

ارزیابی تأثیر راه کار کنترل توان راکتیو مبتنی بر ولتاژ ترمینال ژنراتورها بر دوشاخگی LIB و حد دینامیکی پایداری ولتاژ

محمد حسین ولایتی^{۱*}، نیما امجدی^۲ و عیسی خواجه‌وندی^۳

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>حد توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم قدرت، تأثیر قابل توجهی بر مرزهای استاتیکی پایداری ولتاژ مانند حداکثر بارپذیری سیستم قدرت (MLP) و مرزهای دینامیکی پایداری ولتاژ مانند نقاط دوشاخگی HB، LIB و SNB دارد. از آن جاکه رسیدن ژنراتورها به حد راکتیو خود سبب کاهش حد پایداری ولتاژ و یا بروز فروپاشی ولتاژ می‌شود، راه کارهای مختلفی به منظور کنترل و یا افزایش ظرفیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها مانند تغییر توان اکتیو تولیدی و یا ولتاژ پایانه ژنراتورها، وارد مدار کردن تجهیزات تولید توان راکتیو و ... ارائه شده است. در این مقاله، با استفاده از یک روش ترکیبی شامل شبیه‌سازی حوزه زمان، تئوری دوشاخگی و تحلیل مدال، تأثیر تغییر ولتاژ پایانه ژنراتورهای بحرانی بر حد توان راکتیو تولیدی ژنراتورها و وضعیت دینامیکی پایداری ولتاژ براساس مرزهای HB و LIB، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این راستا، رفتار مقادیر ویژه، ضرایب مشارکت و نیز ولتاژ و توان راکتیو شبکه بررسی خواهد شد. نتایج به دست آمده از این بررسی‌ها، اطلاعات قابل توجهی را برای بهره‌بردار شبکه قدرت در جهت بهبود وضعیت سیستم از نظر پایداری ولتاژ، ارائه خواهد کرد. نتایج عددی حاصل از این تحلیل بر روی سیستم‌های تست ۳۹ و ۶۸ IEEE ارائه شده است.</p>	<p>واژگان کلیدی: تحلیل مدال، دوشاخگی HB، دوشاخگی LIB، حد توان راکتیو ژنراتور، راه کار کنترل توان راکتیو.</p>

۱- مقدمه

سیستم تحریک ژنراتورها، محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها، تنظیمات ولتاژ ترمینال ژنراتورها و وقوع حالات اضطراری مانند خروج خط انتقال از مدار، از جمله مواردی هستند که تأثیر بسزایی در حدود استاتیکی و دینامیکی پایداری ولتاژ سیستم قدرت دارند [۲-۶].

حد استاتیکی پایداری ولتاژ با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی که عمدتاً مبتنی بر ماتریس ژاکوبین معادلات پخش بار سیستم قدرت می‌باشند، به دست می‌آید. این حد که به حداکثر بارپذیری سیستم قدرت (MLP^۲)

پایداری ولتاژ به عنوان یکی از مهمترین انواع پایداری سیستم‌های قدرت، به قابلیت سیستم قدرت در حفظ ولتاژهای ماندگار قابل قبول در تمامی باس‌ها در شرایط عادی و پس از وقوع یک اغتشاش در سیستم اشاره دارد [۱]. مدل بارها، پارامترهای سیستم‌های کنترلی مانند

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mvelayaty@gmail.com

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه

سمنان

^۲ Maximum Loadability Point

موسوم است، فاصله میان بار پایه سیستم قدرت و سطح باری است که دترمینان ژاکوبین پخش بار صفر می‌شود [۶ و ۷]. درحالی‌که، حد دینامیکی پایداری ولتاژ، فاصله میان بار پایه و سطح باری است که منجر به وقوع هر یک از مرزهای دوشاخگی^۱، HB^۲ و یا SNB^۳ می‌شود. مرزهای مذکور با استفاده از ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت به دست می‌آیند [۲ و ۸]. مرز HB، متناظر با رفتار نوسانی سیستم قدرت بوده به نحوی که در این حالت یک جفت مقدار ویژه بحرانی ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت از محور موهومی صفحه اعداد مختلط عبور کرده و از نیم‌صفحه چپ به نیم‌صفحه راست می‌رود [۲، ۳، ۸ و ۹]. دوشاخگی SNB که همان فروپاشی ولتاژ در سیستم قدرت است، زمانی رخ می‌دهد که ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت تکین^۴ می‌شود [۸ و ۱۰]. همچنین، چنانچه در خلال افزایش بار سیستم قدرت، ژنراتورها و یا دیگر ادوات کنترل ولتاژ سیستم قدرت مانند جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو به حد راکتیو خود برسند، در این صورت دوشاخگی LIB در سیستم قدرت رخ داده که علاوه بر کاهش حد پایداری ولتاژ، ممکن است سبب فروپاشی ولتاژ در سیستم قدرت نیز گردد [۱۱-۱۳].

از آنجایی‌که بهبود پایداری ولتاژ در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه برق اهمیت بالایی دارد، در مطالعات اخیر روش‌هایی برای کنترل ناپایداری ولتاژ براساس مرزهای SNB، HB و LIB ارائه شده است. از جمله در مراجع [۱۴ و ۱۵]، از تحلیل حساسیت مبتنی بر تقریب خطی به منظور افزایش حاشیه پایداری تا مرز HB استفاده شده است. با این حال، به دلیل شکستگی و تغییر ناگهانی رویه منحنی دوشاخگی و ضرایب مشارکت سیستم در دوشاخگی LIB، ممکن است نتایج حاصل از این تحلیل حساسیت معتبر نبوده و در نتیجه سیستم

بیشتر به سمت ناپایداری سوق داده شود. همچنین در مراجع [۱۶-۱۹]، راه‌کارهای متفاوتی به منظور مدیریت توان راکتیو تولیدی با در نظر گرفتن مسئله پایداری ولتاژ ارائه شده و تأثیر عوامل مختلف مانند رسیدن ژنراتورها به حد راکتیو خود و یا رسیدن به محدودیت تپ ترانس‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از جایابی بهینه برای ادوات جبران‌ساز توان راکتیو [۱۶]، تغییر توان راکتیو خروجی ژنراتورها از طریق تنظیم ولتاژ ترمینال و یا تغییر توان اکتیو خروجی آن‌ها [۱۱ و ۱۷] و ... از جمله روش‌های دیگری است که به منظور مدیریت توان راکتیو تولیدی ارائه شده است. در [۱۲]، تأثیر میزان توان راکتیو ژنراتورها بر نقطه دوشاخگی LIB مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج بیان شده در این مقاله، میزان ذخیره توان راکتیو ژنراتورهای مهم، تأثیر بسزایی بر نقطه دوشاخگی LIB دارد. در مرجع [۱۸]، با استفاده از تحلیل مدال^۵ ناشی از ژاکوبین پخش بار سیستم قدرت، ژنراتورهای سیستم به دو گروه ژنراتورهای مهم و ژنراتورهای با درجه اهمیت کمتر رتبه‌بندی شده و براساس نتیجه به دست آمده، برنامه‌ریزی مجدد توان راکتیو تولیدی ژنراتورها به منظور بهبود حد پایداری ولتاژ صورت گرفته است.

