

محاسبه سریع و دقیق حاشیه پایداری ولتاژ با تقریب منحنی PV

فرید کربلایی^۱، استادیار، شهریار عباسی^۲، دانشجو دکتری، حسین صابری^۱، دانشجو کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - f_karbalaee@strtu.edu

۲- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه رازی - کرمانشاه - ایران - shahriarabasi@gmail.com

چکیده: حاشیه پایداری ولتاژ از طریق دنبال کردن منحنی‌های PV با استفاده از روش پخش بار تداومی قابل محاسبه است. این روش نیاز به انجام پخش بارهای متعدد و صرف زمان زیاد دارد. در مقالات مختلف نشان داده شده است که منحنی‌های PV، به ویژه در حوالی نقطه حداکثر بارگذاری، رفتاری شبیه به یک منحنی درجه دو دارند. از این موضوع برای تقریب منحنی‌های PV و محاسبه نقطه حداکثر بارگذاری استفاده شده است. این مقاله به تکمیل کارهای انجام شده باهدف کاهش حجم محاسبات می‌پردازد. به این منظور، به جای سه ضریب، از دو ضریب ثابت برای محاسبه تابع درجه دو استفاده شده و لذا محاسبه تابع درجه دو ساده‌تر می‌گردد، زیرا در صورتی که تنها از یک پخش بار استفاده شود، نیازی به محاسبه مشتق درجه دوم متغیرها نیست. همچنین سعی می‌شود که نقطه شروع، نزدیک به حد بارگذاری انتخاب شود. به این منظور مشابه گام تصحیح روش پخش بار تداومی، ولتاژ یکی از شین‌های ضعیف سیستم به عنوان معلوم در نظر گرفته می‌شود و بر اساس آن، ضریب بارگذاری تعیین می‌گردد. با هر تقریب منحنی PV، ولتاژ در نقطه حداکثر آن به عنوان ولتاژ نقطه سقوط سیستم انتخاب می‌شود. با این ولتاژ، ضریب بارگذاری مربوطه تعیین شده و مجدداً تقریب منحنی PV انجام می‌شود. مراحل تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که فاصله دو حد بارگذاری متوالی پیش‌بینی شده کم‌تر از ۰/۰۰۰۵ باشند. شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی سه سیستم ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه IEEE موید کارایی این روش است. واژه‌های کلیدی: تقریب درجه دو، سقوط ولتاژ، حاشیه پایداری ولتاژ، پخش بار تداومی.

Quick and Accurate Computation of Voltage Stability Margin Using PV Curve Approximation

Farid Karbalaee¹, Shahriar Abasi², Hossein Saberi¹

1 - Faculty of Electrical and Computer Engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran

2 - Electrical Department, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Abstract: Voltage stability margin can be calculated by tracing PV curves using the Continuation Power Flow (CPF) method. This method needs many power flow solutions and consequently a large number of computation times. It is well known that the behavior of PV curves, especially near the critical point, is similar to a quadratic function. This is used in some papers to approximate PV curves and calculate maximum loading point by minimum number of power flow runs. This paper aims to complete previous works so that the computational efforts are reduced and the accuracy is maintained. To do this, a quadratic function with two constant coefficients, instead of three ones, is used. This makes the calculation of the quadratic function simpler because the determination of the second-order sensitivities is no longer needed. Also a method is proposed to select the initial operating point near the critical point. For this purpose, in the power flow equations, the voltage magnitude at one of the weak buses is assumed to be known and the loading Factor is unknown instead. This is also used to determine the next operating point, after every approximation of PV curves. The approximations continue until the difference between the calculated voltage stability margins in successive iterations becomes less than 0.0005. The simulations are performed on three IEEE test systems show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Quadratic approximation, Voltage collapse, Voltage stability margin, Continuation power flow.

