بررسی تأثیر مدل‌های بار، پارامترهای سیستم تحریک و محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم قدرت در حد دینامیکی پایداری ولتاژ با استفاده از یک آنالیز ترکیبی

نیما امجدی[۱]، محمد حسین ولایتی[۲،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸۸
پذیرش مقاله: بهمن ۱۳۸۸

واژگان کلیدی:
پایداری ولتاژ
تئوری دوشاخگی
ژاکوبین جبری دینامیکی
ژاکوبین پخش‌بار
مقدار ویژه

چکیده

امروزه پایداری ولتاژ به عنوان یکی از مهترین انواع پایداری‌ها در سیستم قدرت شناخته می‌شود. در تحلیل پایداری ولتاژ مرزهای استاتیکی و دینامیکی متفاوتی مانند حداکثر بارپذیری سیستم (MLP) و نقاط دوشاخه‌ای SNB، HB و LIB تعریف می‌شوند. بدین‌منظور یکی از تئوری‌هایی که کاربرد وسیعی در بررسی پایداری ولتاژ و شناسایی مرزهای مرتبط با آن دارد، تئوری دوشاخگی (Bifurcation) است که بر اساس آنالیز مقدار ویژه، وضعیت پایداری و چگونگی ناپایدار شدن سیستم قدرت را بیان می‌کند. عوامل متعددی در پایداری ولتاژ سیستم قدرت و حد آن تأثیرگذار می‌باشند. از جمله این موارد مدل بارهای سیستم، پارامترهای سیستم‌های کنترلی مانند سیستم تحریک ژنراتورها و محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها می‌باشند که تأثیر بسزایی در حد استاتیکی و دینامیکی پایداری ولتاژ سیستم قدرت دارد. در این مقاله با استفاده از یک آنالیز ترکیبی شامل تئوری دوشاخگی، آنالیز مدال و شبیه‌سازی دینامیکی، تأثیر مدل‌های بار، ثابت زمانی و بهره سیستم تحریک و محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم قدرت بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ و مشخصاً مرز HB مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱- مقدمه

پایداری ولتاژ به عنوان یکی از انواع پایداری‌ها در سیستم قدرت عبارت است از توانائی سیستم قدرت جهت حفظ ولتاژهای ماندگار قابل قبول برای تمام شین‌ها بعد از وقوع یک اغتشاش نسبت به یک شرایط کار اولیه [۱].

در بررسی پایداری ولتاژ یک سیستم قدرت، مرزهای متفاوتی جهت ارزیابی این نوع پایداری تعریف شده است. برخی از این مرزها شامل مرزهایی مانند MLP[1] حداکثر بارپذیری با استفاده از ژاکوبین پخش‌بار قابل دستیابی است [۲-۵] و Saddle Node Bifurcation (SNB)، Hopf Bifurcation (HB) و Limit Induced Bifurcation (LIB) که با استفاده از ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت بدست می‌آیند، می‌باشند [۶-۱۱]. به این نقاط دوشاخگی، نقاط دو شاخگی محلی[2] نیز می‌گویند. بنابراین، امروزه بمنظور تحلیل پایداری ولتاژ و شناسایی مرزهای متناظر با آن، روش‌های متعددی شامل

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mvelayaty@gmail.com
۱. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپوتر، دانشگاه سمنان
۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپوتر، دانشگاه سمنان

[1] Maximum Loadability Point
[2] Local Bifurcation

Archive of SID
www.SID.ir

آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در تحلیل استاتیکی پایداری ولتاژ که نهایتاً منجر به شناسایی مرز حداکثر بارپذیری سیستم قدرت می‌شود، شاخص‌های متعددی از قبیل مقادیر ویژه ژاکوبین پخش‌بار [۱۲]، دترمینال ژاکوبین پخش‌بار [۱۲]، روش یکتایی تفکیک شده [۲، ۳] و ...، ارائه شده است. در حقیقت، کارایی آنالیز استاتیکی پایداری ولتاژ در دستیابی به نقطه حداکثر بارپذیری سیستم (MLP) است. حداکثر بارپذیری سیستم به لحاظ مفهوم ریاضی آن، متناظر با یکتایی[1] ژاکوبین پخش‌بار سیستم قدرت می‌باشد. در چنین حالتی، دترمینان ژاکوبین پخش‌بار صفر شده و یکی از مقادیر ویژه آن مقداری برابر با صفر را اختیار می‌کند [۲، ۳، ۱۲، ۱۳]. با این حال، از آنجاکه در این نوع از آنالیزها از دینامیک‌های سیستم قدرت صرف‌نظر می‌شود، در نتیجه برای بررسی دقیق پایداری ولتاژ یک سیستم قدرت آنالیزهای دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

زمانیکه هدف بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ است، در اینصورت اندازهٔ اغتشاشات اعمال شده به سیستم و مدت زمانیکه سیستم را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم اهمیت پیدا می‌کند. بنابراین، با توجه به نوع اغتشاشی که در سیستم قدرت رخ می‌دهد، پایداری ولتاژ به دو دسته اغتشاش بزرگ و اغتشاش کوچک تقسیم‌بندی می‌گردد [۱]. از سویی دیگر، ناپایداری ولتاژ یک فرآیند ترکیبی است و متناسب با مکانیزم رخ دادن ناپایداری، این فرآیند می‌تواند در بازه زمانی وسیعی رخ دهد. زمانیکه هدف مطالعه پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت است، در اینصورت دینامیک‌های تندگذر مانند موتورهای القایی و یا کانورترهای HVDC در نظر گرفته می‌شوند. در حالیکه در بررسی پایداری ولتاژ بلندمدت، دینامیک‌های کند، مانند تپ چنجرهای ترانس‌ها، بارهای کنترل شده ترموستاتیکی و یا پایدارسازهای سیستم قدرت (PSS) در نظر گرفته می‌شوند [۱، ۱۵]. دلایل متعددی از جمله؛ مدهای الکترومکانیکی ژنراتورها، مدهای تحریک، مدل‌های بار و نیز وقوع حالات اضطراری مانند خروج خطوط انتقال از مدار در تحریک انواع نقاط دوشاخه‌ای[2] در سیستم‌های قدرت تأثیرگذار می‌باشند [۱۰]. در این راستا، در مرجع [۷] تأثیر سناریوهای متفاوت بار، الگوهای مختلف تولید توان و حالات اضطراری مانند خروج خط انتقال از مدار و نیز ژنراتورها در پایداری ولتاژ سیگنال کوچک بررسی شده است. بعلاوه مرجع [۹] در خصوص وقوع SNB (که متناظر با فروپاشی ولتاژ است) تحت تأثیر انواع بارهای سیستم قدرت نتایج کاملی را بیان کرده است. مرجع [۱۱] به بررسی تأثیر PSS، SVC و TCSC در حد دینامیکی بارگذاری پرداخته است. حد دینامیکی بارگذاری (DLM[3]) به عنوان فاصله میان نقطه کار سیستم و بارگذاری منجر به وقوع HB در سیستم قدرت تعریف می‌گردد [۱۱]. همچنین مرجع [۱۶] به ارزیابی تأثیر مدل‌های سیستم تحریک (کند یا تندگذر) بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ پرداخته است. از طرف دیگر با توجه به تأثیر مهمی که بارهای سیستم در پایداری ولتاژ سیستم قدرت دارند، مقالات متعددی از جمله [۱۶، ۱۷] تأثیر مشخصات بارهای سیستم قدرت را در پایداری ولتاژ بررسی کرده و بر آن تأکید داشته‌اند. همچنین، با توجه به کاربرد شبکه‌های هوش مصنوعی[4]، امروزه استفاده از این شبکه‌ها در پایداری ولتاژ بویژه پیش‌بینی وضعیت پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت [۱۸-۲۲] و نیز انواع دیگر پایداری‌ها مانند پایداری گذرا [۲۳] کاربرد فراوانی پیدا کرده است. در نتیجه، با توجه به دقت بالاتر آنالیزهای دینامیکی در مقایسه با آنالیزهای استاتیکی و از آنجاکه استفاده همزمان از آنالیزهای شبیه‌سازی حوزه زمان (TDS[5]) و مدال جهت دستیابی دقیق و صحیح به مرزهای دینامیکی پایداری ولتاژ مانند SNB و HB ضروری است، بنابراین در این مقاله با استفاده از یک آنالیز

[1] Singularity

[2] Bifurcation
[3] Dynamic Loading Margin
[4] Neural Network
[5] Time Domain Simulation

Archive of SID
www.SID.ir

ترکیبی شامل شبیه‌سازی حوزه زمان و آنالیز مدال ناشی از تئوری دو شاخه شدن، وضعیت پایداری ولتاژ اغتشاش کوچک در بازه زمانی کوتاه‌مدت، تحت تأثیر مدل‌های بار و محدودیت‌های توان راکتیو تولیدی ژنراتورها بررسی شده و به عبارتی بهتر حد بارگذاری دینامیکی سیستم بر اساس مرز HB، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا در بخش دوم، مدل دینامیکی سیستم قدرت بیان شده و تئوری انواع نقاط دوشاخه‌ای بر اساس ژاکوبین جبری- دینامیکی سیستم قدرت بیان خواهد شد. در بخش سوم مقاله نیز نتایج عددی حاصل از بررسی تأثیر مدل‌های بار و نیز محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورها بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ بر اساس مرز HB بر روی سیستم تست ۳۹ باسه IEEE و ۱۴ باسه IEEE مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- مدل دینامیکی سیستم قدرت

آنالیزهای دینامیکی مانند شبیه‌سازی حوزه زمان (TDS) کاربردی گسترده در بررسی پایداری ولتاژ دارند. به عبارتی بهتر، اهمیت آنالیز TDS در پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت نمایان می‌شود و علت این موضوع در این است که با بکارگیری شبیه‌سازی حوزه زمان، دینامیک بارها و سیستم‌های کنترلی که تأثیر بسزایی در پایداری یا ناپایداری سیستم دارند در نظر گرفته می‌شود (در حالیکه در آنالیز حالت ماندگار این موضوع بخوبی لحاظ نمی‌گردد) [۱۷]. از طرفی، یکی از تئوری‌هایی که در بررسی پایداری ولتاژ کاربرد بسیار گسترده‌ای دارد، تئوری دوشاخگی است. تئوری دوشاخگی، ابزاری مناسب جهت طبقه‌بندی، مطالعه و دستیابی به اطلاعات کیفی و کمی پیرامون رفتار یک سیستم غیرخطی حول نقطهٔ تعادل است. بنابراین با بکارگیری همزمان آنالیزهای TDS و Bifurcation می‌توان رفتار دینامیکی یک سیستم قدرت را بخوبی و با دقت بالایی مورد ارزیابی قرار داد.

