

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۹

جای گذاری استراتژیک خازن جهت کاهش احتمال فروپاشی ولتاژ در سیستم قدرت

اشکان صوفی زاده^۱، بهروز طوسی^{۲*}، وحید تلاوت^۳، سعید رضائیان مرجانی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

a.sufizadeh@urmia.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

b.tousi@urmia.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

v.talavat@urmia.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

s.rezaeian@urmia.ac.ir

چکیده: پایداری ولتاژ باس، فاکتور بسیار مهمی در قابلیت اطمینان سیستم قدرت است. اگر سیستم قدرت توانایی پاسخ به تقاضای توان راکتیو را روی یک باس نداشته باشد، ولتاژ شروع به کاهش کرده، در صورت عدم عملکرد سیستم حفاظت الکتریکی می تواند منجر به فروپاشی ولتاژ گردد. بنابراین جبران سازی توان راکتیو می تواند احتمال فروپاشی ولتاژ را کاهش دهد. در مقاله حاضر ضمن بررسی معیارهای موجود برای مشخص کردن ضعیف ترین باس از نظر توان راکتیو، دو معیار جدید برای این منظور معرفی شده است. شبکه ۳۰ باس استاندارد IEEE مطالعه شده و احتمال قرار گرفتن شبکه در ناحیه های ولتاژی نرمال، زیر ولتاژ، ریسک و فروپاشی ولتاژ محاسبه شده است، سپس با جای گذاری خازن ها با استفاده از الگوریتم PSO، احتمال فروپاشی شبکه به طور چشمگیری کاهش داده شده است. همچنین معیارهای جدید برای مشخص کردن ضعیف ترین باس سیستم مورد بررسی قرار گرفته و برتری آن ها بر معیارهای مرسوم اثبات شده است. نتیجه استفاده از اندیس های ارائه شده و نتیجه استفاده از الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی مشابه هم هستند و می توانند برای کاهش احتمال فروپاشی در شبکه برق استفاده گردند.

واژه های کلیدی: فروپاشی ولتاژ، قابلیت اطمینان، خازن، توان راکتیو، PSO.

۱. مقدمه

ناتوانی سیستم قدرت در پاسخ به تقاضای توان اکتیو و راکتیو باعث ایجاد مشکلات پایداری ولتاژی می‌شود. عدم کفایت توان اکتیو و راکتیو یا هر دو روی یک باس باعث شروع افت ولتاژ شده، ولتاژ به محدوده زیر ولتاژ کاهش می‌یابد. در این زمان در صورت عمل نکردن تجهیزات اتوماتیک کنترل ولتاژی یا حذف بار دستی، شرایط بدتر می‌شود، ولتاژ بیشتر کاهش می‌یابد و وارد ناحیه فروپاشی ولتاژ می‌گردد. فروپاشی ولتاژ روی یک یا دو باس از سیستم می‌تواند منجر به یک خاموشی گسترده گردد [۱].

در طراحی و ارزیابی سیستم‌های قدرت پایداری ولتاژ یکی از دغدغه‌های مهم است [۲]. ولتاژ باس یک معیار مستقیم برای تعیین تعادل توان راکتیو است و بسیاری از روش‌های پیش‌بینی فروپاشی ولتاژ بر پایه ارزیابی ولتاژ باس هستند [۳ و ۴].

روش‌های متعددی برای ارزیابی پایداری ولتاژ ارائه و معیارهای متعددی استفاده شده است. در مقاله [۵] یک روش مبتنی بر حساسیت ارائه شده و یک شاخص پایداری ولتاژ برای تشخیص باس‌های حساس به فروپاشی ولتاژ پیشنهاد شده است. در مقاله [۶] دو معیار سنجش پایداری ولتاژ (VSI^1) برای سنجش پایداری ولتاژ در شبکه‌های هوشمند انرژی پیشنهاد شده است. در مرجع [۷] ارزیابی پایداری ولتاژی توسط آنالیز مدار معادل گره انجام شده است. در مرجع [۸] یک روش سنجش پایداری ولتاژ برای تعیین بارگذاری باس‌ها از نقطه‌نظر فروپاشی ولتاژ ارائه شده است. در مرجع [۹] یک روش برای تعیین بارگذاری حداکثر (MLP^2) ارائه شده است که محدوده ایمن برای فروپاشی ولتاژ تعیین می‌کند. در مرجع [۱۰] یک روش جدید برای مشاهده فروپاشی ولتاژ و پیش‌بینی عبور از نقاط بحرانی در سیستم قدرت ارائه شده است. در مرجع [۱۱] یک سری از معادلات تعادل توان ارائه شده و راه‌حل این معادلات با روش NR ارائه شده است. در مرجع [۱۲] یک معیار جدید پایداری ولتاژ به نام LVSI ارائه شده است که مقاومت، راکتانس و شارژ خازنی خط را نیز که معمولاً در معیارهای سنجش پایداری استفاده نمی‌شوند در نظر می‌گیرد. تمامی این روش‌ها در سرعت و دقت متفاوت‌اند. همچنین بسیاری از این روش‌ها هنوز به‌صورت عملی استفاده نشده‌اند.