تاریخ ارسال مقاله: ۲۳ / ۰۹ / ۹۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۰۴ / ۱۲ / ۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱/۱۷

نام نویسنده مسئول: فرید کربلایی

نشانی نویسنده مسئول: تهران - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین موضوعات در مطالعات بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سیستم قدرت، مشکل ناپایداری ولتاژ است زیرا ناپایداری ولتاژ یکی از علل اصلی خاموشی‌های سراسری هست [۱]. از این رو، ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم در شرایط بهره‌برداری عادی و هم‌چنین هنگام وقوع اغتشاش‌های مختلف، اهمیت زیادی دارد. یکی از معیارهای ارزیابی پایداری ولتاژ، تعیین حاشیه پایداری ولتاژ به صورت فاصله نقطه کار کنونی با نقطه حداکثر بارگذاری سیستم است [۲]. این فاصله با افزایش توان‌های اکتیو و راکتیو در شین‌های بار و هم‌چنین افزایش توان اکتیو در شین‌های مولد محاسبه می‌شود.

دسته‌ای از مقالات به جای محاسبه دقیق حاشیه پایداری ولتاژ، به ارائه شاخص‌هایی می‌پردازند که حاوی اطلاعات تقریبی از حاشیه پایداری ولتاژ هستند. تعدادی از این شاخص‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی می‌باشند و از اطلاعات سیستم استفاده نمی‌کنند [۳، ۴]. این شاخص‌ها از این حقیقت بهره می‌برند که در حد بارگذاری، با تغییر ولتاژ و جریان، تغییر چندان در توان ایجاد نمی‌شود. با توجه به این که از مدل سیستم استفاده نمی‌شود، امکان ارزیابی حاشیه پایداری ولتاژ به ازای وقوع اغتشاش‌های مختلف وجود ندارد. تعداد دیگری از این شاخص‌ها بر پایه مدل سیستم می‌باشند. شاخص‌های مبتنی بر مقدار ویژه و مقدار منفرد ماتریس ژاکوبین، از مهم‌ترین این شاخص‌ها هستند [۵، ۶]. تمامی این شاخص‌ها رفتاری غیرخطی دارند و امکان پیش‌بینی دقیق حاشیه پایداری ولتاژ به وسیله آن‌ها وجود ندارد.

در [۷]، حاشیه پایداری ولتاژ با تجزیه سیستم به مسیرهای مجزا که هر کدام دارای یک مولد و خط انتقال می‌باشند، محاسبه شده است. با این کار سعی شده که خطای معادل‌سازی تونن که در آن برای کل سیستم از یک مولد و خط انتقال استفاده می‌شود برطرف شود. اما خطای روش به روشنی بیان نشده است. به‌کارگیری شبکه‌های عصبی، روش دیگر تخمین حاشیه پایداری ولتاژ است [۸]. مشکل این روش این است که نیاز به داده‌های زیادی برای آموزش شبکه دارد، ضمن این که با هر تغییر سیستم قدرت، ممکن است نیاز به آموزش مجدد شبکه عصبی باشد.

محاسبه دقیق حاشیه پایداری ولتاژ با روش پخش‌بار تداومی امکان‌پذیر است. این روش که بر پایه تکرار پخش‌بار هست، در هر گام از دو قسمت پیش‌بینی و تصحیح تشکیل شده است. مشکل عمده روش پخش‌بار تداومی، نیاز به انجام محاسبات پخش‌بار مکرر تا رسیدن به دقت مطلوب می‌باشد. این موضوع موجب زمان‌بر شدن اعمال این روش به سیستم‌های بزرگ می‌گردد. از این رو، گام افزایش بار باید به گونه‌ای انتخاب گردد که حجم محاسبات کاهش یابد [۹]. در این مقاله، روش پخش‌بار تداومی نیز به منظور مقایسه با روش پیشنهادی، در سیستم‌های ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه IEEE شبیه‌سازی شده است.