معادلهٔ جبری-دینامیکی یک سیستم قدرت را می‌توان بر اساس رابطهٔ (۱) نمایش داد:

$$\dot{x} = f(x, y, \lambda, p) \qquad (۱\text{- الف})$$

$$0 = g(x, y, \lambda, p) \qquad (۱\text{- ب})$$

در رابطهٔ فوق، x متغیرهای حالت و y متغیرهای جبری سیستم قدرت را بیان می‌کنند. بعلاوه (λ, P) بترتیب بیان‌کننده پارامترهای قابل کنترل مانند ولتاژ مرجع SVCها و نیز تپ و تنظیمات مربوط به AVRها و پارامترهای غیر قابل کنترل مانند توان‌های اکتیو و راکتیو بارهای سیستم می‌باشند [۱۰]. در حقیقت رابطهٔ (۱- الف)، بیان‌کننده دینامیک‌های مربوط به ژنراتور، سیستم تحریک، بارهای دینامیکی و دیگر ادوات کنترلی و رابطهٔ (۱- ب) بیانگر تعادل پخش توان می‌باشد [۶].

جهت انجام آنالیز دوشاخگی، آنالیز سیگنال کوچک و یا آنالیز پایداری در حالت ماندگار در یک سیستم قدرت، لازم است که معادلهٔ جبری دیفرانسیلی رابطه (۱) را حول نقطهٔ کار سیستم (x_0, y_0) و برای مقادیر مشخصی از پارامترهای سیستم (λ, P) خطی‌سازی نمود که در نتیجه آن ماتریس‌های ژاکوبین سیستم قابل دستیابی می‌باشند:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

با حذف Δy از رابطه (۲):

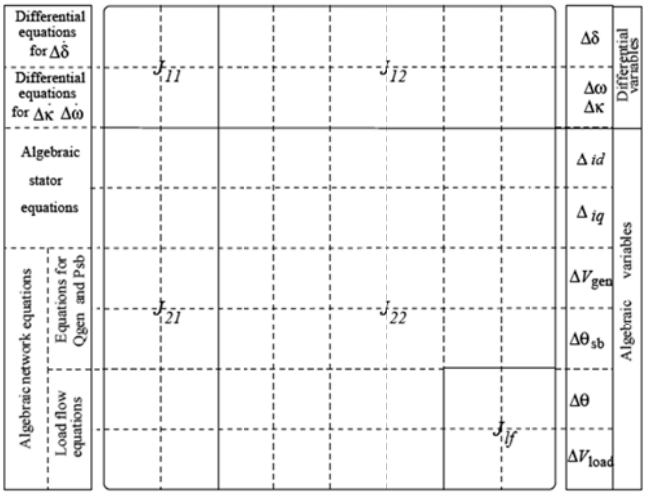
$$\Delta\dot{x} = (J_{11} - J_{12} J_{22}^{-1} J_{12}) \Delta x = A \Delta x \qquad (۳)$$

در روابط فوق، ماتریس‌های J و A به ترتیب ژاکوبین کاهش‌نیافته[1] سیستم و ژاکوبین کاهش‌یافته[2] سیستم می‌باشند [۶، ۲۴] و معمولاً جهت تحلیل دوشاخگی در سیستم قدرت، آنالیز مقدار ویژه با استفاده از ماتریس A و با تغییر پارامترهای (λ, P) صورت می‌گیرد [۶].

در شکل ۱، ساختار کلی ماتریس ژاکوبین سیستم قدرت (J) نشان داده شده است.

[1] Unreduced(Augmented) Jacobian Matrix
[2] Reduced Jacobian Matrix

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱- ساختار کلی ژاکوبین دینامیکی سیستم قدرت [۲۵]

بر اساس شکل ۱ و مقایسه آن با رابطه (۱) ملاحظه می‌شود که ماتریس‌های J_{11} و J_{12} از طریق رابطه (۱-الف) قابل دستیابی بوده و در حقیقت شامل متغیرهای حالت سیستم می‌باشد. همچنین J_{21} و J_{22} از رابطهٔ (۱-ب) بدست می‌آیند و داریم:

$$J_{11}=\frac{\partial f}{\partial x}, J_{12}=\frac{\partial f}{\partial y}, J_{21}=\frac{\partial g}{\partial x}, J_{22}=\frac{\partial g}{\partial y} \qquad (۴)$$

در شکل ۱، Q_{gen} بیان‌کننده توان راکتیو در باس‌های ژنراتوری است. همچنین، P_{sb} توان اکتیو باس Slack می‌باشد. δ و ω بترتیب بیان‌کننده زاویه رتور و سرعت ماشین‌های سیستم می‌باشند. متغیر K، متغیرهای حالت سیستم (مانند E', E'_d, E'_q, E''_d, E''_q و یا دامنه و زاویه ولتاژ باس‌های بار برای زمانیکه دینامیک بارها در نظر گرفته می‌شود) بجز δ و ω را شامل می‌شود. i_d و i_q جریان‌های محورهای d و q می‌باشند. V_{gen} و V_{load} بترتیب ولتاژ باس‌های ژنراتوری و بار را نشان می‌دهد. θ زاویه ولتاژ تمام باس‌ها بجز باس Slack می‌باشد (θ_b زاویه ولتاژ باس Slack است). Δ نیز افزایش کوچک در متغیرها است.

۲-۱- انواع نقاط دو شاخه‌ای در سیستم قدرت

در بکارگیری تئوری دوشاخگی فرض بر این است که تغییرات پارامترهای سیستم به آرامی صورت می‌گیرد و در نتیجه می‌توان فرض کرد که سیستم از یک نقطه تعادل به نقطه تعادل دیگری حرکت می‌کند [۲۵]. بنابراین با این فرض که پارامترهای سیستم قدرت به آرامی تغییر می‌کنند، بر اساس رابطه (۱)، انواع نقاط دو شاخه‌ای در سیستم قدرت بر اساس موارد زیر رخ می‌دهد [۷، ۹، ۱۱]:

- Saddle-Node Bifurcation (SNB)؛ در این نقطه یکی از مقادیر ویژه ماتریس J و یا A صفر شده و سیستم دچار فروپاشی ولتاژ می‌گردد [۶، ۸، ۲۶، ۲۷]. باید در نظر داشت که برای دستیابی به نقطه واقعی فروپاشی ولتاژ لازم است که با استفاده از تئوری دوشاخه شدن نقطه SNB تعیین گردد [۹، ۲۷]. به عبارت بهتر، یکی از منحنی‌هایی که کاربرد فراوان در ارزیابی پایداری ولتاژ حالت ماندگار دارد، منحنی P-V است که با استفاده از روش‌های استاتیکی که در این روش‌ها از دینامیک‌های سیستم قدرت صرف‌نظر می‌شود ترسیم می‌گردد. بعلاوه معمولاً نقطه پیشانی این منحنی به عنوان نقطه فروپاشی ولتاژ در نظر گرفته می‌شود. اما تحقیقات زیادی نشان داده است که نقطه فروپاشی ولتاژ در اصل از روی منحنی دو شاخه‌ای[1] که به کمک معادلات جبری-دینامیکی سیستم قدرت قابل دستیابی است بدست می‌آید و نه از روی منحنی P-V [۹، ۲۷]. بنابراین، نقطه فروپاشی ولتاژ که از

[1] . Bifurcation Curve

www.SID.ir
Archive of SID

روی منحنی دو شاخه‌ای بدست می‌آید، متناظر با SNB است [۹، ۲۷].

- Singularity induced bifurcation (SIB)؛ در چنین نقطه‌ای ماتریس J_{22} در رابطه (۲) یکتا[1] شده و بنابراین دیگر معکوس‌پذیر نخواهد بود. از آنجا که معکوس این ماتریس بی‌نهایت می‌شود، بنابراین به آن Singularity induced infinity می‌گویند [۶].

- Limit induced bifurcation (LIB): در چنین حالتی ژنراتورها به حد توان راکتیو خود رسیده‌اند و مقادیر ویژه سیستم دارای یک تغییر ناگهانی می‌باشند. بطور جامع‌تر، در چنین حالتی با افزایش بار سیستم، تقاضای توان راکتیو افزایش یافته و بنابراین حد توان راکتیو ژنراتورها و دیگر ادوات تنظیم ولتاژ فرا می‌رسد. این نوع از نقاط دو شاخه‌ای سبب کاهش حد دینامکی پایداری ولتاژ شده و در برخی از موارد باعث از دست رفتن نقطهٔ کار سیستم شده و در نتیجه، فروپاشی ولتاژ را به همراه خواهند داشت [۸، ۲۸].