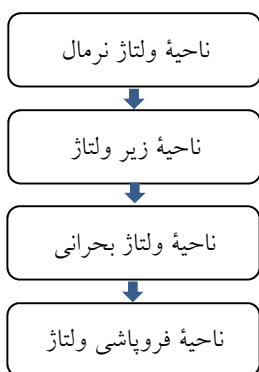
بعضی روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم بر اساس پایداری ولتاژ بنا شده‌اند. در مرجع [۱۳] چهارچوبی برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت اطمینان ارائه شده و نیز یک شاخص نشان‌دهنده

1. Voltage stability index
2. Maximum loading point

ناپایداری و نزدیکی به فروپاشی معرفی شده است. در مرجع [۱۴] یک روش پیشرفته جست‌وجوی دوبخشی ($IBSST^3$) برای ارزیابی قابلیت اطمینان بر اساس فروپاشی ولتاژ ارائه شده که از ضرایب بارگذاری نزدیک به فروپاشی ولتاژ برای تعیین شرایط احتمالی و باس‌های ضعیف استفاده می‌کند. در مرجع [۱] یک شاخص تغییر ولتاژ باس (BVC^4) برای شناسایی باس‌های ضعیف پیشنهاد شده و چهار ناحیه پایداری برای شبکه از نظر فروپاشی ولتاژ شامل ناحیه عادی، ناحیه زیر ولتاژ، ناحیه بحران و ناحیه فروپاشی ولتاژ در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۵] برخی روش‌ها برای مشاهده و ارزیابی اطلاعات خام دریافتی از (PMU^5) ارائه شده است که از آن طریق عمل کنترلی مناسب برای شروع احتمال فروپاشی ولتاژ صورت پذیرد. مرجع [۱۶] عملکرد شبکه‌های عصبی بازگردنده (RNN^6) را در پیش‌بینی فروپاشی ولتاژ بررسی کرده است. مرجع [۱۷] از اطلاعات اندازه‌گیری فازی از باس‌های انتخاب‌شده برای تعیین شرایط سیستم برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژی استفاده می‌کند. تمامی این روش‌ها صرفاً به معرفی شاخص‌هایی برای ارزیابی قابلیت اطمینان پرداخته و فرایند کاهش احتمال فروپاشی ولتاژ در شبکه و اقدامات لازم را مورد توجه قرار نداده‌اند.

در سیستم‌های واقعی، کفایت توان راکتیو در دستیابی به یک ولتاژ پایدار برای باس بسیار مهم و ضروری است. تعیین مقدار بهینه توان راکتیو و انتخاب باس مناسب برای نصب آن یک فاکتور مهم و کلیدی در حصول پایداری ولتاژ است. در مرجع [۱۸] تأثیرات SVC^7 و $TCSC^8$ در پدیده فروپاشی ولتاژ بررسی شده است. در مرجع [۱۹] کلیدزنی بحرانی خازن‌ها برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژی در شبکه انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۲۰] از منابع تولید پراکنده برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در شبکه قدرت استفاده کرده؛ هرچند که جای‌گذاری نامناسب DG باعث افزایش تلفات و هزینه‌های بهره‌برداری شده است [۲۱]. در مرجع [۲۲] یک سیستم جبران‌سازی شنت گسترده برای کنترل ولتاژ دینامیکی محلی برای جلوگیری از پدیده فروپاشی ولتاژی با استفاده از $synchro-phasors$ توسط شرکت Hydro-Québec معرفی شده و در پروژه $GLCC^9$ مورد استفاده قرار گرفته است. در سالیان اخیر نیز با پیشرفت‌های صورت‌گرفته در زمینه الکترونیک قدرت استفاده از

3. Improved Bisection Searching Technique
4. Bus Voltage Change
5. Phasor Measurement unit
6. Recurrent neural network
7. Static VAR compensator
8. Thyristor-controlled series capacitors
9. Global and Local Control of Dynamic Shunt Compensator



شکل (۲): ناحیه‌های ولتاژی سیستم قدرت

۲. قابلیت اطمینان و فروپاشی ولتاژ

ولتاژ باس تابعی از توان اکتیو و راکتیو است. ولتاژ باس را می‌توان از معادله (۱) به دست آورد [۲۷ و ۲۸].

$$V(P, Q) = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - XQE^2 - X^2P^2} \quad (1)$$

که در آن P توان اکتیو، Q توان راکتیو، E ولتاژ داخلی ژنراتور معادل، و X راکتانس است.

مدار معادل یک باس بار که توسط یک خط انتقال تغذیه می‌شود و به صورت یک ژنراتور معادل مدل شده، در شکل (۱) نشان داده شده است.

در سیستم‌های قدرت، پایداری ولتاژ توسط رله‌های ولتاژ زیاد و زیر ولتاژ کنترل می‌شود که سیستم را در برابر اختلالات تا ۱۰٪ ولتاژ نامی حفاظت می‌کنند. بر اساس استاندارد IEEE 1159 یک زیر ولتاژ، کاهش در مقدار مؤثر ولتاژ زیر ۰/۹ پریونیت است که بیش از ۱ دقیقه به طول بینجامد. اگر حفاظت زیر ولتاژ تحت شرایط افزایش بار ناگهانی یا بروز خطا به درستی عمل نکند، منجر به ایجاد ولتاژ بحرانی یا فروپاشی ولتاژ خواهد شد. رله‌های زیر فرکانس و حذف بار اتوماتیک و دستی نیز از سایر تجهیزات حفاظت در برابر فروپاشی ولتاژ هستند.