بنابراین، با توجه به تأثیر حد راکتیو تولیدی ژنراتورها بر مرزهای پایداری ولتاژ به‌ویژه HB و LIB، تشخیص به موقع و درک مناسب از انواع ناپایداری‌ها و ساز و کار وقوع آن‌ها جهت انجام پایش مناسب و تعیین نوع اقدام پیش‌گیری‌کننده (مانند تنظیم پارامترهای کنترلی در جهت بهبود وضعیت سیستم از نظر پایداری ولتاژ) و تصحیح‌کننده (مانند بارزدایی یا جابه‌جایی بار^۶)، ضروری است. با این حال، در هیچ مقاله‌ای تأثیر فرآیندهای کنترلی با در نظر گرفتن همزمان مرزهای HB و LIB بررسی نشده است. بنابراین در این مقاله، تأثیر تغییر ولتاژ تنظیم ژنراتورهای بحرانی بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ

¹ Hopf Bifurcation

² Limit Induced Bifurcation

³ Saddle Node Bifurcation

⁴ Singular

⁵ Modal

⁶ load Shedding

به ترتیب محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها ناشی از سیم‌پیچ‌های تحریک و استاتور را نشان می‌دهد.

$$(Q_{Gf})_{\max/\min} = \pm \sqrt{\frac{V_t^2 E_{a\max}^2}{X_d^2} - P_G^2} - \frac{V_t^2}{X_d} \quad (1)$$

$$(Q_{GS})_{\max/\min} = \pm \sqrt{V_t^2 I_{a\max}^2 - P_G^2} \quad (2)$$

با رسیدن ژنراتور/ژنراتورها به حد راکتیو خود، توان راکتیو تولیدی ژنراتورها ثابت مانده و در نتیجه ولتاژ ترمینال آن‌ها کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی نوع باس ژنراتوری از PV به PQ تغییر وضعیت می‌دهد. بروز چنین حالتی، بر هر کدام از مرزهای استاتیکی و دینامیکی پایداری ولتاژ سیستم قدرت تأثیر می‌گذارد. اهمیت این موضوع چنان است که رخداد آن ممکن است سبب بروز فروپاشی آنی ولتاژ در سیستم شود [۱۱ و ۱۲].

حداکثر بارپذیری سیستم قدرت، یکی از مرزهای استاتیکی پایداری ولتاژ سیستم قدرت است که تحت تأثیر محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها می‌باشد و با استفاده از ژاکوبین پخش بار به دست می‌آید. در رابطه (۳)، ژاکوبین پخش بار درحالی که هیچکدام از ژنراتورها به حد راکتیو خود نرسیده‌اند بیان شده است. همچنین، رابطه (۴) ژاکوبین پخش بار را درحالی که، تعداد n_{PV} ژنراتور به حد راکتیو خود رسیده‌اند بیان می‌کند. نتایج حاصل از بررسی این دو ژاکوبین نشان می‌دهد که حداکثر بارپذیری سیستم قدرت که براساس رابطه (۳) به دست می‌آید، بیشتر از مقداری است که با استفاده از رابطه (۴) به دست آمده است [۶]. با این حال، در مطالعات سیستم قدرت، علاوه بر ژاکوبین پخش بار که در ارزیابی حداکثر بارپذیری استفاده می‌شود، به منظور دستیابی دقیق و صحیح به مرزهای دینامیکی پایداری ولتاژ مانند SNB، HB، LIB، SIB، از ژاکوبین جبری دینامیکی استفاده می‌شود.

براساس مرز HB و نیز افزایش ظرفیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم با در نظر گرفتن مفهوم LIB مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت. نتایج ارائه شده در این مقاله، به صورت نقطه به نقطه بررسی شده و ویژگی‌های مختلف سیستم از قبیل رفتار مقادیر ویژه، ضرایب مشارکت و ذخیره توان راکتیو شبکه‌های تست مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

۲- محدودیت توان راکتیو و نقاط دوشاخگی

علیرغم این که امروزه استفاده از تحلیل‌های استاتیکی در مطالعات پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت کاربرد گسترده‌ای دارد، با این حال در این گونه تحلیل‌ها، به دلیل صرف نظر کردن از رفتار دینامیکی ژنراتورها، سیستم‌های تحریک و یا پایدارساز سیستم قدرت، مرزهای دینامیکی پایداری ولتاژ مانند HB و LIB به درستی قابل مطالعه و بررسی نمی‌باشند. به همین دلیل، استفاده از تحلیل‌های دینامیکی مانند شبیه‌سازی حوزه زمان و نیز ابزارهایی مانند تئوری دوشاخگی و تحلیل مدال، کاربردی گسترده در بررسی پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت به‌ویژه پایداری ولتاژ سیگنال کوچک پیدا کرده است [۲، ۸-۱۰].

در یک سیستم قدرت، به طور مرسوم ژنراتورها به صورت PV مدل می‌شوند. در این حالت، با افزایش بار سیستم، توان راکتیو تولیدی ژنراتورها (Q_G) افزایش یافته و ولتاژ ترمینال آن‌ها (V_G) در مقدار برنامه‌ریزی شده (V_{Set}) ثابت می‌ماند. روند افزایش توان راکتیو تولیدی ژنراتورها تا لحظه رسیدن آن‌ها به حد راکتیو خود (Q_{GLimit}) ادامه پیدا می‌کند. این محدودیت در میزان توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم قدرت، علاوه بر محدودیت‌های حفاظتی، ناشی از محدودیت‌های سیم‌پیچ‌های استاتور و تحریک ژنراتورها می‌باشند [۱۹]. روابط (۱) و (۲)

$$Q_G - Q_{GLimit} \leq 0 \rightarrow V_G - V_{set} = 0 \Rightarrow J = J^{old} = \begin{bmatrix} (N_{PQ} + N_{PV}) \times (N_{PQ} + N_{PV}) & (N_{PQ} + N_{PV}) \times (N_{PQ}) \\ (N_{PQ}) \times (N_{PQ} + N_{PV}) & (N_{PQ}) \times (N_{PQ}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} J_{PQ}^{old} & J_{PV}^{old} \\ J_{Q\theta}^{old} & J_{QV}^{old} \end{bmatrix}$$

$$Q_G - Q_{GLimit} = 0 \rightarrow V_G - V_{set} < 0 \Rightarrow J^{new} = \begin{bmatrix} (N_{PQ} + N_{PV}) \times (N_{PQ} + N_{PV}) & | & (N_{PQ} + N_{PV}) \times (N_{PQ} + n_{PV}) \\ \hline (N_{PQ} + n_{PV}) \times (N_{PQ} + N_{PV}) & | & (N_{PQ} + n_{PV}) \times (N_{PQ} + n_{PV}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} J_{PQ}^{New} & J_{PV}^{New} \\ J_{Q\theta}^{New} & J_{QV}^{New} \end{bmatrix}$$