- Hopf Bifurcation (HB)؛ یک ناپایداری نوسانی است که در این نقطه، یک مقدار ویژه مختلط از ماتریس ژاکوبین کاهش‌یافته سیستم از محور موهومی صفحه اعداد مختلط عبور می‌کند. عوامل متعددی سبب بروز چنین نوساناتی در سیستم قدرت می‌شوند، اما مهمترین عامل مؤثر در بروز HB، عدم میرایی مدهای بحرانی سیستم است. در یک سیستم قدرت نسبت میرایی مقادیر ویژه می‌تواند بصورت رابطه (۵) نمایش داده شود:

$$\zeta = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \qquad (۵)$$

در رابطه فوق α و β بترتیب بخش حقیقی و موهومی یک مقدار ویژه می‌باشند. بر طبق رابطه (۵)، زمانیکه HB رخ می‌دهد، نسبت میرایی مد بحرانی سیستم مقداری برابر با صفر را اختیار می‌کند [۱۱]. بدیهی است پایداری سیستم قدرت زمانی برقرار است که نسبت میرایی مد بحرانی مقداری مثبت اختیار کند. بنابراین در چنین حالتی، مقدار ویژه بحرانی سیستم در سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط قرار دارد. روش‌های متعددی جهت کنترل نوسانات سیستم قدرت ارائه شده‌اند، از جمله این روش‌ها بکارگیری پایدارساز سیستم قدرت (PSS) و نیز جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو مانند SVC و TCSC می‌باشد [۱۱].

۲-۲- مقایسه نظری ژاکوبین پخش‌بار و ژاکوبین دینامیکی سیستم

با توجه به آنچه که بخش‌های قبلی بیان شد، باید در نظر داشت که ژاکوبین سیستم ناشی از مدل دینامیکی سیستم قدرت متفاوت از ژاکوبینی است که از معادلات پخش‌بار بدست می‌آید. از دید ژاکوبین‌های دینامیکی، سیستم قدرت زمانی پایدار است که مقادیر ویژه ماتریس کاهش‌یافته سیستم (A) در سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط قرار داشته باشند و به ازای افزایش بار، مقادیر ویژه بحرانی به محور موهومی (در خصوص مرز HB) [۶، ۷] و یا به مبدأ (در خصوص مرز SNB) [۹، ۱۱] نزدیک می‌شوند. به اینگونه مرزها، مرزهای دو شاخه‌ای دینامیکی[2] نیز می‌گویند. این در حالی است که؛ یکی دیگر از مرزهای پایداری ولتاژ، حداکثر بارپذیری سیستم قدرت (MLP) است که با استفاده از ژاکوبین پخش‌بار (J_{lf}) تعیین می‌شود. در اینصورت مقادیر ویژه ناشی از ژاکوبین پخش‌بار تا قبل از وقوع MLP همواره در سمت راست محور موهومی در صفحه اعداد مختلط قرار دارند (متناظر با شرایط پایدار) و به ازای افزایش بار، با رسیدن به مرز MLP، یک مقدار ویژه از ماتریس ژاکوبین پخش‌بار صفر می‌گردد. به این مرز پایداری ولتاژ، مرز دو شاخه‌ای استاتیکی[3] نیز می‌گویند [۲۷، ۲۹].

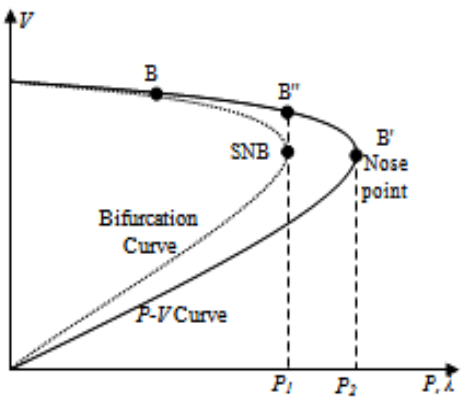
همچنین، تفاوت میان ژاکوبین‌های پخش‌بار و دینامیکی سیستم قدرت، در شکل ۱ بخوبی نشان داده شده است. به عبارتی بهتر J_{lf} همان ژاکوبین پخش‌بار سیستم است

[1] Singular

[2] Dynamic Bifurcation
[3] Static Bifurcation

www.SID.ir
Archive of SID

که زیر مجموعه‌ای از ماتریس J_{22} می‌باشد. بر اساس آنچه که در [۳۰، ۳۱] بیان شده است، روش‌های تحلیل استاتیکی علاوه بر اینکه در تعیین مرز MLP کاربرد دارند، می‌توانند جهت ارزیابی SNB نیز مورد استفاده قرار بگیرند. البته بر طبق [۹، ۳۰] تنها زمانیکه بار سیستم قدرت توان ثابت باشد نقطه فروپاشی ناشی از تحلیل‌های استاتیکی (نقطه پیشانی منحنی P-V) با نقطه فروپاشی ناشی از معادلات جبری دینامیکی رابطه (۱) (نقطه پیشانی منحنی دو شاخه‌ای) معادل و به عبارتی بهتر مرزهای MLP و SNB بر یکدیگر منطبق می‌شوند و در غیر اینصورت نتایج حاصل از ایندو آنالیز یکسان نخواهد بود. شکل ۲، تفاوت‌های این دو منحنی را برای یک بار غیر توان ثابت نشان می‌دهد.



شکل ۲- منحنی‌های P-V و دوشاخه‌ای برای بار غیر توان ثابت

۲-۳- تأثیر پارامترهای مختلف سیستم قدرت بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ

همانطور که بیان شد، حد دینامیکی پایداری ولتاژ به معنی فاصله میان نقطه کار سیستم و مرز وقوع HB در سیستم قدرت است. نه تنها این حد، بلکه حد استاتیکی پایداری ولتاژ که به معنی فاصله میان نقطه کار سیستم و نقطه یکتایی ژاکوبین پخش‌بار (MLP) و حد فروپاشی ولتاژ که به معنی فاصله میان نقطه کار سیستم و یکتایی ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت است، تحت تأثیر عوامل مختلفی از قبیل نوع بار سیستم (توان ثابت، جریان ثابت، امپدانس ثابت و دینامیکی و ...)، پارامترهای ادوات استفاده شده در تجهیزات سیستم مانند بهره (K_a) و ثابت زمانی (T_a) سیستم تحریک، حد و میزان توان راکتیو تولیدی ژنراتورها و ...، می‌باشد [۷، ۱۱، ۳۰]. در این مقاله، تأثیر پارامترهای مذکور بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ بررسی خواهد شد. به عنوان مثال، تأثیر حد توان راکتیو تولیدی ژنراتورها را می‌توان اینچنین بیان کرد؛

زمانیکه حد توان راکتیو یکی از ژنراتورهای متصل به سیستم فرا می‌رسد، در اینصورت نوع باس آن ژنراتور از باس کنترل ولتاژ (PV) به باس بار (PQ) تغییر کرده که در نتیجه آن ساختار ژاکوبین پخش‌بار سیستم و متعاقب آن ژاکوبین سیستم که در شکل ۱ بیان شده است، تغییر خواهد کرد [۱۷، ۲۹]. روابط (۶) و (۷)، رفتار ژاکوبین پخش‌بار را قبل و بعد از رسیدن یک ژنراتور به حد راکتیو خود نشان می‌دهند. در این روابط، N_{PQ} تعداد باس‌های بار (PQ) و N_{PV} تعداد باس‌های ژنراتور (PV) می‌باشد. حال اگر از میان N_{PV}، باس ژنراتوری، تعداد n_{PV} ژنراتور به حد راکتیو خود رسیده باشند، در چنین حالتی ژنراتورهایی که به حد راکتیو خود رسیده‌اند از باس‌های مدل PV به باس‌های مدل PQ تغییر وضعیت خواهند داد.

$$J_{lf}^{Old}=\begin{bmatrix}(N_{PQ}+N_{PV})\times(N_{PQ}+N_{PV}) & (N_{PQ}+N_{PV})\times(N_{PQ})\\ (N_{PQ})\times(N_{PQ}+N_{PV}) & (N_{PQ})\times(N_{PQ})\end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$J_{lf}^{New}=\begin{bmatrix}(N_{PQ}+N_{PV})\times(N_{PQ}+N_{PV}) & (N_{PQ}+N_{PV})\times(N_{PQ}+n_{PV})\\ (N_{PQ}+n_{PV})\times(N_{PQ}+N_{PV}) & (N_{PQ}+n_{PV})\times(N_{PQ}+n_{PV})\end{bmatrix} \quad (۷)$$

بدیهی است با فرارسیدن حد راکتیو یک ژنراتور، واگرایی پخش‌بار سریعتر رخ داده و در نتیجه آن حد استاتیکی و دینامیکی پایداری ولتاژ کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به اهمیت تأثیر پارامترهای مختلف بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ، در این مقاله، حد دینامیکی پایداری ولتاژ تحت تأثیر مدل‌های بار سیستم قدرت و حد راکتیو ژنراتورهای سیستم و با استفاده از ترکیب آنالیزهای شبیه‌سازی حوزه زمان، تئوری دوشاخه شدن و آنالیز

Archive of SID

www.SID.ir

مدال بر روی سیستم‌های تست استاندارد IEEE14 و IEEE39 مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

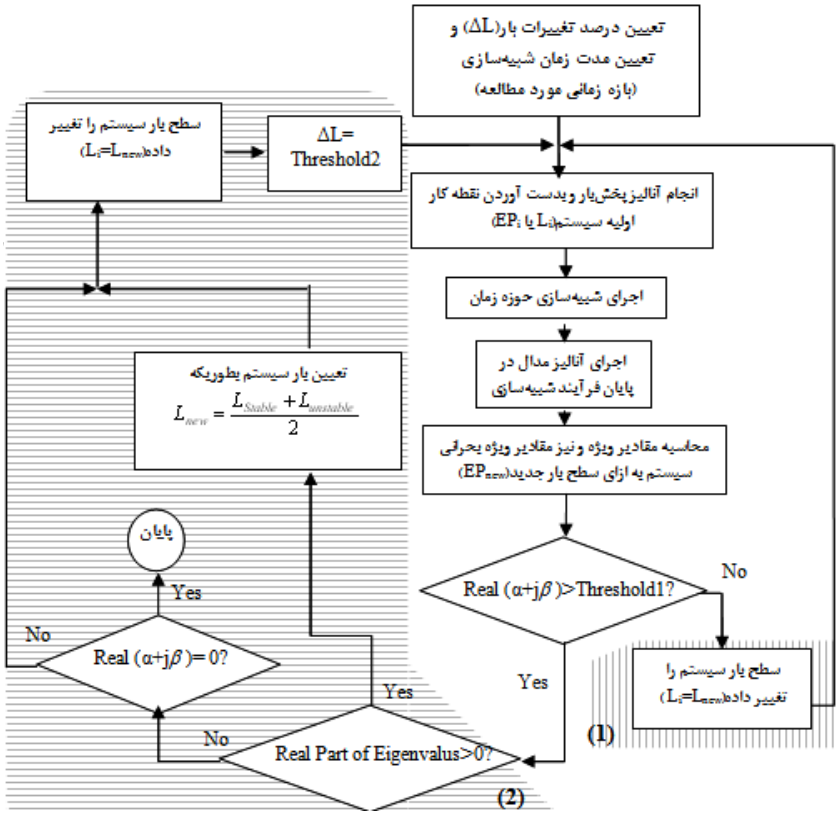
۳-الگوریتم ارائه شده

در شکل ۳ الگوریتم بکار گرفته شده جهت ارزیابی HB نشان داده شده است.