۱.۲. قابلیت اطمینان

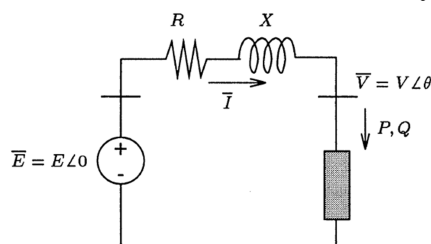
قابلیت اطمینان سیستم از نظر فروپاشی ولتاژی پارامتر بسیار مهم است. یک خاموشی سراسری گسترده معمولاً بعد از فروپاشی ولتاژی روی یک یا چند باس رخ می‌دهد. در مرجع [۱] قابلیت اطمینان شبکه به چهار ناحیه احتمالاتی تقسیم شده است. احتمال اینکه شبکه در وضعیت نرمال ولتاژی باشد p_{nz} احتمال اینکه شبکه در شرایط زیر ولتاژ باشد p_{uz} ، احتمال اینکه شبکه در

تجهیزاتی مثل SVC برای کنترل ولتاژ باس و جلوگیری از فروپاشی ولتاژی مرسوم شده است [۱۵]. همچنین در مرجع [۴ و ۱۵] از PMU برای ارزیابی و مشاهده ولتاژ سیستم و یک روش کنترلی برای تزریق توان راکتیو اضطراری به سیستم استفاده شده است.

استفاده از خازن‌های شنت یکی از روش‌های مرسوم و قدیمی برای جبران‌سازی توان راکتیو بوده و جبران‌سازی سری توسط خازن نیز بسیار مرسوم است [۲۳-۲۵]. در مرجع [۲۶] خازن‌گذاری به روش هوشمند روی شبکه ۳۰ باسه برای کاهش تلفات، کاهش هزینه‌ها و جبران‌سازی توان راکتیو در حضور DGها صورت گرفته است.

تمرکز اصلی این مقاله روی بررسی اثر خازن‌ها در قابلیت اطمینان ولتاژی شبکه و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ است. هدف اصلی جای‌گذاری خازن در محل مناسب و با مقدار مناسب است تا احتمال فروپاشی کاهش یابد. محدودیت‌های شاخص‌های موجود برای تعیین ضعیف‌ترین باس در بالا مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله دو شاخص جدید برای بررسی وضعیت باس از نظر فروپاشی ولتاژ بررسی شده است. این دو اندیس تغییرات توان راکتیو و توان ظاهری را نسبت به تغییرات ولتاژ اندازه‌گیری کرده‌اند و از روی آن ضعیف‌ترین باس تعیین شده است. این دو شاخص جدید با شاخص‌های قبلی موجود مقایسه شده است. همچنین با استفاده از جای‌گذاری خازن‌ها به دو روش دستی و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) احتمال فروپاشی در شبکه کاهش یافته است.

ادامه مقاله به این صورت مرتب شده است: در بخش ۲ فروپاشی ولتاژ بررسی شده است. در بخش ۳، قابلیت اطمینان شبکه از منظر فروپاشی ولتاژ بررسی شده و در بخش ۴، شاخص‌های موجود برای بررسی ولتاژ باس از لحاظ نزدیک بودن به فروپاشی بررسی و دو شاخص جدید معرفی شده است. در بخش ۵، شبیه‌سازی‌های انجام شده تشریح گردیده و داده‌ها مقایسه و بررسی شده و نتایج تحلیل شده است. در نهایت در بخش ۶ نتیجه‌گیری صورت گرفته است.



شکل (۱): مدار معادل باس بار

$$EBVD = \sum_{i=1}^M \rho_l \left(\sum_{i=1}^N \rho_i (V_{jil}^{init} - V_{jil}^{col}) \right) \quad (7)$$

که در آن N تعداد تمامی حالات ممکنه، V_{jil}^{col} و V_{jil}^{init} به ترتیب ولتاژ اولیه و ولتاژ فروپاشی تحت بارگذاری ۱ و برای باس j است. باسی که بیشترین افت ولتاژ مورد انتظار را داشته باشد ضعیف ترین باس سیستم است.

۳.۳. معیار نزدیکی به ولتاژ فروپاشی

معیار نزدیکی به ولتاژ فروپاشی برای هر باس از رابطه زیر محاسبه می شود [۱].

$$VCPI_{si} = \frac{\sum \Delta S_{gj}}{\Delta S_i} \quad (8)$$

که در آن، ΔS_i یک افزایش در سطح توان ظاهری در باس i و ΔS_{gj} یک افزایش در تولید باس j است. باسی که بیشترین مقدار معیار نزدیکی به ولتاژ فروپاشی را داشته باشد، ضعیف ترین باس است.