در بسیاری از مقالات، روش پیشنهادی بر پایه روش پخش‌بار تداومی است. موضوع مورد بحث در این مقالات، تعیین اندازه گام افزایش بار در هر تکرار است. در [۱۰] از مقادیر حساسیت توان راکتیو تولیدی به تغییرات بار استفاده شده است. بر اساس این حساسیت، افزایش بار، برابر با حداقل مقدار لازم برای رسیدن اولین مولد به حد تولید توان راکتیو انتخاب می‌شود. در [۱۱] علاوه بر رسیدن به حد تولید توان راکتیو مولدها، خروج تجهیزات توسط سیستم‌های حفاظتی و هم‌چنین عمل تپ ترانسفورماتورها نیز در تعیین افزایش بار در نظر گرفته شده است. در [۱۲] نیز از دو حساسیت توان راکتیو تولیدی مولدها و ولتاژ شین‌های بار به تغییرات بار استفاده شده است. در افزایش بار، عدم عبور از یک ولتاژ حداقل نیز در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که در هر گام افزایش بار، سیستم به ناحیه ناپایداری برود، محاسبات با کاهش اندازه افزایش بار تکرار می‌شود. در [۱۳]، از معکوس حساسیت ولتاژ شین‌های بار به تغییرات بار به عنوان یک شاخص استفاده شده است. این شاخص در مرز پایداری ولتاژ به مقدار صفر می‌رسد. در این مرجع، رفتار این شاخص به صورت یک تابع درجه دو با دو ضریب ثابت تقریب زده می‌شود. این ثابت‌ها با انجام دو پخش بار به دست می‌آیند. با تعیین تابع درجه دو، مرز پایداری که همان حد بارگذاری می‌باشد، پیش‌بینی می‌گردد. مرز پیش‌بینی شده به عنوان نقطه تکرار بعدی در نظر گرفته می‌شود. مجدداً تابع درجه دو بر اساس دو نقطه کار انتهایی تعیین می‌گردد و مراحل تا رسیدن به مرز پایداری ولتاژ ادامه پیدا می‌کند. مرجع [۱۴] معکوس حساسیت توان راکتیو تولیدی مولدها به تغییرات ضریب بارگذاری را به کار می‌برد، که مقدار آن در حد بارگذاری برابر صفر می‌گردد. مشابه [۱۳] با فرض رفتار درجه دو برای این حساسیت، حد بارگذاری پیش‌بینی می‌شود. اگر مقدار پیش‌بینی شده حد بارگذاری، خارج از ناحیه بارگذاری سیستم باشد، با استفاده از یک روش مبتنی بر بهینه‌سازی، حداقل کاهش بار برای برگشتن به ناحیه بارگذاری تعیین می‌گردد. با وجود این که در [۱۴] نسبت به مراجع قبلی با تعداد تکرار کم‌تری حد بارگذاری تعیین می‌شود، اما شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در سیستم‌های مختلف حداقل نیاز به ۷ تکرار پخش‌بار می‌باشد. در [۱۵] منحنی PV با یک تابع درجه دو با سه ضریب ثابت تقریب زده شده است. ضرایب ثابت با انجام یک پخش بار و محاسبه مشتقات درجه اول و دوم متغیرها تعیین می‌شوند. ابتدا با انجام یک پخش بار، اولین تقریب منحنی PV و به تبع آن اولین پیش‌بینی نقطه حداکثر بارگذاری انجام می‌گردد. ضریب بارگذاری بعدی برابر با مقدار پیش‌بینی شده حد بارگذاری انتخاب می‌شود. مراحل تا آنجا ادامه پیدا می‌کند که فاصله دو مقدار تداومی پیش‌بینی شده از یک مقدار مطلوب کم‌تر گردد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر روی دو سیستم ۳۹ و ۳۰۰ شینه نشان می‌دهد که برای رسیدن به حد بارگذاری، ۵ تکرار پخش‌بار لازم است. البته اگر نقطه اولیه نزدیک به حد بارگذاری باشد، تعداد تکرارها کاهش می‌یابد.