در الگوریتم بکارگرفته شده سه پارامتر مهم وجود دارد: - مدت زمان انجام شبیه‌سازی (t)، - درصد تغییرات بار سیستم (ΔL) و - یک مقدار آستانه، که این مقدار جهت ارزیابی دقت پاسخ بدست آمده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم پس از تعیین پارامترهای بیان شده، آنالیز شبیه‌سازی حوزه زمان صورت گرفته و در پایان زمان شبیه‌سازی، آنالیز مدال به ازای نقطه کار جدید سیستم انجام می‌گیرد. شبیه‌سازی زمانی برای اعمال تأثیر رفتار دینامیکی عناصر سیستم قدرت در ژاکوبین سیستم و آنالیز مدال جهت بررسی چگونگی رفتار مقادیر ویژه ژاکوبین سیستم به ازای تغییرات اعمال شده به سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاکه در این مقاله هدف بررسی پایداری ولتاژ سیگنال کوچک است، بنابراین، تغییرات اعمالی به سیستم به صورت تغییر در بار باس‌های سیستم می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر ویژه سیستم، قسمت حقیقی مقدار ویژه بحرانی بر اساس مقادیر آستانه تعریف شده، بررسی می‌شود. مقدار آستانه بصورت تجربی تعیین می‌شود. در این مقاله این مقدار ۰/۰۰۰۱- در نظر گرفته شده است. همچنین اگر به ازای بار موجود در سیستم(L_i) یک زوج مد مختلط سیستم از سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط به سمت راست عبور کرده باشد در اینصورت نقطه کار سیستم برای انجام آنالیز مجدد بر اساس رابطه (۸) تعیین می‌گردد:

$$L_{new} = \frac{L_{Stable} + L_{Unstable}}{2} \qquad (۸)$$

در حقیقت، رابطه (۸) درون‌یابی میان نقاط کار پایدار و ناپایدار سیستم را برای دستیابی به یک نقطه کار جدید پایدار ارائه می‌کند. این روند مطابق با شکل ۳ تا دستیابی به HB ادامه پیدا می‌کند.



شکل۳- الگوریتم استفاده شده جهت ارزیابی حد بارگذاری دینامیکی (HB)

www.SID.ir

۴-نتایج عددی

در این بخش نتایج عددی حاصل از بررسی تأثیر مدل‌های بار، پارامترهای بهره و ثابت زمانی سیستم تحریک و حد توان راکتیو ژنراتورهای سیستم بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ بیان شده و تفاوت‌های رفتاری مقادیر ویژه ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم به ازای موارد مذکور بر روی سیستم‌های تست IEEE14 و IEEE39 بررسی خواهد شد. اطلاعات دینامیکی و استاتیکی این سیستم‌ها که از مرجع [۳۲] انتخاب شده، در جدول ۱ بیان شده است. همچنین، در بررسی آنالیز دو شاخه‌ای بر روی سیستم‌های مذکور از نرم‌افزار DIgSILENT13.2 و در ترسیم برخی منحنی‌ها از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. مدل ژنراتورهای بکار رفته در هر دو سیستم، Genrou بوده که دارای دینامیک از مرتبه ۶ می‌باشند. علاوه بر این، سیستم تحریک مورد استفاده در سیستم‌های IEEE14 و IEEE39 بترتیب مدل IEEEX1 و مدل ساده vcoSEXS است. شکل ۴ نمایش تک‌خطی سیستم‌های IEEE14 و IEEE39 را در نرم‌افزار DIgSILENT نشان می‌دهد.

جدول ۱- اطلاعات سیستم‌های تست مورد مطالعه

پارامتر	IEEE14	IEEE39
تعداد باس PV	۴	۹
تعداد باس PQ	۹	۲۹
تعداد خطوط انتقال	۱۷	۳۴
تعداد ترانسفورماتورها	۳	۱۲
تعداد خازن‌های شنت	-	۲
MW بارهای سیستم	۲۵۶	۶۱۴۲/۵۰۱
MVar بارهای سیستم	۸۰/۷	۲۵۶۰/۵۹۹

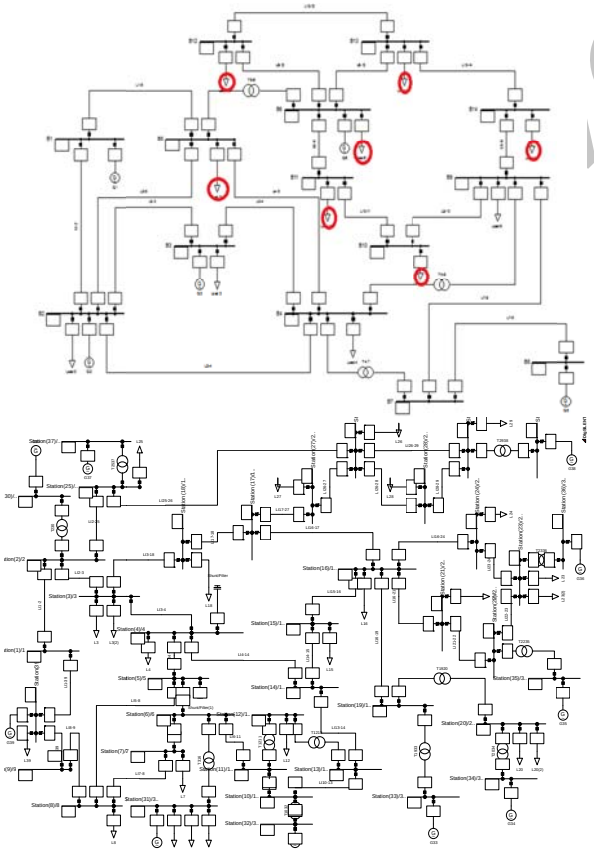
۴-۱- سیستم ۱۴ باسه IEEE

در آنالیز این سیستم جهت دستیابی به مرز HB، دو مدل بار برای باس‌های سیستم در نظر گرفته شد. در حالت اول تمام بارهای سیستم استاتیکی توان ثابت و در حالت دوم بارهای سیستم بصورت ترکیبی از بارهای استاتیکی و دینامیکی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که هر کدام از بارهای ترکیبی دارای دینامیک از مرتبه ۳ می‌باشند.

۴-۱-۱- تأثیر پارامترهای سیستم تحریک بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ

در این قسمت، تأثیر تغییر پارامترهای سیستم تحریک شامل گین (K_a) و ثابت زمانی (T_a) باس مرجع در حالیکه تنها در بار باس ۴ تغییرات اعمال شده و بارهای سیستم استاتیکی توان ثابت می‌باشند بررسی شده است.

در جدول ۲ نتایج حاصل از این بررسی بیان شده است. با توجه به این نتایج ملاحظه می‌شود که در شرایط یکسان، کاهش گین (K_a) و نیز کاهش ثابت زمانی (T_a) سیستم تحریک، حد دینامیکی پایداری ولتاژ را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، در T_a ثابت با افزایش K_a از ۲۰۰ به ۲۰۸، حد دینامیکی پایداری ولتاژ به میزان ۲۲/۰۷MW کاهش پیدا کرده است.



شکل۴- نمایش تک‌خطی سیستم IEEE14 (راست) و سیستم IEEE39 (چپ)

www.SID.ir
Archive of SID

جدول۲- نتایج تأثیر پارامترهای سیستم تحریک در وقوع HB

مد بحرانی	پارامترهای ژنراتورباس SLACK	میزان بار در HB(MVA)
۲۸-۲۷	Ka=۲۰۰, Ta=۰/۰۲۰	۱۰۵/۸۴+j۸/۶۱۷
۲۸-۲۷	Ka=۱۷۰, Ta=۰/۰۲۳	۱۳۲/۸۲+j۱۰/۸۱۴
۲۸-۲۷	Ka=۲۰۸, Ta=۰/۰۲۰	۸۳/۷۷+j۶/۸۳۱
۲۸-۲۷	Ka=۱۷۰, Ta=۰/۰۲۰	۱۸۵/۷۲+j۱۵/۱۰۸

همچنین، در زمان وقوع HB به ازای پارامترهای مختلف سیستم تحریک ژنراتور شین مرجع، مد بحرانی ژاکوبین سیستم ثابت (مد ۲۷-۲۸) می‌ماند. به عبارتی بهتر، در تعیین حد دینامیکی پایداری ولتاژ (مرز HB)، شاخص‌های مختلفی از قبیل مقدار ویژه ژاکوبین سیستم، نسبت میرایی مد بحرانی سیستم و حتی نوسانات متغیرهای سیستم می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. جدول ۳، نسبت میرایی مد بحرانی را با توجه به رابطه ۵، برای دو حالت متفاوت از پارامترهای سیستم تحریک ژنراتور باس مرجع و به ازای تغییرات بار باس ۴ نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، ملاحظه می‌شود با افزایش بار سیستم، نسبت میرایی مد بحرانی سیستم کاهش پیدا کرده و در نهایت با عبور از مرز HB مقداری منفی پیدا می‌کند. همچنین، در هنگام وقوع HB، نسبت میرایی مد بحرانی سیستم صفر می‌شود که این موضوع متناظر با نوسانات نامیرای دامنه ولتاژ باس ۴ خواهد بود.