۴. معیار پیشنهاد شده برای شناسایی ضعیف ترین باس

مشخصه ولتاژ- توان راکتیو سیستم نشان دهنده حساسیت ذاتی ولتاژ سیستم تغذیه به تغییرات توان راکتیو است. این رابطه به صورت زیر قابل نمایش است [۱]:

$$V \approx E1 - \frac{Q_s}{S_{sc}} \quad (9)$$

در روش پیشنهاد شده توان راکتیو، راکتیو یا هر دو در باس i به تدریج و در گام های کوچک افزایش داده می شود و تغییر ولتاژ نسبی این گام ها نسبت به میزان تغییر توان محاسبه می گردد؛ این کار تا رسیدن به فروپاشی ولتاژ ادامه می یابد. معیار تغییر ولتاژ به تغییر توان راکتیو با استفاده از رابطه (۱۰) و معیار تغییر ولتاژ به تغییر توان ظاهری با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می شوند.

$$VTQ_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta Q_i} \quad (10)$$

$$VTS_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta S_i} \quad (11)$$

در معادله (۱۰)، ΔV_i تغییرات ولتاژ به ازای هر ۱۰٪ افزایش توان راکتیو و ΔQ_i میزان افزایش توان راکتیو در باس i است. در معادله (۱۱)، V_i تغییرات ولتاژ به ازای هر ۱۰٪ افزایش توان ظاهری و ΔS_i میزان افزایش توان ظاهری در باس i است. از آنجا که معمولاً پایداری ولتاژ سیستم بیشتر به توان راکتیو بستگی دارد، احتمالاً مقادیر VTS و VTQ برای باس های مختلف برابر خواهد بود.

ناحیه ریسک باشد p_{rz} و احتمال اینکه شبکه در ناحیه فروپاشی ولتاژ باشد، p_{cz} می باشد که بدین صورت تعریف می شود:

$$p_{nz} = \sum_{l=1}^m p_l \left(\sum_{i \in VN_i} p_i \right) \quad (2)$$

$$p_{uz} = \sum_{l=1}^m p_l \left(\sum_{i \in VU_i} p_i \right) \quad (3)$$

$$p_{rz} = \sum_{l=1}^m p_l \left(\sum_{i \in VR_i} p_i \right) \quad (4)$$

$$p_{cz} = \sum_{l=1}^m p_l \left(\sum_{i \in VC_i} p_i \right) \quad (5)$$

که VC_i, VR_i, VU_i, VN_i مجموعه حالت هایی هستند که ولتاژ شبکه به ترتیب در نواحی ولتاژی نرمال، زیر ولتاژ، ریسک و فروپاشی ولتاژ تحت بار l قرار می گیرد.

۳. معیارهای سنجش پایداری ولتاژ

ضعیف ترین باس سیستم معمولاً سه مشخصه اصلی دارد: توان راکتیو سنگین، خطوط و ارتباطات ضعیف با سایر باس ها، واقع شدن در مناطق دور از منابع کنترل ولتاژ [۲۹]. روش های متفاوتی برای مشخص کردن تعادل توان اکتیو و راکتیو روی یک باس وجود دارد. روش تغییر ولتاژ نسبی، معیار نزدیکی به فروپاشی ولتاژ و معیار قابلیت اطمینان باس از آن جمله اند که در ادامه به آن ها پرداخته شده است.

۱.۳. معیار تغییر ولتاژ نسبی

ضعیف ترین باس سیستم باسی است که به ازای افزایش یک بار مشخص بیشترین تغییرات ولتاژ را تجربه می کند. معیار تغییر ولتاژ نسبی در باس i به شکل زیر تعریف می شود [۱]:

$$VC_i = \frac{V_i^{init} - V_i^{limit}}{V_i^{limit}} \quad (6)$$

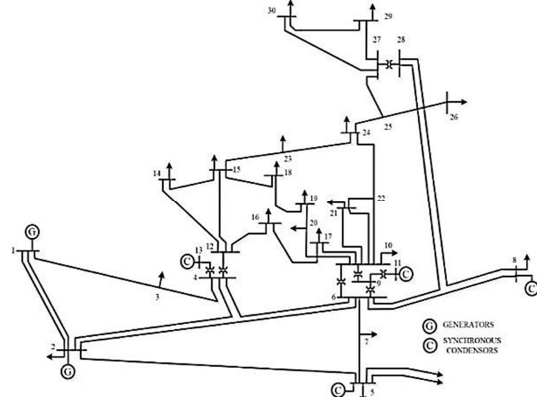
که در آن VC_i تغییرات ولتاژ باس i و V_i^{init} ولتاژ اولیه باس i و V_i^{limit} حد پایداری ولتاژی باس i می باشد.

۲.۳. معیار قابلیت اطمینان باس

یک معیار قابلیت اطمینان برای تمامی سطوح بارگذاری ارائه شده که افت ولتاژ مورد انتظار را که ریسک فروپاشی ولتاژ است، تعیین می کند و از رابطه زیر محاسبه می شود [۱]:

۵. شبیه‌سازی و نتایج

سیستم استاندارد ۳۰ باس IEEE، برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. در این سیستم دو باس تولید (باس ۱ و ۲)، چهار باس جبران‌سازی (باس‌های ۵، ۸، ۱۱ و ۱۳) و ۴۱ خط وجود دارد، مجموع بارهای اکتیو MW ۷۱۴/۲ و مجموع بارهای راکتیو MVAR ۳۱۸ است که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): شبکه ۳۰ باس IEEE

صفر تعیین می‌شود. همچنین یک راه دستی در نظر گرفته شده است تا سیستم ضعیف‌ترین باس‌ها و محتمل‌ترین آن‌ها به فروپاشی را شناسایی کرده، به اپراتور اعلام کند و اپراتور به صورت دستی توسط حذف بار بتواند احتمال فروپاشی سیستم را کاهش دهد.

