل به شین ۳۱) مقدار شاخص RPRI در ثانیه ۸۲

- [12] Atighechi, H.; Po, H.; Ebrahimi, S.; Jun, L.; Guihua, W.; Liwei, W. "An effective load shedding remedial action scheme considering wind farms generation"; *Int J Electr Power Energy Syst.* 2018, 95, 353-363.
- [13] Van Cutsem, T.; Mevludin, G.; William, R.; Claudio, C.; Michael, K.; Leonardo, L.; Milano, F.; Papangelis, L.; Ramos, RA.; Dos Santos, JA.; Tamimi, B. "Test Systems for Voltage Stability Studies: IEEE Task Force on Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2020, DOI: 10.1109/TPWRS.2020.2976834
- [14] Nassaj, A.; Shahrtash, S. "Wide-Area Agent-Based Scheme for Volt/Var Control with a Cooperative Framework Based on Game Theory"; *IET Gen Transm Distrib.* 2020, DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.0285
- [15] Nassaj, A.; Shahrtash, S. "A predictive agent-based scheme for post-disturbance voltage control"; *IET Gen Transm Distrib.* 2018, 98, 189-198.
- [16] Huang, H.; Kazerooni, M.; Hossain-McKenzie, S.; Etigowni, S.; Zonouz, S.; Davis, K. "Fast Generation Redispatch Techniques for Automated Remedial Action Schemes"; 20th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP). 2019, 1-8, IEEE.
- [17] Ghahremani, E.; Heniche, A.; Perron, M.; Racine, M.; Landry, S.; Akremi, H. "A detailed presentation of an innovative local and wide-area special protection scheme to avoid voltage collapse: From proof of concept to grid implementation"; *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019, 10, 5196 - 5211.
- [18] Choi, D. H.; Lee, S. H.; Kang, Y. C.; Park, J.W. "Analysis on special protection scheme of Korea electric power system by fully utilizing statcom in a generation side"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2017, 32, 1882-1890.
- [19] Derafshian, M.; Amjady, N.; Dehghan, S. "Special protection scheme against voltage collapse"; *IET Gen Transm Distrib.* 2016, 10, 341-351.
- [20] Karbalaee, F.; Shahbazi, H. "Determining an appropriate partitioning method to reduce the power system dimensions for real time voltage control"; *Int J Electr Power Energy Syst.* 2018, 100, 58-68.
- [21] Shahidepour, M.; Wang, Y. "Communication and control in electric power systems: applications of parallel and distributed processing"; John Wiley & Sons, 2004.
- [22] Zhong, J.; Nobile, E.; Bose, A.; Bhattacharya, K. "Localized reactive power markets using the concept of voltage control areas"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2004, 19, 1555-1561.
- [23] Pérez-Londoño, S.; Rodríguez, L.; Olivar, G. "A simplified voltage stability index (SVSI)"; *Int J Electr Power Energy Syst.* 2014, 63, 806-813.
- [24] Wang, L.; Liu, Y.; Luan, Z. "Power transmission paths based voltage stability assessment"; *Transm and Distrib Conf and Exhib: Asia and Pacific.* 2005, 1-5.
- [25] S. Pérez-Londoño, S.; Olivar-Tost, G.; Mora-Florez, J.; "Online determination of voltage stability weak areas for situational awareness improvement"; *Electric Power Systems Research vol.* 2017, 145, 112-121.
- [26] Yari, S.; Khoshkhou, H. "An Effective Corrective Remedial Action Algorithm to Prevent Voltage Instability"; *Conf. Knowledge Based Eng and Innovation (KBEI).* 2019, 460-466.

پایداری انتخاب شوند. سپس، در جهت تأمین توان راکتیو در شبکه، الگوریتم پیشنهادی از خازن‌های موازی سویچ شونده استفاده می‌کند، که قادر است به سرعت میزان تولید توان خود را تغییر داده و به‌طور مؤثر وضعیت پایداری ولتاژ را بهبود بخشد. در صورتی که اقدامات فوق مؤثر واقع نشود، در گام بعدی، از حذف بار استفاده می‌شود تا مانع از وقوع ناپایداری ولتاژ شود. نتایج شبیه‌سازی دینامیکی انجام‌شده در شبکه‌های IEEE 39- Bus و Nordic32، اثربخشی این‌روش را در اجرای به‌موقع اقدامات اصلاحی مناسب و حفظ پایداری ولتاژ سامانه قدرت نشان می‌دهد. همچنین مقایسه نتایج ارائه‌شده با روش‌های پیشین، تأییدکننده کارایی این‌روش و اجرای حذف بار کمتر جهت جلوگیری از خروج نقطه‌کار از ناحیه جذب شبکه است.

۶. مراجع‌ها

- [1] Khoshkhou, H.; Shahrtash, S. "On-line dynamic voltage instability prediction based on decision tree supported by a wide-area measurement system"; *IET Gen Transm Distrib.* 2012, 6, 1143-1152.
- [2] Yari, S.; Khoshkhou, H. "A comprehensive assessment to propose an improved line stability index"; *Int Trans Electr Energy Syst.* 2019, 29, e2809.
- [3] Aghdam, P.; Khoshkhou, H. "Voltage stability assessment algorithm to predict power system loadability margin"; *IET Gen Transm Distrib.* 2020, DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.0230.
- [4] Izadi, R. "Graphite bombs and EMP and HPM"; *J. Military Sci. & Tactics.* 2008, 4, 57-73 (In Persian).
- [5] Gaffarpour, R.; Ranjbar, A. "Presentation of Special Protection Scheme in Power System to Reduce Graphite Bomb Attacks Damages"; *J. Advanced Defence Sci. & Tech.* 2017, 4, 33-34 (In Persian).
- [6] Nassaj, A.; Shahrtash, S. M. "An Accelerated Preventive Agent Based Scheme for Postdisturbance Voltage Control and Loss Reduction"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2018, 33, 4508-4518.
- [7] Islam, S. R.; Sutanto, D.; Muttaqi, K. M. "Coordinated decentralized emergency voltage and reactive power control to prevent long-term voltage instability in a power system"; *IEEE Trans. Power Syst.* 2015, 30, 2591-2603.
- [8] North American electric reliability corporation (NERC). "Special protection systems (SPS) and remedial action schemes (RAS): assessment of definition, regional practices, and application of related standards"; 2013.
- [9] Arabzadeh, M.; Seifi, H.; Sheikh-El-Eslami, M. K. "A new mechanism for remedial action schemes design in a multi-area power system considering competitive participation of multiple electricity market players"; *Int J Electr Power Energy Syst.* 2018, 103, 31-42.
- [10] Aman, M.M.; Arshad, M.; Zuberi, H.K.; Laghari, J.A. "A hybrid scheme of load shedding using globalized frequency and localized voltage (GFLV) controller"; *Int J Electr Power Energy Syst.* 2019, 113, 674-685.
- [11] Xie, Jing.; Chen, Liu.; Marino, Sforina.; Yin, Xu. "Consensus weighting of a multi-agent system for load shedding"; *Int J Electr Power Energy Syst.* 2020, 117, DOI.10.1016/j.ijepes.2019.105615.