تنظیم ولتاژ به حد راکتیو خود می‌رسند. باتوجه به تعاریف بیان شده، از میان مرزهای دوشاخگی سیستم قدرت، تنها مرز LIB ناشی از محدودیت توان راکتیو تولیدی در سیستم قدرت می‌باشد. با این حال، همانند حداکثر بارپذیری سیستم قدرت، رسیدن ژنراتورها به حد راکتیو خود، حد پایداری ولتاژ را کاهش داده و رفتار مقادیر ویژه، ضرایب مشارکت متغیرهای حالت سیستم و در نتیجه مرزهای SNB و HB را تغییر می‌دهد. بدین‌منظور، رفتار بحرانی‌ترین مقدار ویژه مختلط ماتریس A را در یک سیستم قدرت مشخص و به ازای تغییراتی یکسان در دو حالت: - با صرف‌نظر از محدودیت‌های توان راکتیو ژنراتورها و - با در نظر گرفتن محدودیت‌های توان راکتیو ژنراتورها، در نظر می‌گیریم. شکل ۱، این رفتار را برای دو حالت مذکور نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل، تا زمانی که هیچ ژنراتوری به حد راکتیو خود نرسیده باشد، در نقاط کار مختلف (λ_i) مقدار ویژه بحرانی حالت ۱ (($\mu_{critical}$)₁) منطبق بر مقدار ویژه بحرانی حالت ۲ (($\mu_{critical}$)₂) است. در این حالت، در سیستم LIB رخ نداده و نقاط دوشاخگی SNB و HB، در صورت وقوع در هر دو سیستم، منطبق بر یکدیگر می‌باشند. با افزایش بار سیستم، در ازای λ_3 ژنراتور/ژنراتورهای سیستم حالت ۲ به حد راکتیو خود رسیده و در نتیجه دوشاخگی LIB رخ داده باتوجه به شکل ۱، زمانی که در ضریب بارگذاری (λ_3) یک ژنراتور به حد راکتیو خود می‌رسد، (($\mu_{critical}$)₂) از (($\mu_{critical}$)₁) جدا شده و با سرعت و جهش بیشتری به سمت محور موهومی حرکت می‌کند. بنابراین، HB در حالت دوم در بارگذاری کمتری (λ_5) نسبت به حالت اول (λ_6) رخ می‌دهد ($\lambda_5 < \lambda_6$). بنابراین، حد دینامیکی پایداری ولتاژ که فاصله میان بار پایه سیستم و بار منجر به HB است [۳]، در حالت ۲ کمتر از حالت ۱ خواهد شد.

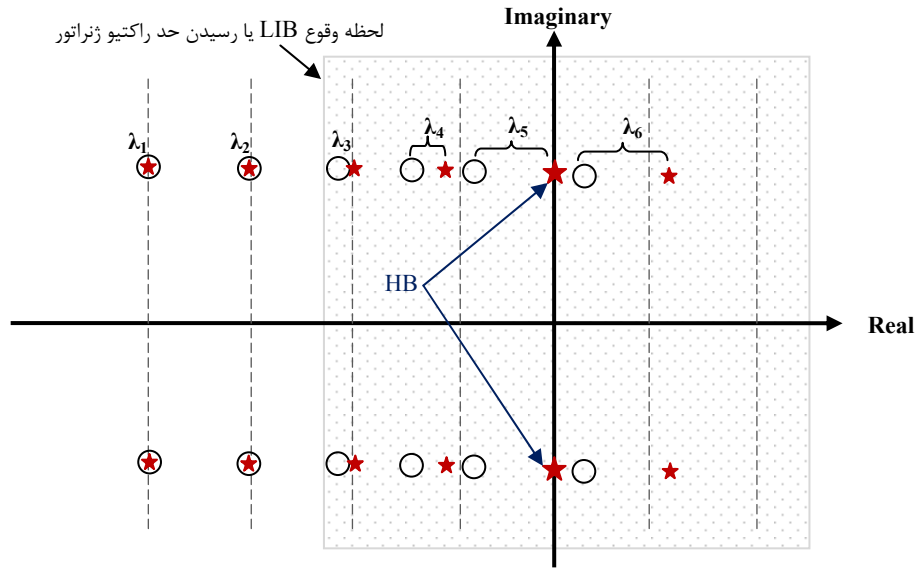
در روابط (۵) و (۶)، ژاکوبین جبری دینامیکی (J) و ژاکوبین جبری دینامیکی کاهش یافته (A) سیستم قدرت نشان داده شده است. ژاکوبین پخش بار جزئی از ژاکوبین جبری دینامیکی و به عبارت دقیق‌تر جزئی از زیر ژاکوبین J_{22} است. با رسیدن ژنراتورها به حد توان راکتیو، همان‌طور که در روابط (۳) و (۴) نشان داده شده است، ژاکوبین پخش بار سیستم دچار تغییر ناگهانی می‌شود. بنابراین، از آنجایی که ژاکوبین پخش بار بخشی از ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم است، این تغییر در ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم نیز محسوس بوده و از این‌رو می‌تواند وضعیت سیستم از نظر پایداری دینامیکی را نیز تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، برخلاف ژاکوبین پخش بار، عناصر تشکیل دهنده ژاکوبین جبری دینامیکی علاوه بر متغیرهای جبری سیستم مانند ولتاژ، متغیرهای حالت را نیز شامل می‌شود.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Delta \dot{x} = (J_{11} - J_{12} J_{22}^{-1} J_{21}) \Delta x = A \Delta x \quad (6)$$

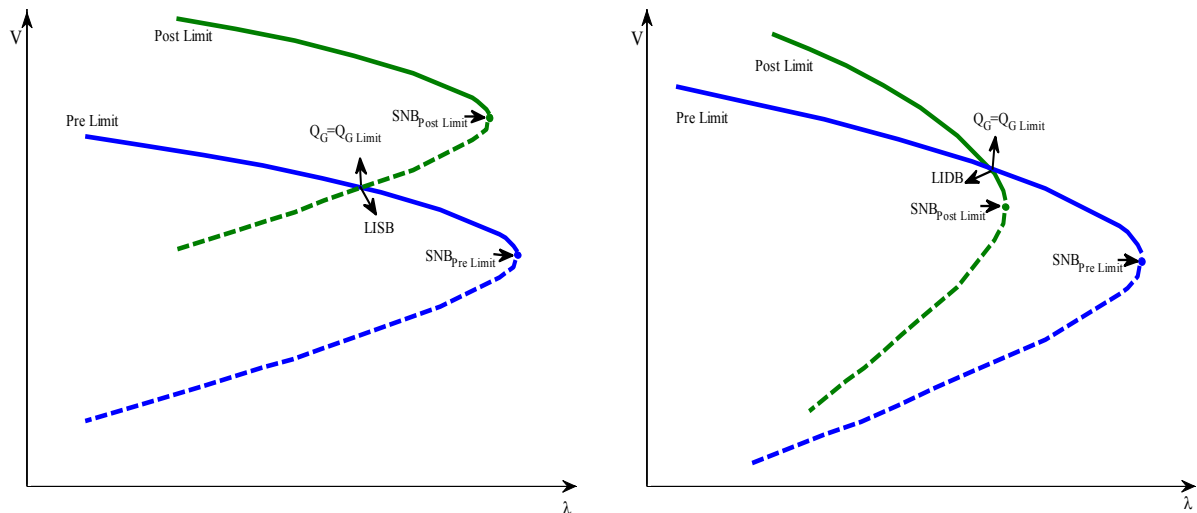
در رابطه (۵)، x متغیرهای حالت سیستم مانند زاویه رتور و سرعت ژنراتورها و y نیز متغیرهای جبری می‌باشند [۲، ۳ و ۸].

از حیث دینامیکی، پایداری ولتاژ یک سیستم قدرت، زمانی برقرار است که تمامی مقادیر ویژه ژاکوبین A در سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط واقع شده باشد [۲، ۸ و ۹]. براساس این ژاکوبین، دوشاخگی HB متناظر با حالتی است که یک جفت مقدار ویژه بحرانی ژاکوبین A بر روی محور موهومی صفحه اعداد مختلط واقع می‌شود. در این حالت، نسبت میرایی چنین مدی صفر شده و در نتیجه سیستم دچار رفتار نوسانی با دامنه ثابت و یا با دامنه افزایشی می‌شود. دوشاخگی LIB، متناظر با حالتی است که ژنراتور/ژنراتورها و یا دیگر ادوات



○: بحرانی‌ترین مقدار ویژه ژاکوبین A برای حالت ۱ (با صرف نظر از محدودیت راکتیو ژنراتورها)
 ★: بحرانی‌ترین مقدار ویژه ژاکوبین A برای حالت ۲ (با در نظر گرفتن محدودیت راکتیو ژنراتورها)

شکل ۱- رفتار مقدار ویژه بحرانی سیستم تحت تأثیر محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها



شکل ۲- رفتار منحنی P-V تحت تأثیر دوشاخگی‌های LIDB (شکل راست) و LISB (شکل چپ)

ناشی از این دو نوع دوشاخگی نشان داده شده است. باتوجه به شکل ۲، LIDB متناظر با حالتی است که پس از وقوع آن، سیستم همچنان دارای نقطه تعادل است. در این حالت، امکان افزایش بار سیستم تا مرز فروپاشی ولتاژ، وجود خواهد داشت. این در حالی است که با وقوع LISB سیستم دچار فروپاشی ولتاژ شده و پس از آن نقطه‌ی تعادلی در سیستم وجود ندارد [۱۱ و ۱۲].