۲.۵. جبران‌سازی توان راکتیو

جبران‌سازی توان راکتیو به معنی مدیریت توان راکتیو برای بهبود عملکرد شبکه قدرت است. پیدا کردن جبران‌ساز مناسب و محل و مقدار آن نکته کلیدی در حصول پایداری ولتاژ سیستم و بهبود قابلیت اطمینان است. خازن‌ها مرسوم‌ترین نوع جبران‌سازهای توان راکتیو هستند [۴، ۱۵، ۲۳، ۳۰ و ۳۱].

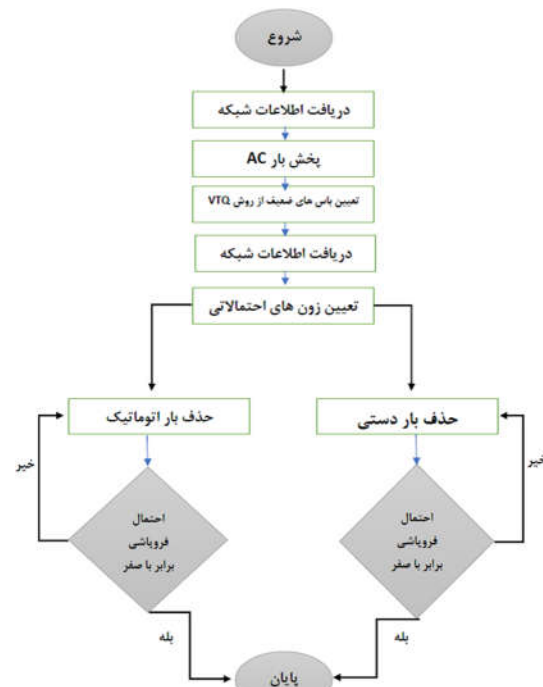
۳.۵. ارزیابی سیستم

اولین گام مرتب کردن باس‌های سیستم قدرت با مشخصه‌های ضعیف‌ترین باس است. در جدول (۱) با سه معیار تغییر ولتاژ نسبی، تغییرات ولتاژ به تغییرات توان راکتیو و تغییرات ولتاژ به تغییرات توان ظاهری، باس‌های سیستم از ضعیف‌ترین به قوی‌ترین مرتب شده‌اند.

جدول (۱): ضعیف‌ترین باس‌های سیستم

| V.C | | اندیس پیشنهادی (V.T.Q) | | اندیس پیشنهادی (V.T.S) | |
|------|-----|------------------------|-----|------------------------|-----|
| Rank | Bus | Rank | Bus | Rank | Bus |
| ۱ | ۳۰ | ۱ | ۲۸ | ۱ | ۲۸ |
| ۲ | ۲۶ | ۲ | ۲۷ | ۲ | ۲۷ |
| ۳ | ۲۹ | ۳ | ۲۵ | ۳ | ۲۵ |
| ۴ | ۲۴ | ۴ | ۲۲ | ۴ | ۲۲ |
| ۵ | ۲۵ | ۵ | ۱۳ | ۵ | ۱۳ |
| ۶ | ۱۹ | ۶ | ۱۱ | ۶ | ۱۱ |
| ۷ | ۲۳ | ۷ | ۹ | ۷ | ۹ |
| ۸ | ۲۰ | ۸ | ۶ | ۸ | ۶ |
| ۹ | ۱۸ | ۹ | ۱ | ۹ | ۱ |
| ۱۰ | ۲۱ | ۱۰ | ۲۰ | ۱۰ | ۱۲ |

در گام دوم، سیستم قدرت بررسی شده است و با توجه به احتمال خروج خطوط، احتمال خروج ژنراتورها و در بارگذاری‌های مختلف، احتمال قرارگیری سیستم در یکی از نواحی ولتاژی نرمال، زیر، ریسک و فروپاشی مشخص می‌شود. کلیه داده‌ها از جداول مرجع [۱] برداشت شده است. نمودارهای احتمالاتی در شکل‌های (۳) تا (۶) در ضریب بارهای به ترتیب $LF=1.5$ ، $LF=2$ ، $LF=2.5$ نشان داده شده است. این نتایج دقیقاً نتایج مرجع [۱] بوده و صحت شبیه‌سازی انجام‌شده را نشان می‌دهد.



شکل (۴): روندنمای نحوه ارزیابی سیستم

۱.۵. روندنمای پیشنهادی برای ارزیابی سیستم

روندنمای پیشنهادی برای ارزیابی سیستم، محاسبه قابلیت اطمینان شبکه و مراحل کاهش احتمال فروپاشی ولتاژی به دو صورت دستی و اتوماتیک به صورت شکل (۴) است. در نهایت، در این فرایند مقدار و محل بهینه خازن‌ها برای کاهش احتمال فروپاشی ولتاژی به

۴.۵. ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

برای مثال در جدول (۵) در $L.F=2.5$ بدون جبران‌سازی $P_{cz}=17\%$ که با استفاده از خازن‌گذاری با الگوریتم PSO باس ۲۷ به ۳ درصد کاهش یافته است. همچنین با جای‌گذاری ۲ عدد خازن روی باس‌های ۲۷ و ۲۲ احتمال فروپاشی در سیستم به ۱٪ کاهش یافته است.