جدول ۳- نسبت میرایی مد بحرانی را برای دو حالت متفاوت از پارامترهای سیستم تحریک

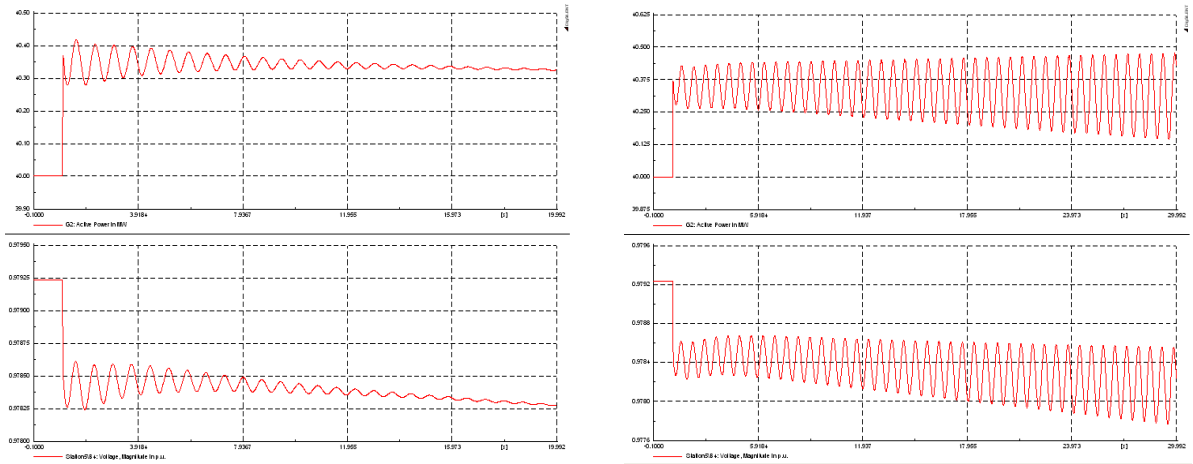
نسبت میرایی	میزان بار(MVA)	مد بحرانی	توضیحات
۰/۱۳۸۹	۴۹/۶۳+j۴/۰۵	۲۶-۲۵	Ka=۲۰۰ Ta=۰/۰۲
۰/۰۸۴۴۱	۸۰/۲۵+j۶/۵۴	۲۶-۲۵	
۰ (HB)	۱۰۵/۸۴+j۸/۶۱۷	۲۸-۲۷	
-۰/۰۰۵۹	۱۱۲/۱۲+j۹/۱۳	۲۸-۲۷	
۰/۳۶۴	۴۹/۶۳+j۴/۰۵	۲۶-۲۵	Ka=۱۷۰ Ta=۰/۰۲
۰/۲۷۳	۹۹/۵۳+j۸/۱۲	۲۶-۲۵	
۰/۰۸۲۹	۱۸۲/۷۹+j۱۴/۸۷	۲۸-۲۷	
۰ (HB)	۱۸۵/۷۲+j۱۵/۱۰۸	۲۸-۲۷	
-۰/۰۴۰۳	۲۰۵/۸+j۱۶/۷۴	۲۸-۲۷	

علاوه بر این، ملاحظه می‌شود که در سطح بار یکسان (۴۹/۶۳+j۴/۰۵MVA)، نسبت میرایی مد بحرانی در K_a=۲۰۰ برابر ۰/۱۳۸۹ و در K_a=۱۷۰ برابر ۰/۳۶۴ است که این موضوع نشان دهنده تأثیر بهره (K_a) سیستم تحریک در میزان میرایی مد بحرانی و حد دینامیکی پایداری ولتاژ سیستم است. همچنین ملاحظه می‌شود که در طول افزایش بار سیستم مد بحرانی سیستم تغییر می‌کند اما در محدوده وقوع HB، مد بحرانی سیستم ثابت و بدون تغییر است. در شکل ۵ نوسانات توان اکتیو ژنراتور باس ۲ و ولتاژ باس ۴ برای گین‌های ۲۰۰ و ۱۷۰ ژنراتور باس مرجع در سطح باری معادل ۱۱۲/۱۲+j۹/۱۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۲ و ۴، زمانیکه K_a=۲۰۰ باشد، در سطح بار مذکور سیستم ناپایدار است و در نتیجه انتظار بر این است که دامنه نوسانات سیستم نامیرا باشد. این موضوع در شکل ۵ (شکل راست) بخوبی نشان داده شده است. اما برای K_a=۱۷۰، سطح بار مذکور از سطح باری که منجر به فروپاشی دینامیکی سیستم شده است (۱۸۵/۷۲+j۱۵/۱۰۸) کمتر است و بنابراین انتظار داریم دامنه نوسانات در سیستم میرا باشد (شکل ۵ سمت چپ). بنابراین، ملاحظه می‌شود که تغییر پارامترهای سیستم تحریک (در اینجا گین سیستم تحریک)، علاوه بر تأثیر بر روی مقادیر ویژه سیستم، بر روی دامنه نوسانات نیز تأثیرگذار می‌باشد.

۴-۱-۲- تأثیر مدل‌های بار بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ

در این قسمت، نتایج بررسی تأثیر مدل‌های بار در حد دینامیکی پایداری ولتاژ و رفتار مقادیر ویژه ژاکوبین سیستم بررسی شده است. بدین‌منظور بار باس‌هایی که در شکل ۴ (راست) با دایره علامتگذاری شده‌اند، به صورت بارهای ترکیبی با $x\%$ دینامیک و $y\%$ استاتیک در نظر گرفته شده است و بقیه بارهای سیستم، استاتیکی توان ثابت می‌باشند.

www.SID.ir
Archive of SID



شکل ۵- نوسانات توان اکتیو (شکل بالا) ژنراتور G_2 و ولتاژ باس ۴ (شکل پایین) در بار ۱۱۲/۱۲+j۹/۱۳؛ شکل سمت راست (K_a=۲۰۰) و شکل سمت چپ (K_a=۱۷۰)

جدول ۴، نتایج حاصل از بررسی تأثیر ۵ حالت مختلف از شرایط سیستم در وقوع HB به ازای تغییرات بار باس ۴ و در حالیکه دینامیک بارهای ترکیبی ۴۰٪ است را نشان می‌دهد. در این جدول، بجز حالت ۵ که تمام بارهای استاتیکی سیستم از نوع امپدانس ثابت هستند، نوع بار استاتیکی باس‌ها از نوع توان ثابت می‌باشد. از مقایسه نتایج سطرهای ۱ و ۵ جدول ۴، ملاحظه می‌شود که با تغییر نوع بار استاتیکی سیستم از توان ثابت به امپدانس ثابت، حد دینامیکی پایداری ولتاژ و به عبارتی بهتر سطح باری که منجر به وقوع HB در سیستم می‌گردد، از ۵۶/۶۱+j۴/۶MVA به ۸۸/۲۱+j۷/۲۱MVA افزایش پیدا کرده است.

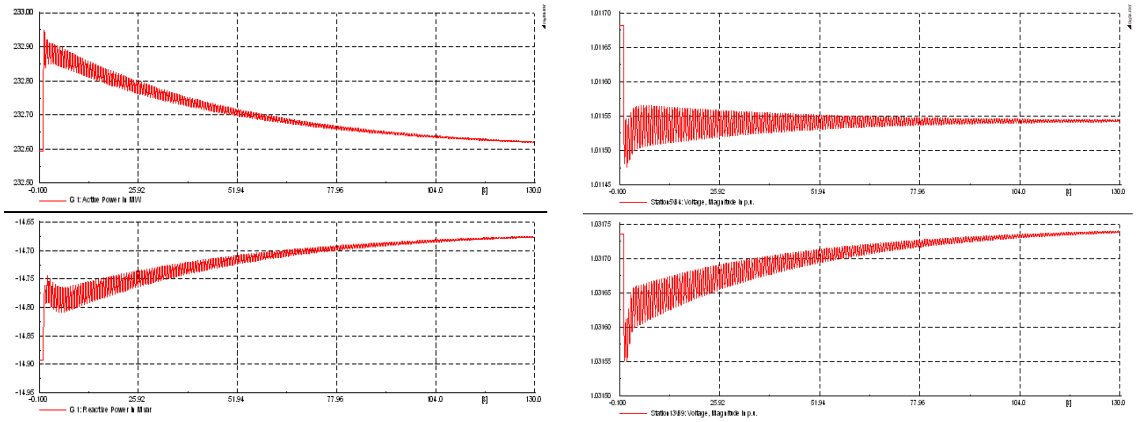
جدول۴- تأثیر پارامترهای سیستم تحریک و نوع بارهای سیستم در وقوع HB به ازای تغییرات بار باس ۴

	توضیحات	میزان بار در HB (MVA)
۱	Ka=۲۰۰, Ta=۰/۰۲	۵۶/۶۱+j۴/۶
۲	Ka=۱۷۰, Ta=۰/۰۲	۱۳۵/۱۲+j۱۰/۹۹۸
۳	Ka=۲۰۲, Ta=۰/۰۲	۵۰/۷۶+j۴/۱۴
۴	Ka=۲۰۰, Ta=۰/۰۱۹	۸۲/۳۶+j۶/۶۱۸
۵	Ka=۲۰۰, Ta=۰/۰۲	۸۸/۲۱+j۷/۲۱