علیرغم این، جهش ناگهانی مقدار ویژه بحرانی ممکن است همچنان در ناحیه پایدار (سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط) باشد و یا به‌طور ناگهانی ناپایدار شده و در نتیجه آن یک مقدار ویژه بر روی مبدأ مختصات قرار گیرد. این رفتار مقادیر ویژه بحرانی، به‌ترتیب سبب ایجاد دو نوع دوشاخگی تحت عناوین $LIDB^1$ و $LISB^2$ در سیستم قدرت می‌شود [۱۱]. در شکل ۲، منحنی P-V

¹ Limit Induced Dynamic Bifurcation

² Limit Induced Static Bifurcation

۳- روندنمای پیشنهادی به منظور بررسی اثرات متقابل مرزهای HB، LIB و تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتورها

در شکل ۳، روندنمای پیشنهادی به منظور بررسی رفتار توان راکتیو تولیدی ژنراتورها و حد دینامیکی پایداری ولتاژ (مبتنی بر مرز HB) تحت تأثیر تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتورهای بحرانی نشان داده شده است. براساس این شکل، مراحل ذیل به منظور هدف تعیین شده، صورت خواهد گرفت:

گام اول: تعیین سناریوی تغییر بار؛

گام دوم: انجام شبیه‌سازی حوزه زمان؛ در اینجا شبیه‌سازی صورت گرفته از نوع کوتاه مدت می‌باشد.

گام سوم: استفاده از تحلیل مدال، به منظور تعیین رفتار مقادیر ویژه و ضرایب مشارکت متغیرهای حالت به دست آمده از ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت؛

گام چهارم: تعیین رفتار توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم قدرت؛

گام ششم: باتوجه به این‌که تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتور به عنوان یک راه‌کار کنترل توان راکتیو در سیستم قدرت مطرح است، ولتاژ ترمینال ژنراتوری که به حد راکتیو خود رسیده باشد و یا ژنراتوری که به حد راکتیو خود نزدیک‌تر است، تغییر خواهد یافت.

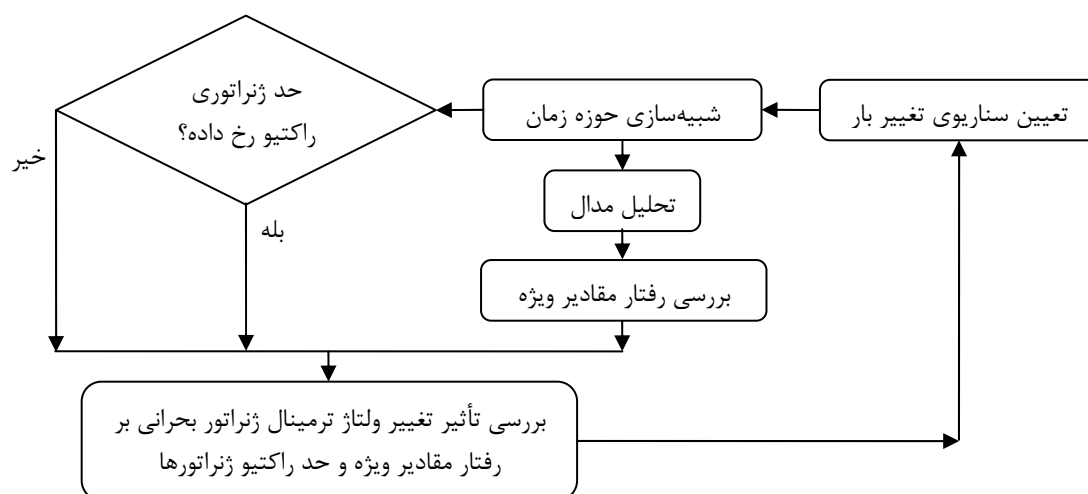
در نهایت گام‌های ۱ تا ۶ به منظور بررسی تأثیر تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتورهای بحرانی بر رفتار توان راکتیو تولیدی ژنراتورها، حد دینامیکی پایداری ولتاژ مجدداً تکرار خواهد شد.

۴- نتایج عددی

در این بخش، نتایج عددی تأثیر یکی از روش‌های کنترل توان راکتیو و حد پایداری ولتاژ تحت عنوان "کنترل ولتاژ ترمینال ژنراتورهای بحرانی" بر مرزهای HB و LIB مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج عددی این بخش، در دو حالت مجزا بیان شده و در نهایت مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. مطالعات این بخش، بر روی سیستم‌های تست ۳۹ باسه و ۶۸ باسه IEEE و با استفاده از ترکیب شبیه‌سازی حوزه زمان و تحلیل مدال در محیط نرم‌افزار DIgSILENT [۲۰] صورت گرفته است. اطلاعات سیستم‌های تست مذکور از مرجع [۲۱] قابل برداشت است.

۳-۱- حد راکتیو ژنراتور زودتر از حد دینامیکی پایداری ولتاژ رخ دهد.

در این بخش، فرض بر این است که حد راکتیو ژنراتور/ژنراتورها، زودتر از حد دینامیکی پایداری ولتاژ براساس مرز HB رخ دهد.



شکل ۳- روند نما بررسی تأثیر تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتور بحرانی بر مرزهای دینامیکی پایداری ولتاژ و توان راکتیو تولیدی ژنراتورها