۵.۵. ارزیابی عملکرد معیارهای شناسایی ضعیف‌ترین

باس پیشنهادشده

نتایج نشان می‌دهد که PSO خازن‌گذاری را روی باس‌های ۲۷ و ۲۲ انجام داده که در معیارهای جدید پیشنهادی به ترتیب در رتبه‌های ۲ و ۴ هستند. ولی این باس‌ها در معیار ولتاژ نسبی حتی در بین ۱۰ باس ضعیف نیستند. به این ترتیب می‌توان برتری معیارهای اراده‌شده را بر معیار ولتاژ نسبی تأیید کرد. همچنین با توجه به اینکه اعداد به‌دست‌آمده از معیار نسبت ولتاژ به توان راکتیو با اعداد به‌دست‌آمده از معیار ولتاژ بر توان ظاهری برابری برابری می‌توان نتیجه گرفت که ضعیف‌ترین باس سیستم از نظر ولتاژی کاملاً وابسته به توان راکتیو است و توان اکتیو تأثیر زیادی بر آن ندارد.

جدول (۲): نتایج خازن‌گذاری روی ضعیف‌ترین باس در $LF=2$

| | جبران‌سازی ۱۰ | جبران‌سازی ۳۰ |
|----------|---------------|----------------|
| | جبران‌سازی ۱۰ | جبران‌سازی ۳۰ |
| $LF=2$ | مگاواتی روی | بدون جبران‌ساز |
| | ضعیف‌ترین باس | ضعیف‌ترین باس |
| p_{nz} | ٪۱۸ | ٪۱۸ |
| p_{uz} | ٪۸۰ | ٪۷۸ |
| p_{rz} | ۰ | ٪۱ |
| p_{cz} | ٪۲ | ٪۳ |

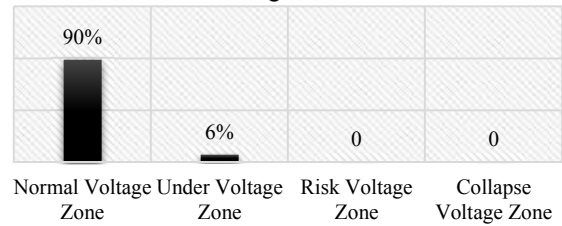
جدول (۳): نتایج خازن‌گذاری روی ضعیف‌ترین باس در $LF=2.5$

| | جبران‌سازی ۱۰ | جبران‌سازی ۳۰ |
|----------|---------------|----------------|
| | جبران‌سازی ۱۰ | جبران‌سازی ۳۰ |
| $LF=2.5$ | مگاواتی روی | بدون جبران‌ساز |
| | ضعیف‌ترین باس | ضعیف‌ترین باس |
| p_{nz} | ٪۱۷ | ٪۱۷ |
| p_{uz} | ٪۶۲ | ٪۶۰ |
| p_{rz} | ٪۵ | ٪۶ |
| p_{cz} | ٪۱۶ | ٪۹ |

جدول (۴): نتایج خازن‌گذاری با الگوریتم PSO در $LF=2$

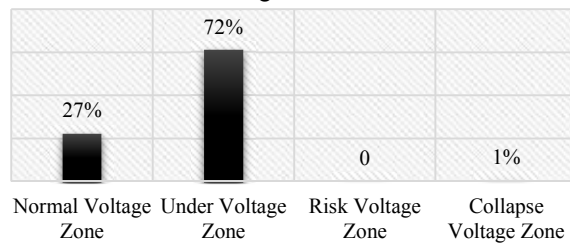
| | PSO On bus 22 (81MVar) | بدون جبران‌ساز | PSO On bus 22 (73 MVar, 24(71 MVar) |
|----------|------------------------------|-------------------|---|
| $LF=2$ | | | |
| p_{nz} | ٪۳۹ | ٪۱۸ | ٪۶۰ |
| p_{uz} | ٪۵۹ | ٪۷۸ | ٪۳۸ |
| p_{rz} | ۰ | ٪۱ | ۰ |
| p_{cz} | ٪۱ | ٪۳ | ۰ |

Loading Factor=1



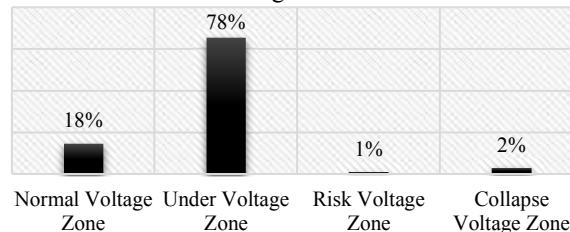
شکل (۵): نمودار احتمالاتی در بارگذاری ۱

Loading Factor=۱.۵



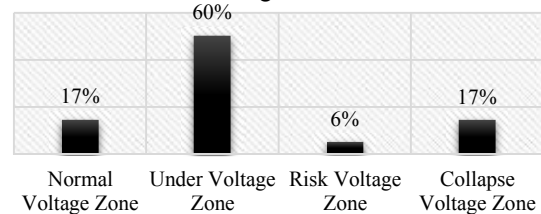
شکل (۶): نمودار احتمالاتی در بارگذاری ۱/۵