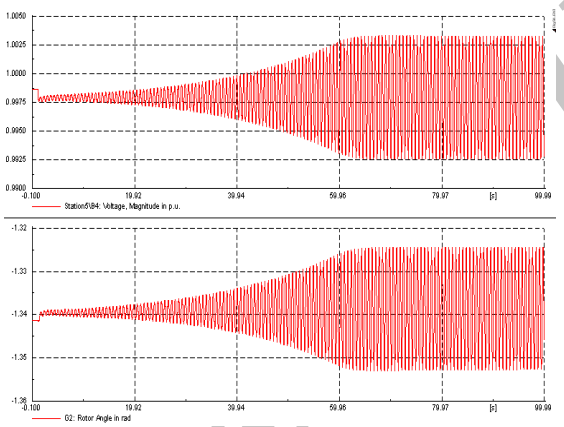
علاوه بر این، با مقایسه سطر اول جدول‌های ۲ و ۴ ملاحظه می‌شود که با تغییر نوع بار سیستم و افزوده شدن دینامیک به بارهای سیستم، حد دینامیکی پایداری ولتاژ از مقدار ۱۰۵/۸۴+j۸/۶۱۷MVA به ۵۶/۶۱+j۴/۶MVA کاهش پیدا کرده است. همچنین، با توجه به نتایج جدول ۴ ملاحظه می‌شود که کاهش گین (K_a) و نیز کاهش ثابت زمانی (T_a) سیستم تحریک، حد دینامیکی پایداری ولتاژ را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، متناظر با سطر اول جدول ۴ که در این حالت بارهای استاتیکی سیستم از نوع توان ثابت بوده و بارهای دینامیکی دارای ۴۰٪ دینامیک و ۶۰٪ استاتیک می‌باشند، نوسانات ولتاژ باس‌های ۴ و ۹ و توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتور باس ۲ به ازای تغییر بار باس ۴ از مقدار بار پایه (۴۷/۸+j۳/۹MVA) در شکل ۶ نشان داده شده است. بر این اساس و با توجه به نوسانات میرای سیستم، تمامی مقادیر ویژه ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم در سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط قرار دارند که نشان دهنده پایداری دینامیکی ولتاژ می‌باشد. از سویی دیگر، با افزایش بار سیستم و رسیدن به مرز HB، دامنه نوسانات سیستم افزایش یافته و رفتاری نامیرا از خود نشان خواهد داد. شکل ۷ نوسانات نامیرای ولتاژ باس ۴ و زاویه رتور ژنراتور G_2 را در سطح بار منجر به HB (۵۶/۶۱+j۴/۶MVA) به ازای تغییرات بار باس ۴ نشان می‌دهد که متناظر با قرار گرفتن بحرانی‌ترین مد سیستم بر روی محور موهومی صفحه اعداد مختلط قرار است. شکل ۸ نیز بحرانی‌ترین مقادیر ویژه سیستم را به ازای سه بارگذاری مختلف و متناظر با سطر اول جدول ۴ نشان می‌دهد.

Archive of SID

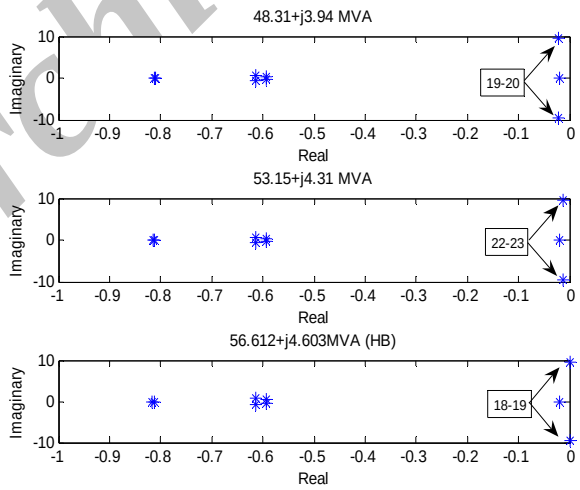
www.SID.ir



شکل ۶- شکل سمت راست: نوسانات میرای ولتاژ باس‌های ۴ (شکل بالا) و ۹ (شکل پایین) و شکل سمت چپ: نوسانات میرای توان اکتیو (شکل بالا) و توان راکتیو (شکل پایین) ژنراتور G_2



شکل ۷- نوسانات نامیرای ولتاژ باس ۴ (شکل بالا) و زاویه رتور ژنراتور G_2 (شکل پایین) در سطح بار منجر به HB



شکل ۸- موقعیت مقادیر ویژه بحرانی سیستم به ازای سه بارگذاری نمونه در باس ۴

با توجه شکل ۸ ملاحظه می‌شود که در طول افزایش بارگذاری سیستم، بحرانی‌ترین مد سیستم تغییر می‌کند. علاوه بر این، بر خلاف نتایج بیان شده در جدول ۳، در زمان وقوع HB در سیستم، مدی که بر روی محور موهومی قرار می‌گیرد، مدهای (۱۸-۱۹) می‌باشند. در حقیقت این تغییر در مد بحرانی ناشی از اضافه شدن دینامیک به بارهای سیستم می‌باشد که رفتار سیستم و در نتیجه مقادیر ویژه آن‌را شدیداً غیرخطی می‌کند.

www.SID.ir

۴-۲- سیستم ۳۹ باسه IEEE

۴-۲-۱- تأثیر حد راکتیو ژنراتورها بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ

در این قسمت، حد دینامیکی پایداری ولتاژ و رفتار مقادیر ویژه ژاکوبین کاهش‌یافته سیستم در دو حالت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در حالت اول، محدوه توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم به نحوی تعیین می‌گردد که با افزایش بار، هیچکدام از ژنراتورها به حد راکتیو خود نرسند (Case1). در حالت دوم این محدوده به نحوی انتخاب می‌شود که در برخی از حالات به ازای افزایش بار سیستم، یک یا چند ژنراتور به حد راکتیو خود برسند (Case2). در این آنالیز، بارهای سیستم ترکیبی از بارهای توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت می‌باشند که ترکیب این بارها در جدول ۵ بیان شده است.

در جدول ۶، مقادیر ولتاژ پایانه و توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای ۳۱، ۳۳ و ۳۵، ولتاژ باس‌های ۷ و ۲۱ و نیز مقادیر بحرانی‌ترین مقدار ویژه ژاکوبین کاهش‌یافته سیستم به ازای تغییر همزمان بار باس‌های ۷ و ۲۱ بیان شده است. همچنین، شکل ۹ رفتار توان راکتیو تولیدی و ولتاژ ترمینال ژنراتورهای ۳۱، ۳۳ و ۳۵ را به ازای تغییرات همزمان بار باس‌های ۷ و ۲۱ و متناظر با نتایج بیان شده در جدول ۶، نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج ملاحظه می‌شود که در ضریب بارگذاری ۲/۸، حد بالای توان راکتیو تولیدی ژنراتور باس ۳۱ برای Case2 فرا رسیده که در نتیجه آن ولتاژ ترمینال این ژنراتور شروع به کاهش کرده و توان راکتیو تولیدی آن در یک مقدار تقریباً مشخصی ثابت می‌ماند. بنابراین در چنین حالتی، ژنراتور ۳۱ از نوع PV به PQ تغییر وضعیت می‌دهد. همچنین، در شکل ۱۰، رفتار بحرانی‌ترین مقدار ویژه ژاکوبین کاهش‌یافته سیستم به ازای بارگذاری‌های مختلف در بار باس‌های ۷ و ۲۱ نشان داده شده است.

جدول ۵- ترکیب بارهای باس‌های مختلف سیستم ۳۹ باسه IEEE

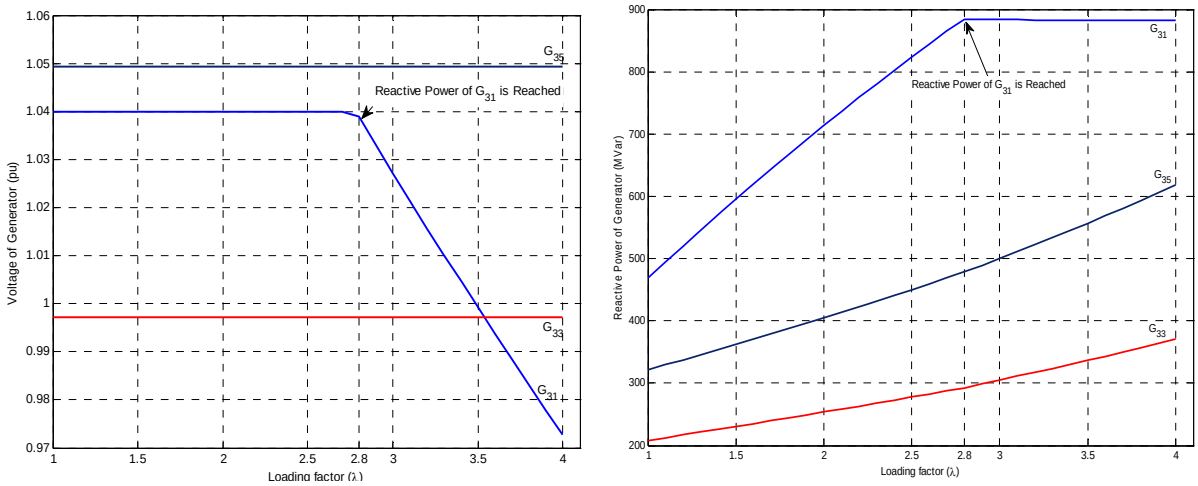
شماره باس‌بار	نوع بار باس		
	توان ثابت(**P**)	جریان ثابت(**I**)	امپدانس ثابت(**Z**)
4, 8, 15, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 39	%100	%0	%0
12, 18	%0	%100	%0
7, 16, 26	%0	%0	%100
20	%50	%0	%50
23	%0	%50	%50
3	%50	%50	%0
31	%33.33	%33.33	%33.33