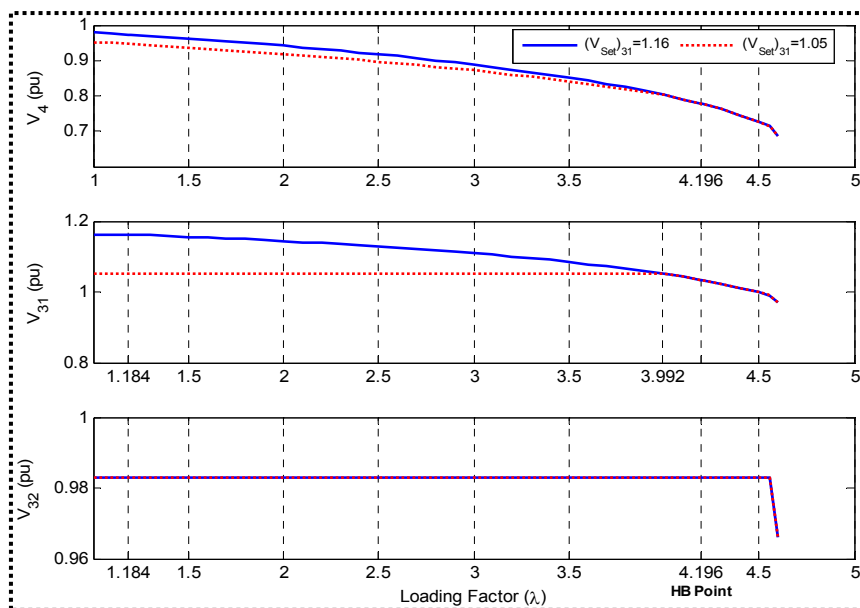
شکل ۴، مقایسه‌ای میان تغییرات ولتاژ باس ۴ و نیز ولتاژ ترمینال ژنراتورهای ۳۱ و ۳۲ را نسبت به تغییر ضریب بارگذاری (λ) بار باس ۴ به ازای $(V_{set})_{31}=1/0.5$ و $(V_{set})_{31}=1/1.6$ نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل، ملاحظه می‌شود که در ازای $(V_{set})_{31}=1/0.5$ ، حد راکتیو ژنراتور ۳۱ در سطح بار $\lambda=3/992$ و قبل از حد دینامیکی پایداری ولتاژ ($\lambda=4/196$) که متناظر با عبور یک زوج مد مختلط بحرانی سیستم از محور موهومی است، رخ می‌دهد. از سویی دیگر، حد راکتیو ژنراتور ۳۲ در $\lambda=4/196$ که بیشتر از دو مقدار قبلی است، رخ می‌دهد. همچنین در شکل ۴، به ازای $(V_{set})_{31}=1/0.5$ و $(V_{set})_{31}=1/1.6$ ، تغییرات ولتاژ باس ۴ و نیز ولتاژ ترمینال ژنراتورهای ۳۱ و ۳۲ نسبت به تغییر ضریب بارگذاری بار باس ۴ نشان داده شده است. براساس این شکل و نتایج بیان شده در جدول ۱، ژنراتور ۳۱ در حالت اول به ازای ضریب بارگذاری $3/992$ و در حالت دوم به ازای ضریب بارگذاری $1/184$ به حد راکتیو خود می‌رسد.

بر این اساس، تأثیر تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتورهای مذکور که از آن‌ها به‌عنوان ژنراتور بحرانی یاد می‌شود، بر وضعیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها و حد دینامیکی پایداری ولتاژ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در جدول ۱، تأثیر تغییر ولتاژ تنظیم ژنراتور بحرانی سیستم‌های تست ۳۹ و ۶۸ باسه IEEE بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ و نیز حد راکتیو ژنراتورهای بحرانی، نشان داده شده است. براساس نتایج بیان شده در جدول ۱، ملاحظه می‌شود که اگر حد راکتیو ژنراتور بحرانی سیستم زودتر از حد دینامیکی پایداری ولتاژ رخ دهد، در این صورت با فرض ثابت بودن ولتاژ ترمینال ژنراتورهای دیگر، تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتور بحرانی تأثیری بر افزایش و یا کاهش حد دینامیکی پایداری ولتاژ براساس مرز HB و نیز فروپاشی ولتاژ براساس مرز SNB ندارد. از سویی دیگر، افزایش/کاهش ولتاژ ترمینال ژنراتور بحرانی تنها سبب کاهش/افزایش سطح باری می‌شود که ژنراتور بحرانی به حد راکتیو خود می‌رسد.

جدول ۱- تأثیر ولتاژ ترمینال ژنراتورهای بحرانی بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ و ظرفیت توان راکتیو ژنراتورها- حالت اول

IEEE68-Case 1							
فروپاشی ولتاژ (SNB)	وضعیت توان راکتیو ژنراتورهای بحرانی		وضعیت دینامیکی پایداری ولتاژ		V_{set65}	V_{set53}	بار تغییر یافته
	ضریب بار رخداد حد توان راکتیو برای G_{65}	ضریب بار رخداد حد توان راکتیو برای G_{53}	بارگذاری قبل از HB	بارگذاری قبل از HB			
2.157	1.890	1.261	2.030	2.029	1.0110	1.045	۹
2.157	1.890	1.000	2.030	2.029	1.0110	1.060	
1.688	1.479	1.315	1.497	1.496	1.0110	1.039	۱ و ۲
1.688	1.479	1.066	1.497	1.496	1.0110	1.045	
1.688	1.479	1.000	1.497	1.496	1.0110	1.060	
IEEE39-Case 1							
فروپاشی ولتاژ (SNB)	وضعیت توان راکتیو ژنراتورهای بحرانی		وضعیت دینامیکی پایداری ولتاژ		V_{set32}	V_{set31}	بار تغییر یافته
	ضریب باری رخداد حد توان راکتیو G_{32}	ضریب باری رخداد حد توان راکتیو G_{31}	بارگذاری پس از HB	بارگذاری قبل از HB			
4.620	4.554	3.992	4.196	4.195	0.9831	1.050	۴
4.620	4.554	2.685	4.196	4.195	0.9831	1.120	
4.620	4.554	1.184	4.196	4.195	0.9831	1.160	
4.623	3.550	4.609	4.089	4.088	1.0500	0.960	
4.623	2.204	4.609	4.089	4.088	1.1000	0.960	
4.623	1.319	4.609	4.089	4.088	1.1200	0.960	
4.686	3.670	2.581	3.312	3.311	0.9831	1.040	۷ و ۱۵
4.686	3.670	1.759	3.312	3.311	0.9831	1.100	
4.686	3.670	1.385	3.312	3.311	0.9831	1.130	



شکل ۴- تغییرات ولتاژ باس‌های ۴، ۳۱ و ۳۲ به ازای بارگذاری‌های مختلف بار باس ۴ و ولتاژهای مختلف ترمینال ژنراتور ۳۱

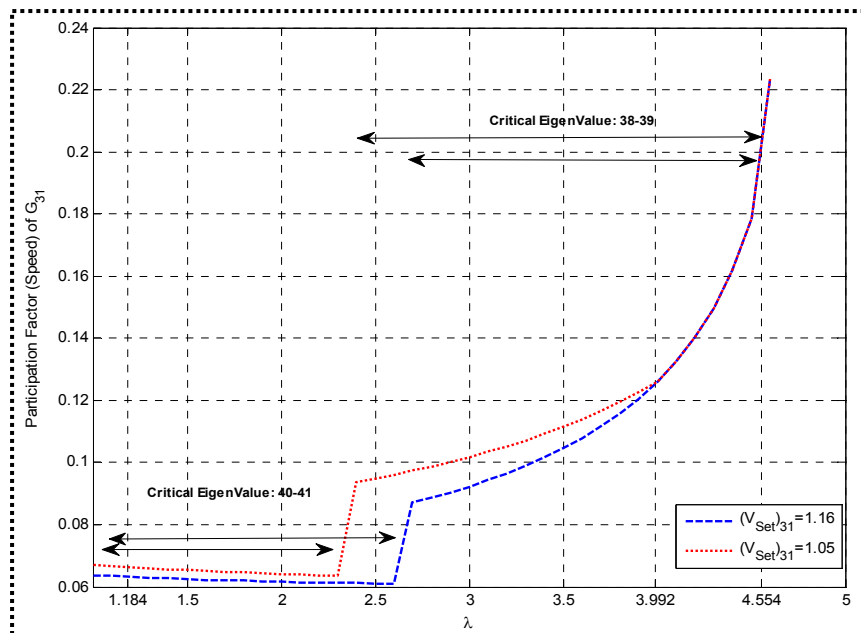
نکته قابل‌توجه دیگر در این شکل‌ها، تغییر مقدار ویژه بحرانی سیستم در خلال بارگذاری بار باس ۴ است. این موضوع بیان‌کننده این واقعیت است که مقدار ویژه بحرانی سیستم می‌تواند در خلال بارگذاری سیستم تغییر کرده و در نتیجه رفتاری غیرخطی داشته باشد.