Loading Factor=2



شکل (۷): نمودار احتمالاتی در بارگذاری ۲

Loading Factor=2.5



شکل (۸): نمودار احتمالاتی در بارگذاری ۲/۵

در گام سوم، برای راستی‌آزمایی معیارهای قابلیت اطمینان، یک خازن با مقادیر مختلف روی باسی که توسط معیار تغییر ولتاژ نسبی تعیین شده است نصب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نه تنها احتمال فروپاشی ولتاژی با جبران‌سازی روی ضعیف‌ترین باس کاهش نمی‌یابد حتی در بعضی حالات افزایش خواهد داشت. نتایج در جداول (۲ و ۳) نشان داده شده است. برای انتخاب باس مناسب و مقدار مناسب برای نصب خازن از الگوریتم PSO بهره می‌بریم تا با جای‌گذاری خازن احتمال فروپاشی صفر شود. نتایج در جداول (۴ و ۵) نشان داده شده است.

جدول (۵): نتایج خازن‌گذاری با الگوریتم PSO در $LF=2.5$

| LF=2.5 | PSO | | PSO |
|----------|-----------------------|----------------|--------------------------------------|
| | On bus 27 (90MVAr) | بدون جبران‌ساز | On bus 19 (60MVAr, 27(52 MVAr) |
| p_{nz} | ٪۲۳ | ٪۱۷ | ٪۳۵ |
| p_{uz} | ٪۷۳ | ٪۶۰ | ٪۶۳ |
| p_{rz} | ٪۱ | ٪۶ | ٪۱ |
| p_{cz} | ٪۳ | ٪۱۷ | ۰ |

۶. نتیجه‌گیری

کرده‌اند یعنی روش تغییر ولتاژ نه تنها احتمال فروپاشی ولتاژ را کاهش نداده حتی ممکن است آن را افزایش دهد. برای انتخاب باس مناسب برای خازن‌گذاری دو معیار جدید معرفی شده است. در ضمن از روش PSO برای انتخاب باس مناسب برای خازن‌گذاری هم بهره‌گیری شده است. باس‌هایی که روش PSO انتخاب می‌کنند همان باس‌هایی هستند که معیارهای جدید ارائه می‌دهند؛ که صحت کار با اندیس‌های جدید را تأیید کرده و با خازن‌گذاری در این باس‌ها احتمال فروپاشی شبکه به شدت کاهش یافته است. بنابراین در این مقاله هم توسط اندیس‌های جدید و هم توسط الگوریتم‌های هوشمند احتمال فروپاشی سیستم کاهش یافته است که نتایج این دو تقریباً مشابه یکدیگرند. همچنین با استفاده از نتایج معیارهای جدید مشخص می‌شود که ضعیف‌ترین باس سیستم از نظر ولتاژی، باسی است که تعادل توان راکتیو ندارد و توان اکتیو نقش تعیین‌کننده‌ای در مورد انتخاب ضعیف‌ترین باس ندارد. روش‌های ارائه‌شده در این مقاله برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در شبکه برق مفید و مؤثر خواهند بود.

این مقاله راه‌حلی برای کاهش حوادث فروپاشی ولتاژ در شبکه قدرت ارائه می‌کند. برای این منظور شبکه استاندارد ۳۰ باس IEEE مطالعه شده است. باس‌ها از ضعیف‌ترین به قوی‌ترین باس از نظر معیارهای مختلف سنجش تعادل توان راکتیو مرتب شده‌اند. احتمال فرارگیری سیستم در ناحیه فروپاشی، تحت بارگذاری‌های مختلف محاسبه شده است. سپس از خازن‌گذاری برای کاهش احتمال فروپاشی ولتاژ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که خازن‌گذاری روی ضعیف‌ترین باسی که معیارهای مرسوم مشخص