جدول ۶- نتایج حاصله از بررسی بارگذاری‌های مختلف در بار باس‌های ۷ و ۲۱

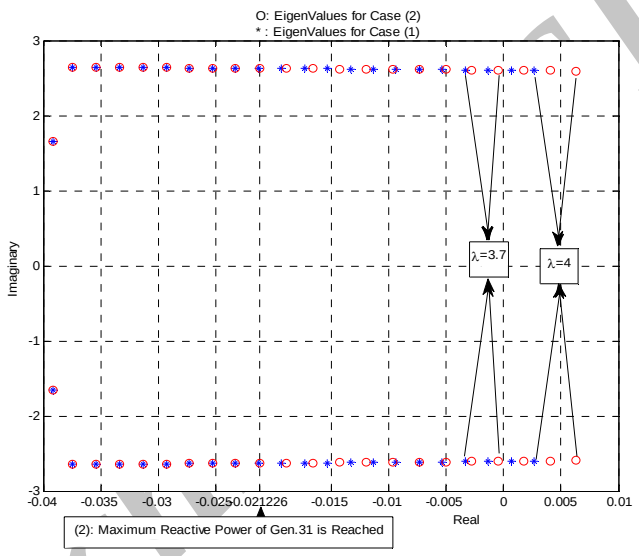
λ	V_7 (p.u)	V_{21} (p.u)	G_{31}		G_{33}		G_{35}		مقدار ویژه بحرانی	
			V(p.u)	Q(MVar)	V(p.u)	Q(MVar)	V(p.u)	Q(MVar)	Real	Imaginary
حالت ۱										
1	1.004	0.892	1.039	468.68	0.997	208.14	1.049	321.8	-0.039125	1.653771
1.5	0.992	0.845	1.039	595.24	0.997	230.46	1.049	362.23	-0.039125	1.653771
2	0.979	0.802	1.039	713.10	0.997	253.46	1.049	404.98	-0.037448	2.644596
2.5	0.966	0.761	1.039	823.64	0.997	277.46	1.049	450.03	-0.027302	2.635958
2.8	0.958	0.738	1.040	886.97	0.997	292.48	1.049	478.38	-0.021290	2.630234
3.2	0.946	0.709	1.040	968.45	0.997	313.42	1.049	518.01	-0.013309	2.621871
3.6	0.934	0.681	1.040	1047.08	0.997	335.61	1.049	560.05	-0.005324	2.612531
حالت ۲										
1	1.004	0.892	1.039	468.68	0.997	208.14	1.049	321.8	-0.039125	1.653771
1.5	0.992	0.845	1.039	595.24	0.997	230.46	1.049	362.23	-0.039125	1.653771
2	0.979	0.802	1.039	713.10	0.997	253.46	1.049	404.98	-0.037448	2.644596
2.5	0.966	0.761	1.039	823.64	0.997	277.46	1.049	450.03	-0.027302	2.635958
2.8	0.958	0.738	1.037	883.22	0.997	292.66	1.049	478.59	-0.021226	2.630169
3.2	0.945	0.703	1.016	883.22	0.997	317.33	1.049	522.51	-0.011918	2.620329
3.6	0.932	0.669	0.993	883.22	0.997	343.04	1.049	568.66	-0.002746	2.609400

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۹- توان راکتیو تولیدی (شکل سمت راست) و ولتاژ ترمینال (شکل سمت چپ) ژنراتورهای سیستم در بارگذاری‌های مختلف بار باس‌های ۷ و ۲۱



شکل ۱۰- بحرانی‌ترین مقادیر ویژه ژاکوبین کاهش‌یافته سیستم در بارگذاری‌های مختلف بار باس‌های ۷ و ۲۱ برای حالات ۱ و ۲

با توجه به این نتایج، نکاتی چند حائز اهمیت می‌باشند:

- رفتار تمامی پارامترهای سیستم مانند ولتاژ ترمینال‌های سیستم، توان راکتیو تولیدی ژنراتورها و حتی مقادیر ویژه بحرانی سیستم تا قبل از رسیدن حد توان راکتیو ژنراتورها در حالت ۲، برای هر دو حالت کاملاً مشابه بوده و دارای مقادیر یکسانی است. به بیانی بهتر و به عنوان مثال ولتاژ تمامی ترمینال‌های سیستم در دو حالت ۱ و ۲ با یکدیگر برابر است (مثلاً $V_{7(Case1)}=V_{7(Case2)}$) اما زمانیکه یکی از ژنراتورها به حد راکتیو خود می‌رسد، دیگر این ارتباط وجود نخواهد داشت.
- بر خلاف حالت ۱، زمانیکه یکی از ژنراتورهای موجود در سیستم در حالت ۲ به حد راکتیو خود می‌رسد، توان راکتیو تولیدی آن ژنراتور ثابت و ولتاژ پایانه آن کاهش می‌یابد. از سویی، در حالیکه ولتاژ پایانه ژنراتورهای دیگر همچنان ثابت و در دو حالت ۱ و ۲ برابر با یکدیگر است اما توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای واحدهایی که به حد راکتیو نرسیده‌اند در حالت ۲ بیشتر از حالت ۱ می‌شود. به عنوان مثال در ضریب بارگذاری ۲/۵، $Q_{g33(Case1)}=Q_{g33(Case2)}$ در حالیکه در ضریب بارگذاری ۳/۲، $Q_{g33(Case1)}<Q_{g33(Case2)}$ است. در حقیقت این

www.SID.ir

موضوع نیز کاملاً طبیعی است. به عبارتی بهتر با رسیدن ژنراتور ۳۱ به حد راکتیو خود، توان راکتیو مورد نیاز سیستم باید از طریق ژنراتورهای دیگر تأمین شود که در نتیجه آن ژنراتورهایی که به حد راکتیو خود نرسیده باشند، توان راکتیو بیشتری را تولید خواهند کرد.

- با توجه به شکل ۱۰، تا قبل از رسیدن یکی از ژنراتورها به حد راکتیو خود، مقادیر ویژه سیستم در هر دو حالت ۱ و ۲ کاملاً منطبق بر یکدیگر می‌باشند. اما زمانیکه یکی از ژنراتورها به حد راکتیو خود می‌رسد، مقدار ویژه بحرانی حالت ۲ به ازای تغییرات بار سیستم با شتاب بیشتری به سمت ناپایداری (متناظر با مرز HB و یا LIB) حرکت می‌کند. این شتاب در سطوح بار پائین‌تر پس از رسیدن یک ژنراتور به حد راکتیو خود کمتر و به مرور در سطوح بالاتر بار بیشتر می‌گردد. از سویی دیگر، با توجه به شکل، در ضریب بار ۳/۷، مقدار ویژه بحرانی حالت ۲ نسبت به مقدار ویژه بحرانی حالت ۱ به محور موهومی نزدیکتر است. این موضوع بخوبی نشان می‌دهد که با رسیدن ژنراتورها به حد راکتیو خود، حد دینامیکی پایداری ولتاژ کاهش خواهد یافت. همچنین، در یک سطح بار بالاتر (λ=3.8)، مقدار ویژه بحرانی حالت ۲ از محور موهومی عبور کرده در حالیکه مقدار ویژه بحرانی حالت ۱ همچنان در سمت چپ محور موهومی قرار داشته و بنابراین سیستم در شرایط پایدار قرار دارد.

۴-۲-۲- تأثیر مدل‌های بار بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ

در این قسمت، تأثیر مدل‌های بار استاتیکی یعنی بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین‌منظور، سیستم حالت ۱ که در آن به ازای تغییر بار سیستم هیچ ژنراتوری به حد راکتیو خود نمی‌رسد در نظر گرفته می‌شود. همچنین، فرض بر این است که یکبار تمامی بارهای سیستم توان ثابت می‌باشند و در آنالیز دوم بارها همانند آنچه که در جدول ۵ بیان شده است، می‌باشند.

در حالت کلی، انتظار بر این است که هرچه وابستگی بار سیستم به ولتاژ سیستم بیشتر باشد (به عبارتی بهتر با افزایش تعداد بارهای جریان ثابت و امپدانس ثابت سیستم)، حد دینامیکی پایداری ولتاژ افزایش یابد. در جدول ۷، نتایج حاصل از تغییر بار باس ۱۶ و نیز تغییر همزمان بار باس‌های ۴ و ۷ برای دو مدل متفاوت از بارهای استاتیکی سیستم، بیان شده است. با توجه به نتایج جدول ۷، با تغییر بار باس ۱۶، زمانیکه تمامی بارهای سیستم از نوع توان ثابت می‌باشند، مرز HB زمانی رخ می‌دهد که ضریب بارگذاری (λ) این بار ۳/۳۰۳۶ باشد. در حالیکه اگر بارهای سیستم ترکیبی از بارهای توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت باشد، HB در ضریب بارگذاری ۴/۴۶۶۸ رخ می‌دهد. این در حالی است که این حال با تغییر مدل بار استاتیکی سیستم، مد بحرانی که سبب وقوع HB در سیستم می‌گردد بدون تغییر باقی می‌ماند (مد ۳۸-۳۹). همچنین در بررسی دیگر، بار باس‌های ۴ و ۷ بطور همزمان تغییر کرده و در نتیجه آن ملاحظه می‌شود که علاوه بر ثابت ماندن مد بحرانی سیستم در زمان وقوع HB (مد ۳۸-۳۹)، زمانیکه بارهای سیستم بصورت ترکیبی از بارهای توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت می‌باشند، حد دینامیکی پایداری ولتاژ نسبت به حالتیکه بارهای سیستم از نوع توان ثابت می‌باشند، افزایش می‌یابد.