۳-۲- حد دینامیکی پایداری ولتاژ زودتر از حد راکتیو ژنراتور رخ دهد.

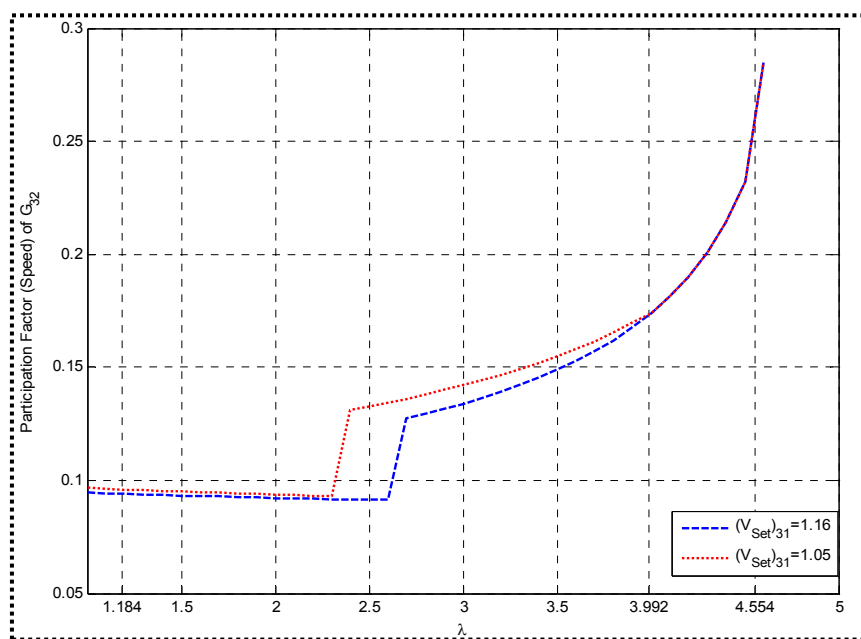
در این بخش، فرض بر این است که حد راکتیو ژنراتور/ژنراتورها، پس از حد دینامیکی پایداری ولتاژ براساس مرز HB رخ دهد. بر این اساس، تأثیر تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتورهای مذکور که در اینجا ژنراتور بحرانی نام‌گذاری می‌شود، بر تغییر وضعیت توان راکتیو ژنراتورها و حد دینامیکی پایداری ولتاژ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. براساس نتایج بیان شده در جدول ۲، اگر حد دینامیکی پایداری ولتاژ زودتر از حد راکتیو ژنراتور بحرانی سیستم رخ دهد، در این صورت با تغییر ولتاژ تنظیم آن ژنراتور، علاوه بر تغییر ظرفیت توان راکتیو قابل تولید توسط آن ژنراتور، حد دینامیکی پایداری ولتاژ نیز تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال، ژنراتوری که ولتاژ پایانه‌اش افزایش می‌یابد، در سطح بار کمتری به حد راکتیو خود خواهند رسید.

نکته قابل‌توجه در این است که پس از آن‌که در هر دو حالت (V_{set1} و V_{set2}) ژنراتور ۳۱ به حد راکتیو خود رسید، رفتار تمامی متغیرهای شبکه در هر دو حالت مشابه می‌شود. به عبارتی بهتر، در سطوح بارگذاری بین بارگذاری‌های متناظر با وقوع LIB در دو حالت بیان شده ($3/992 < \lambda < 1/184$)، رفتار متغیرهای سیستم در این دو حالت متفاوت خواهد بود، اما در سطوح بارگذاری بیشتر از بارگذاری متناظر با وقوع LIB در حالت V_{set1} ، ولتاژ باس ۴ و نیز ولتاژ ترمینال ژنراتور ۳۱ در هر دو حالت کاملاً بر یکدیگر منطبق خواهند بود.

همچنین در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب ضریب مشارکت متغیر حالت سرعت ژنراتور ۳۱ و ۳۲ در بحرانی‌ترین مقدار ویژه به ازای بارگذاری‌های مختلف در بار باس ۴ سیستم تست ۳۹ باسه IEEE و مقادیر مختلف V_{set} ژنراتور ۳۱ نشان داده شده است. باتوجه به شکل‌های ۵ و ۶، پس از آن‌که ژنراتور ۳۱ در هر دو حالت ($V_{set1}=1/05$) و ($V_{set2}=1/16$) به حد راکتیو خود می‌رسد، رفتار ضریب مشارکت متغیر حالت سرعت ژنراتور ۳۱ کاملاً مشابه و منطبق بر یکدیگر می‌شود. با این حال، قبل از آن‌که ژنراتور ۳۱ در هر دو حالت به حد راکتیو خود برسد، رفتار ضریب مشارکت ژنراتور ۳۱ در مد بحرانی متفاوت است.



شکل ۵- ضریب مشارکت متغیر حالت سرعت ژنراتور ۳۱ در مد بحرانی به ازای بارگذاری‌های مختلف بار باس ۴



شکل ۶- ضریب مشارکت متغیر حالت سرعت ژنراتور ۳۲ در مد بحرانی به ازای بارگذاری‌های مختلف بار باس ۴

سیستم، در شرایط مختلف تأثیر متفاوتی را در ظرفیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها و حدود پایداری ولتاژ براساس مرزهای HB و LIB دارد. در بخش بعد، تحلیل جامعی پیرامون نتایج بیان شده، صورت گرفته و در نتیجه آن یک الگوریتم ترکیبی به منظور بهبود همزمان حد دینامیکی پایداری ولتاژ (براساس مرز HB) و ظرفیت توان راکتیو شبکه پیشنهاد خواهد شد.

همچنین در این حالت، ژنراتورهای دیگر در سطح بار بیشتری به حد راکتیو خود می‌رسند. علاوه بر این، حد دینامیکی پایداری ولتاژ براساس مرز HB و نیز حد فروپاشی پایداری ولتاژ براساس مرز SNB بهبود پیدا می‌کند.

بنابراین، مقایسه نتایج بیان شده در جداول ۱ و ۲ نشان می‌دهد که تغییر ولتاژ ترمینال ژنراتورهای بحرانی

جدول ۲- تأثیر ولتاژ ترمینال ژنراتورهای بحرانی بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ و ظرفیت توان راکتیو ژنراتورها- حالت دوم

IEEE68-Case 2							
فروپاشی ولتاژ (SNB)	وضعیت توان راکتیو ژنراتورهای بحرانی		وضعیت دینامیکی پایداری ولتاژ		V _{set65}	V _{set53}	بار تغییر یافته
	ضریب بار رخداد حد توان راکتیو برای G ₆₅	ضریب بار رخداد حد توان راکتیو برای G ₅₃	بارگذاری پس از HB	بارگذاری قبل HB			
1.959	1.643	رخ نمی دهد	1.812	1.811	1.0110	1.032	۹
2.120	1.789	1.865	1.958	1.957	1.0110	1.039	
1.623	1.319	1.456	1.358	1.357	1.0110	1.025	
1.688	1.402	1.432	1.433	1.432	1.0110	1.032	۱ و ۲
IEEE39-Case 2							
فروپاشی ولتاژ (SNB)	وضعیت توان راکتیو ژنراتورهای بحرانی		وضعیت دینامیکی پایداری ولتاژ		V _{set32}	V _{set31}	بار تغییر یافته
	ضریب باری رخداد حد توان راکتیو G ₃₂	ضریب باری رخداد حد توان راکتیو G ₃₁	بارگذاری پس از HB	بارگذاری قبل HB			
4.620	4.432	4.609	4.000	3.900	0.9831	0.960	۴
4.620	4.554	4.580	4.035	4.030	0.9831	0.980	
4.620	4.540	4.500	4.095	4.090	0.9831	1.000	
4.623	4.623	4.550	3.814	3.813	0.9400	0.960	
4.623	4.587	4.623	3.889	3.888	0.9600	0.960	
4.623	4.275	4.609	4.03	4.029	1.0000	0.960	
4.610	3.612	3.772	3.219	3.218	0.9831	0.960	
4.658	3.670	3.333	3.3	3.299	0.9831	0.990	۱۵ و ۷