مراجع

- [1] Qin, W., Song, J., Han, X. and Wang, P., "Operational reliability assessment of power systems based on bus voltage", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 9, pp. 475-482, 2014 .
- [2] Chanda, S. and Das, B., "Identification of Weak Buses in a Power Network Using Novel Voltage Stability Indicator in Radial Distribution System", in Power Electronics (IICPE), 2010 India International Conference on, New Delhi, India, 2011 .
- [3] Chevalier, S. and Hines, P., "Mitigating the Risk of Voltage Collapse Using Statistical Measures From PMU Data", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 1, pp. 120 - 128, 2019 .
- [4] Guddanti, K. and Matavalam, A., "PMU-Based Distributed Non-Iterative Algorithm for Real-Time Voltage Stability Monitoring", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 6, pp. 5203 - 5215, 2020 .
- [5] Mahmoud, G., "Voltage stability analysis of radial distribution networks using catastrophe theory", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, no. 7, p. 612-618, 2012 .
- [6] Beigvand, S. Abdi, H. and Singh, S., "Voltage stability analysis in radial smart distribution grids", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 15, pp. 3722-3730, 2017 .
- [7] Aik, D., "Voltage Stability Assessment Using Equivalent Nodal Analysis", IEEE Transactions On Power Systems, pp. 454 - 463, 2016 .
- [8] Chanda, S. and Das, B., "Identification of weak buses in a power network using novel voltage stability indicator in radial distribution system", in Power Electronics (IICPE), 2010 India International Conference on, New Delhi, India, 2011 .
- [9] Zarate, L. and Castro, C., "Fast computation of security margins to voltage collapse based on sensitivity analysis", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 153, no. 1, pp. 35 - 43, 2006 .
- [10] Zheng, L, Hu, W. Min, Y. and ma, J., "A Novel Method to Monitor and Predict Voltage Collapse: the Critical Transitions Approach", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 2, pp. 1184 - 1194, march 2018 .
- [11] Mohamed, A. and Venkatesh, B., "Line-Wise Power Flow and Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 4, pp. 3768 - 3778, July 2018 .
- [12] Ratra, S. Tiwari, R. and Niazi, K., "Voltage stability assessment in power systems using line voltage stability index", Computers and Electrical Engineering, vol. 70, pp. 199-211, August 2018 .
- [13] Momoh, J. Makarov, Y. and Mittelstad, W., "A framework of voltage stability assessment in power system reliability analysis", IEEE Power & Energy Society, p. 1999, 484 - 491 .
- [14] Qin, W. Wang, P. and Kang, C., "Improved Bisection Searching Technique for voltage collapse analysis in reliability evaluation", in Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on, Singapore, Singapore, Singapore, 2010 .
- [15] Chevalier, S. and Hines, P., "Mitigating the Risk of Voltage Collapse Using Statistical Measures From PMU Data", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 1, pp. 120 - 128, 2019 .
- [16] Ibrahim, A. and El-Amari, N., "Particle Swarm

- Optimization trained recurrent neural network for voltage instability prediction*", Journal of Electrical Systems and Information Technology, vol. 5, no. 2, pp. 216-228, September 2018 .
- [17] Chandraa, A. and Pradhan, A., "Online voltage stability and load margin assessment using wide area", Electrical Power and Energy Systems, vol. 108, pp. 302-401, 2019 .
- [18] Caiiizares, C. and Faur, Z., "Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 1, pp. 158-165, 1999 .
- [19] Satpathy, P. Das, D. and Gupta, P., "Critical switching of capacitors to prevent voltage collapse", Electric Power Systems Research, vol. 71, no. 1, pp. 11-20, 2004 .
- [20] Ampofo, D. Al-Hinai, A. and El-Moursi, M., "Utilization of Reactive Power Resources of Distributed Generation for Voltage Collapse Prevention in Optimal Power Flow", in 2015 International Conference on Solar Energy and Building (ICS0EB), Sousse, Tunisia, 2015 .
- [21] Georgilakis, P. and Hatzigiargyriou, N., "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research", IEEE Transactions On Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 3420 - 3428, Aug. 2013 .
- [22] Perron, M. Ghahremani, E. Heniche, A. Kamwa, I. Lafond, C. Racine, M. Akreimi, H. Cadieux, P. Lebeau, S. and Landry, S., "Wide-area voltage control system of flexible AC transmission system devices to prevent voltage collapse," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 18, pp. 4556-4564, 2017 .
- [23] Yun, Z. and Cui, X., "Online Preventive Control Method for Static Voltage Stability of Large Power Grids", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 6, pp. 4689 - 4698, 2020 .
- [24] Dixon, J. Moran, L. Rodriguez, J. and Domke, R., "Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review", Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2144 - 2164, Dec. 2005 .
- [25] Yun, Z. and Cui, X., "Online Preventive Control Method for Static Voltage Stability of Large Power Grids", IEEE Transactions on Power Systems , vol. 35, no. 6, pp. 4689 - 4698, 2020 .
- [۲۶] شریعت خواه، محمدحسین، حقی فام، محمدرضا، افکوسی، محمد، «مکان یابی همزمان منابع تولید پراکنده و خازن در شبکه های توزیع و تعیین آرایش بهینه آن»، مهندسی و مدیریت انرژی، شماره اول، صفحه ۱۸۱۱، ۱۳۹۰.
- [27] Cutsem, T. and Vournas, C., *Voltage stability of electric power systems*, Boston, Springer , 1998 .
- [28] Taylor, C., *Power system voltage stability*, New York, McGraw-Hill Inc, 1994 .
- [29] Miller, T., *Reactive Power Control in Electric Systems*, India, Wiley , 1982 .
- [۳۰] سحراب محمدی، محمد مهدی قنبریان، «بررسی فروپاشی ولتاژ و پایداری ولتاژ در سیستم های قدرت شبکه های فشارقوی بوشهر»، کنفرانس ملی پژوهش های نوین در برق، کامپیوتر و مهندسی پزشکی، کازرون، ۱۳۹۶.
- [31] Chattopadhyay, T. Banerjee, S. and Chanda, C., "Impact of shunt capacitor on voltage stability analysis of distribution networks under critical loading conditions", in 2014 First International Conference on Automation, Control, Energy and Systems (ACES), Hooghy, India, 2014.