جدول ۷- تأثیر نوع بار استاتیکی سیستم در وقوع HB

مد بحرانی	نوع بار استاتیکی	ضریب بار در HB
تغییر بار باس ۱۶		
۳۹-۳۸	توان ثابت	۳/۳۰۳۶
۳۹-۳۸	متناظر با جدول ۵	۴/۴۶۶۸
تغییر همزمان بار باس ۴ و ۷		
۳۹-۳۸	توان ثابت	۱/۸۴۳۲
۳۹-۳۸	متناظر با جدول ۵	۳/۱۳۰۸

Archive of SID

www.SID.ir

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله تئوری دوشاخگی در سیستم قدرت بیان گردید و بر اساس این تئوری مرزهای مرتبط با پایداری ولتاژ یک سیستم قدرت تعریف شد. بر این اساس با استفاده از یک آنالیز ترکیبی شامل آنالیز مدال، تئوری دوشاخگی و شبیه‌سازی دینامیکی، تأثیر نوع بارهای سیستم قدرت، پارامترهای سیستم تحریک و حد توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم بر حد دینامیکی پایداری ولتاژ بررسی گردید. لازم به ذکر است که نتایج بیان شده در قسمت‌های مختلف مقاله، برای آنالیزهای متفاوت بدست آمده که در این مقاله بخش‌هایی از آن مورد بررسی قرار گرفته و بیان شده است. بر این اساس و با توجه به نتایج بدست آمده، ملاحظه گردید که؛

- در ثابت زمانی یکسان، زمانیکه گین سیستم تحریک کاهش پیدا کند، در اینصورت حد دینامیکی پایداری ولتاژ افزایش پیدا می‌کند. همچنین در گین یکسان، زمانیکه ثابت زمانی سیستم تحریک افزایش پیدا کند، در اینصورت حد دینامیکی پایداری ولتاژ کاهش پیدا می‌کند.
- از دید ژاکوبین‌های دینامیکی برای حفظ پایداری ولتاژ (به عبارت دقیق‌تر مرز دینامیکی پایداری ولتاژ) باید مقادیر ویژه در سمت چپ محور موهومی در صفحه اعداد مختلط باشند و به ازای افزایش بار، مقادیر ویژه بحرانی به محور موهومی (در خصوص مرز HB) [۷، ۸] و یا به مبدأ (در خصوص مرز SNB) [۷، ۱۰] نزدیک می‌شوند.
- افزایش درصد دینامیک بارهای سیستم حد دینامیکی پایداری ولتاژ را کاهش می‌دهد.
- با افزوده شدن به دینامیک بارهای سیستم، رفتار مقادیر ویژه سیستم بشدت غیر خطی می‌شود.
- در مقایسه با بارهای توان ثابت، چنانچه نوع بار سیستم امپدانس ثابت باشد، در اینصورت حد دینامیکی پایداری ولتاژ افزایش می‌یابد.
- در طول تغییر بارگذاری سیستم جهت دستیابی به مرز HB، مد بحرانی سیستم ثابت نیست. به عبارت بهتر، همواره یک مد مشخص به عنوان بحرانی‌ترین مد مطرح نمی‌باشد.
- حد راکتیو ژنراتورهای سیستم، تأثیر بسزایی در حد استاتیکی و دینامیکی پایداری ولتاژ سیستم دارد. به عبارتی بهتر، اگر یک یا چند ژنراتور سیستم به حد راکتیو خود برسند، در اینصورت حد استاتیکی و دینامیکی پایداری ولتاژ کاهش پیدا خواهد کرد.
- در یک شرایط یکسان، اگر یکبار حد راکتیو ژنراتورها باز (حالت ۱) و یکبار بسته (حالت ۲) لحاظ گردد، تا قبل از رسیدن یکی از ژنراتورها به حد راکتیو خود در حالت ۲، مقادیر تمامی متغیرهای سیستم مانند ولتاژ باس‌ها، مقادیر ویژه سیستم و ...، در هر دو حالت ۱ و ۲ کاملاً منطبق بر یکدیگر می‌باشند. اما زمانیکه یکی از ژنراتورها به حد راکتیو خود می‌رسد، این موضوع دیگر برقرار نمی‌باشد.
- زمانیکه یک ژنراتور به حد راکتیو خود می‌رسد، توان راکتیو تولیدی آن ثابت و ولتاژ ترمینال آن کاهش می‌یابد. این موضوع به معنی تبدیل نوع باس ژنراتور از PV به PQ می‌باشد.

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. 2004; 19(3): 1387-1401.

Archive of SID

www.SID.ir

[2] Feng Zhihong., et.al. (1992). "The static voltage stability analysis methods for many generators power system–singularity decoupled method", Proceedings of CSEE. 1992; 12(3): 10-18.

[3] Feng Zhihong., et.al. (1991). "The static voltage stability eigenvalue analysis method for many generators power system", Journal of Tsinghua University. 1991; 31(4): 19-27.

[4] Sekine Y. and Yokoyama A. (1989). "A static voltage stability index based on multiple load flow solutions", Proc. Of Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security. May 1989; 65-72.

[5] Chen H., Wang Y., Zhou R. (2001). "Transient and voltage stability enhancement via coordinated excitation and UPFC control", IEE Proc. Gener Transm Distrib. 2001; 148(3): 201-208.

[6] Huang GM., Zhao L., Song X. (2002). "A new bifurcation analysis for power system dynamic voltage stability studies", In: Proc IEEE power eng. soc winter meeting. 2002; 2: 882-887.

[7] 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. 2008; 49(10): 2629-2641.

[8] Wieslaw Marszalek., Zdzislaw W. Trzaska. (2005). "Singularity-Induced Bifurcations in Electrical Power Systems", IEEE Trans. Power Syst. 2005; 20(1): 312-320.

[9] Jia Hongjie., Yu Xiaodan and Yu Yixin. (2005). "An improved voltage stability index and its application", Electrical power and energy systems 2005; 27: 567-574.

[10] Mithulananthan N., Canizares C., Reeve J. (2000). "Indices to detect Hopf bifurcations in power systems", In: Proc of NAPS. 2000; 1: 15-23.

[11] 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. 2004; 9(4): 69-76.

[12] Zhang Y. P., Huang W., Liu Z. Q., Yang J. Y., Cai X. L., J. H. Zhang. (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. 2005; 3: 2939-2943.

[13] Sekine Y., Yokoyama A . (1989). "A Static Voltage Stability Index Based on Multiple Load Flow Solutions", Proc. Of Bulk Power System Voltage Phenomena-Voltage Stability and Security. May 1989; 65-72.

[14] Chen H., Wang Y., Zhou R. (2001). "Transient and voltage stability enhancement via coordinated excitation and UPFC control", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution. 2001; 148(3): 201-208.

[15] Kundur P. (1994). "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., The EPRI Power System Engineering Series.

[16] M. A. PAI., Peter W. Sauer., Bernard C. Lesieuter. (1995). "Static and Dynamic Nonlinear Loads and Structural Stability in Power Systems", Proceeding of the IEEE. 1995; 83(11): 1562-1571.

[17] Kip Morison., Hamid Hamadani., Lei Wang. (2006). "Load modeling for voltage stability studies", In: Proc IEEE power systems conf and exposition (PSCE). 2006; 564-568.

[18] S. Chakrabarti. (2008). "Voltage Stability Monitoring by Artificial Neural Network Using a Regression-based Feature Selection Method", Expert Systems with Applications, 2008; 35(4): 1802-1808.

[19] Amjady N. (2000). "Application of a New Neural Network to On-line Voltage Stability Assessment", Can. J. Elect. Comp. Eng. 2000; 25(2): 69-75.

[20] T. Jain., L. Srivastava., S. N. Singh. (2003). "Fast Voltage Contingency Screening Using Radial Basis Function Neural Network", IEEE Trans. Power Syst. 2003; 18(4): 1359-1366.

[21] S. Kamalasadan., D. Thukaram., A. K. Srivastava. (2009). "A New Intelligent Algorithm for Online Voltage Stability Assessment and Monitoring", Int. J. of Electrical Power & Energy Systems. 2009; 31(2-3): 100-110.

[22] 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). 2011; 21(1): 312–328.

Archive of SID

www.SID.ir

[23] Karimi A. (2011). “Power system transient stability margin estimation using neural networks”, Int. J. of Electrical Power and Energy Systems. 2011; 33(4): 983-991.

[24] Amjady N., Esmaili M. (2006). “Application of a new sensitivity analysis framework for voltage contingency ranking”, IEEE Trans. Power Syst. 2006; 20(2): 973–83.

[25] Yuri V. Makarov, Zhao Yang Dong and David J.Hill. “A general method for small signal stability analysis”, IEEE Trans. Power Syst. 1998; 13(3): 979-985.

[26] Dobson I, et.al. (2002). “Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools”, August 2002 IEEE Power Engineering Society Power System Stability Subcommittee Special Publication IEEE product number SP101PSS ISBN 0780378695. 2002.

[27] Guckenheirner J., Holmes P. (2002). “Nonlinear Oscillations Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields”, Spring.

[28]. Nemat Talebi, Shafiee Mostafa, Subramaniam Bala, Karamdel Javad. (2007). "Limit Induced Bifurcation Due to Series Connected FACTS Devices During Voltage Collapse Phenomena", First International Conference on Industrial and Information Systems. 2007; 36-39.

[29] Xunning Yue., Venkatasubramanian V. (2007). “Complementary limit induced bifurcation theorem and analysis of Q limits in power-flow studies”, Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability, 2007 iREP Symposium. 2007: 1-8.

[30] 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. 2009; 50(12): 3202-3210.

[31] Dobson I, et.al. (2002). “Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools”, Chapter 2. IEEE Power Engineering Society, Power System Stability Subcommittee, Special Publication IEEE product number SP101PSS. PP. 14.

[32] http://www.ee.washington.edu/research/pstca/.

Archive of SID

www.SID.ir