۵- تحلیل نتایج

- در این صورت افزایش ولتاژ پایانه آن ژنراتور، حد دینامیکی پایداری ولتاژ را افزایش داده اما حد راکتیو آن ژنراتور را کاهش می دهد.

$$\text{if } \lambda_{QLim} > \lambda_{DLM} \rightarrow V_{set} : \uparrow \Rightarrow DLM : \uparrow, \lambda_{QLim} : \downarrow$$

- در این حالت، رفتار تمامی متغیرهای سیستم مانند ضرایب مشارکت تمامی ژنراتورها، ولتاژ پایانه آن ژنراتور، مقادیر ویژه سیستم، توان راکتیو تولیدی ژنراتورها، به ازای V_{Set} های مختلف، متفاوت از یکدیگر است.

۳- براساس نتایج ارائه شده، بهترین راه حل به منظور بهبود همزمان ظرفیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها و نیز حد دینامیکی پایداری ولتاژ، استفاده از روش های ترکیبی مانند تنظیم همزمان پارامترهای سیستم های کنترلی و ولتاژ نقطه تنظیم ژنراتورها است. به عنوان نمونه، کاهش بهره سیستم تحریک، سبب افزایش حد دینامیکی پایداری ولتاژ براساس مرز HB می شود [۲]. بنابراین، با ترکیب روش های "تنظیم پارامترهای سیستم های کنترلی" و "تنظیم ولتاژ نقطه تنظیم ژنراتورها"، می توان علاوه بر بهبود حاشیه پایداری، ظرفیت توان راکتیو شبکه را نیز بهبود بخشید. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی به منظور کنترل همزمان توان راکتیو و حد دینامیکی پایداری ولتاژ

براساس نتایج عددی به دست آمده در بخش قبل؛

۱- اگر حد راکتیو ژنراتوری زودتر از حد دینامیکی پایداری ولتاژ سیستم رخ دهد ($\lambda_{QLim} < \lambda_{DLM}$):

- در این صورت افزایش ولتاژ پایانه آن ژنراتور، تأثیری بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ ندارد اما حد راکتیو آن ژنراتور در سطح بار کمتری رخ می دهد.

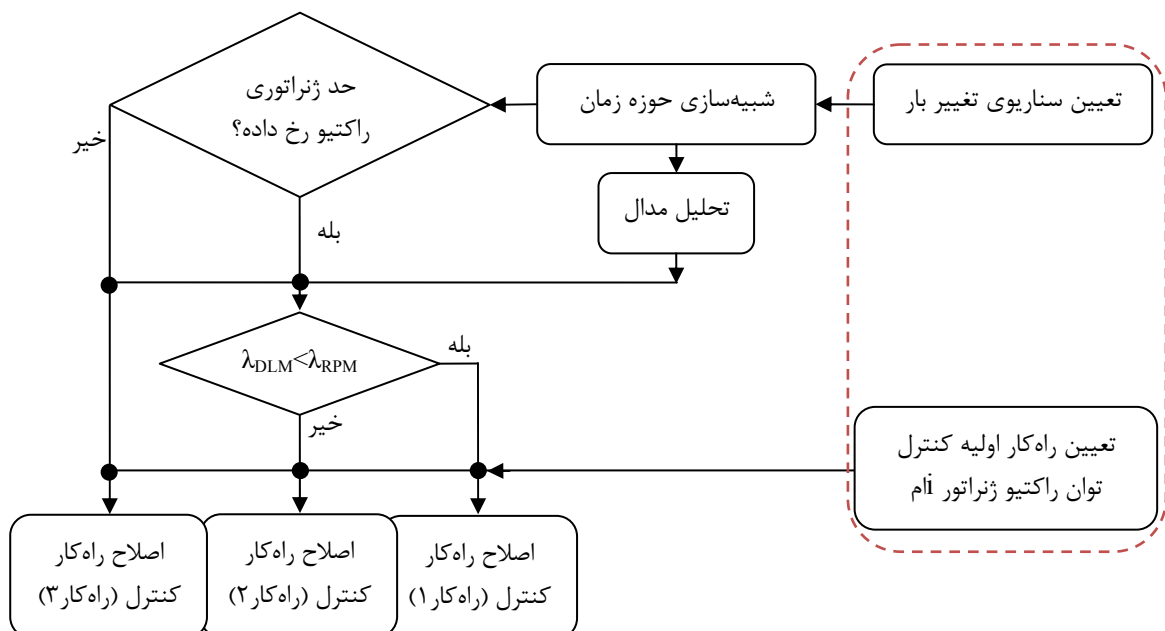
$$\text{if } \lambda_{QLim} < \lambda_{DLM} \rightarrow V_{set} : \uparrow \Rightarrow DLM : Cons., \lambda_{QLim} : \downarrow$$

- با فرض اینکه ژنراتوری به ازای V_{set1} در λ_1 و به ازای V_{set2} در λ_2 به حد راکتیو خود برسد (به نحوی که $V_{set2} > V_{set1}$ و $\lambda_2 < \lambda_1$) در این صورت رفتار تمامی متغیرهای سیستم مانند ضرایب مشارکت تمامی ژنراتورها، ولتاژ پایانه آن ژنراتور، مقادیر ویژه سیستم، توان راکتیو تولیدی ژنراتورها، از سطح بار λ_1 به بعد، کاملاً مشابه با یکدیگر (منطبق بر یکدیگر) می شود.

۲- اگر حد دینامیکی پایداری ولتاژ زودتر از حد راکتیو ژنراتوری رخ دهد ($\lambda_{QLim} < \lambda_{DLM}$):

راکتیو ژنراتورهای سیستم رخ دهد، در این صورت می‌توان به تنهایی و با استفاده از روش تغییر V_{set} ژنراتورهای بحرانی، ظرفیت توان راکتیو شبکه و حد دینامیکی پایداری ولتاژ را کنترل کرد. با این حال، اگر بخواهیم به بهترین پاسخ دست یابیم، استفاده از روش ترکیبی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود (راه‌کار ۳). همچنین، روش‌های دیگر مانند توزیع مجدد توان راکتیو خروجی و یا توان اکتیو خروجی ژنراتورها و یا تعیین مکان مناسب تجهیزات تولید توان راکتیو با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی [۱۶-۱۸]، به‌عنوان راه‌کارهای دیگری است که می‌تواند به‌منظور مدیریت همزمان ظرفیت توان راکتیو و نیز وضعیت پایداری ولتاژ سیستم قدرت مورد استفاده قرار بگیرد. با این حال، استفاده از هر کدام از روش‌های مورد بحث، مستلزم شناسایی رفتار دقیق سیستم (مانند رفتار مقادیر ویژه، ضرایب مشارکت متغیرهای حالت، محدودیت‌های توان راکتیو) تحت تأثیر تغییرات اعمال شده می‌باشد.

مطابق با شکل ۷، پیشنهاد می‌گردد. در حقیقت براساس الگوریتم پیشنهادی، انتخاب بهترین راه‌کار کنترل توان راکتیو درحالی‌که حد دینامیکی پایداری ولتاژ نیز در آن لحاظ شده باشد، باید با استفاده از ترکیبی از تحلیل شبیه‌سازی حوزه زمان، تحلیل مدال و در نهایت تحلیل رفتار توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم صورت گیرد. به‌عنوان مثال، اگر ژنراتوری به حد راکتیو خود نرسیده باشد، در این صورت به‌منظور بهبود حد پایداری ولتاژ براساس مرز HB، می‌توان از روش تنظیم پارامترهای سیستم تحریک و یا پایدارساز سیستم قدرت استفاده کرد (راه‌کار ۱) [۲ و ۲۲]. اما چنانچه حد راکتیو ژنراتوری سریع‌تر از حد دینامیکی پایداری ولتاژ براساس مرز HB رخ دهد، در این صورت به‌منظور بهبود همزمان حد دینامیکی پایداری ولتاژ و ظرفیت توان راکتیو شبکه، علاوه بر تغییر V_{set} ژنراتورهای بحرانی، باید از روش تنظیم پارامترهای سیستم تحریک و یا پایدارساز سیستم قدرت نیز به‌طور همزمان استفاده کرد (راه‌کار ۲). در نقطه مقابل، چنانچه حد دینامیکی پایداری ولتاژ سریع‌تر از حد



شکل ۷- الگوریتم پیشنهادی به‌منظور بررسی اثرات متقابل مرزهای دینامیکی پایداری ولتاژ و حد توان راکتیو جهت تعیین راه‌کار بهینه جهت کنترل توان راکتیو و بهبود پایداری ولتاژ

۶- نتیجه‌گیری

حد راکتیو ژنراتور بحرانی بر روی حد راکتیو ژنراتورهای دیگر و نیز حد دینامیکی پایداری ولتاژ موثر باشد. بنابراین، در این مقاله نشان داده شد که استفاده از راه‌کار تنظیم ولتاژ ژنراتورهای بحرانی، نمی‌تواند به تنهایی حد راکتیو و حد دینامیکی پایداری ولتاژ را بهبود بخشد. در نهایت، براساس این رفتارها، یک الگوریتم ترکیبی به‌منظور بهبود همزمان حد راکتیو ژنراتورهای بحرانی و حد دینامیکی پایداری ولتاژ ارائه گردید.

در این مقاله، یکی از روش‌های کنترل توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای بحرانی تحت عنوان "کنترل ولتاژ ترمینال ژنراتورها" مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به‌دست آمده، برحسب این‌که حد راکتیو یک ژنراتور نسبت به حد دینامیکی پایداری ولتاژ در چه لحظه‌ای رخ دهد، استفاده از این روش می‌تواند نتایج متفاوتی را داشته باشد. به‌عبارتی بهتر، استفاده از این روش می‌تواند تنها بر روی حد راکتیو ژنراتور بحرانی موثر باشد و یا این‌که علاوه‌بر

مراجع

- [1] Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Anderson, G., Bose, A., Canizares, C. (2004). "Definition and classification of power system stability". IEEE Trans. Power Syst, Vol. 19, No. 3, pp. 1387-1401.
- [2] Amjady, N., Ansari, M.R. (2008). "Small disturbance voltage stability assessment of power systems by modal analysis and dynamic simulation". Int. J. of Energy Conversion and Management (ECM), Vol. 49, No. 10, pp. 2629-2641.
- [3] Mithulananthan, N., Canizares, C. (2004). "Effect of Static load models on hopf bifurcation point and critical modes of power systems". Thammasat Int. J. SC. Tech. Vol. 9, No. 4, pp. 69-76.
- [4] Pai, M.A., Sauer, P.W., Bernard, C. (1995). "Static and dynamic nonlinear loads and structural stability in power systems". Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 11, pp. 1562-1571.
- [5] Morison, K., Hamadani, H., Wang, L. (2006). "Load modeling for voltage stability studies". Proceedings of the IEEE power systems conference and exposition (PSCE), pp. 564-568.
- [6] Amjady, N., Velayati, M.H. (2009). "Evaluation of the maximum loadability point of power systems considering the effect of static load models". Int. J. of Energy Conversion and Management (ECM), Vol. 50, No. 12, pp. 3202-3210.
- [7] Zhang, Y.P., Huang, W., Liu, Z.Q., Yang, J.Y., Cai, X.L., Zhang, J.H. (2005). "Research on the relationship of the singular point for load flow jacobian matrix and the critical point of voltage collapse". Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3, pp. 2939-2943.
- [8] Huang, G.M., Zhao, L., Song, X. (2002). "A new bifurcation analysis for power system dynamic voltage stability studies". Proceedings of the IEEE power eng. soc winter meeting, Vol. 2, pp. 882-887.
- [9] Amjady, N., Velayati, M.H. (2011). "Dynamic voltage stability prediction of power systems by a new feature selection technique and probabilistic neural network". Euro. Trans. Electr. Power (ETEP), Vol. 21, No. 1, pp. 312-328.
- [10] Hongjie, J., Xiaodan, Yu., Yixin, Yu. (2005). "An improved voltage stability index and its application". Electrical Power and Energy System (EPES), Vol. 27, pp. 567-574.
- [11] Avalos, R.J., Canizares, C., Milano, F., Conejo, A.J. (2009). "Equivalency of continuation and optimization methods to determine saddle-node and limit-induced bifurcations in power systems". IEEE Trans. Circuits and Systems-I: Regular Paper., Vol. 56, No. 1, pp. 210-223.
- [12] Li, S.H., Chiang, H.D. (2009). "Impact of generator reactive reserve on structure-induced bifurcation". IEEE, pp. 1-5.

- [13] Echavarren, F.M., Lobato, E., Rouco, L. (2009). "Steady-state analysis of the effect of reactive generation limits in voltage stability". *Electric Power Systems Research (EPSR)*, Vol. 79, No. 9, pp.1292-1299.
- [14] Lerm, A.P. (2002). "Control of Hopf bifurcation in multi area power systems via a secondary voltage regulation scheme". *Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE*, Vol. 3, pp. 1615-1620.
- [15] Lerm, A.P. (2001). "Control of Hopf bifurcation in power systems via a generation redispatch". *Proceedings of the PPT2001 IEEE Porto Power Tech Conference 10th -13th September, Porto, Portugal*.
- [16] Yang, C.F., Lai, G.G., Lee, C.H., Su, C.T., Chang, G.W. (2012). "Optimal setting of reactive compensation devices with an improved voltage stability index for voltage stability enhancement". *Electrical Power and Energy Systems (EPES)*, Vol. 37, No. 1, pp. 50-57.
- [17] Zecevic, A.I., Miljkovic, D.M. (2002). "The effects of generation redispatch on hopf bifurcations in electric power systems". *IEEE Trans. Circuits and Systems-I*, Vol. 49, No. 8, pp. 1180-1186.
- [18] Raoufi, H., Kalantar, M. (2009). "Reactive power rescheduling with generator ranking for voltage stability improvement". *Energy Conversion and Management (ECM)*, Vol. 50, No. 4, pp. 1129-1135.
- [19] Kargarian, A., Raoofat, M., Mohammadi, M. (2011). "Reactive power market management considering voltage control area reserve and system security". *Applied Energy*, Vol. 88, No. 11, pp. 3832-3840.
- [20] DIgSILENT User Manual Toolbox, Available: [http:// www.digsilent.de/](http://www.digsilent.de/).
- [21] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [22] Amjady, N., Velayati, M.H. (2011). "Evaluation of Hopf bifurcation considering the effect of load models and excitation system parameters". *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol. 6, No. 5, pp. 2419-2427.