PQ و افزایش توان اکتیو در شین‌های PV انجام می‌شود. افزایش توان به صورت رابطه (۱) اعمال می‌گردد.

$$P_i = \lambda P_{i0} \quad (\text{i هر کدام از شین‌های PQ و PV است.})$$

$$Q_i = \lambda Q_{i0} \quad (\text{i هر کدام از شین‌های PQ است.})$$

(۱)

در این رابطه P_{i0} و Q_{i0} مقادیر پایه توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی در شین i می‌باشند. λ نیز ضریب بارگذاری است که در بار پایه مقدار آن برابر ۱ است. حرکت به سمت حد بارگذاری با افزایش λ انجام می‌شود. حد بارگذاری برابر با حداکثر مقدار λ است که در آن روابط (۲) و (۳) که همان روابط توازن توان در معادلات پخش بار هستند، برقرار می‌باشند.

$$P_i = \lambda P_{i0} = \sum_{j=1}^N V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_i = \lambda Q_{i0} = \sum_{j=1}^N V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3)$$

با افزایش λ ، ولتاژ در شین‌های بار کاهش پیدا می‌کند. منحنی مقادیر ولتاژ در شین‌های مختلف بر حسب ضریب بارگذاری مشابه شکل (۱) است. این منحنی که منحنی PV نامیده می‌شود، در مطالعات پایداری ولتاژ بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد (البته در اینجا λ جایگزین توان شده است). در شکل (۱)، $\lambda=0$ بیانگر بی‌باری، و λ_c که ضریب بارگذاری بحرانی نام‌گذاری می‌شود، بیانگر حد بارگذاری است.

با توجه به این که افزایش λ در همه شین‌ها به صورت هم‌زمان اعمال می‌گردد، مقدار λ_c در تمامی شین‌ها یکسان است. بنابراین، با داشتن منحنی PV در یکی از شین‌ها، λ_c محاسبه می‌گردد. البته منحنی‌های PV در صورتی مشابه شکل (۱) هستند که تا آخرین نقطه رسم این منحنی، هیچ‌کدام از مولدها به حد تولید توان راکتیو خود نرسند که معمولاً در عمل این چنین نیست. شکل (۲) منحنی PV را در شین شماره ۳۰ از سیستم ۳۰ شینه IEEE نشان می‌دهد. جهش‌های مشاهده شده در این منحنی بیانگر لحظه رسیدن یک یا تعدادی از مولدها به حد تولید توان راکتیو می‌باشند. به سبب غیرخطی بودن روابط (۲) و (۳)، امکان محاسبه تحلیلی منحنی‌های PV وجود ندارد. اما بر اساس شکل منحنی PV، می‌توان آن را با یک تابع درجه دو تقریب زد. البته با توجه به جهش‌های ایجاد شده در این منحنی، ضرایب تابع درجه دو باید در طی رسیدن به حد بارگذاری تغییر کنند.

در این مقاله به تکمیل کار انجام شده در [۱۵] پرداخته شده است. در تابع درجه دو پیشنهادی، تنها دو ضریب ثابت وجود دارد. این موضوع با توجه به شکل منحنی PV و توجه به این که در ولتاژ صفر، توان تزریقی شین صفر است قابل توجیه است. بنابراین، برای محاسبه ثابت‌ها نیاز به مشتق درجه دو متغیرها نیست. در [۱۵] اشاره نشده است که اگر حد بارگذاری پیش‌بینی شده خارج از ناحیه بارگذاری باشد، چگونه نقطه کار بعدی تعیین می‌گردد. در این شرایط، ضریب بارگذاری پیش‌بینی شده منجر به واگرایی برنامه پخش بار می‌گردد. همچنین با توجه به این که حد بارگذاری در ابتدا مجهول است چگونه می‌توان نقطه اولیه را نزدیک به حد بارگذاری قرارداد تا تعداد تکرارها کاهش یابد. در روش پیشنهادی، به جای استفاده از ضریب بارگذاری پیش‌بینی شده، از ولتاژ پیش‌بینی شده در حد بارگذاری استفاده می‌شود. با این ولتاژ، نقطه کار بعدی تعیین می‌گردد. این کار مشابه گام تصحیح در پخش بار تداومی است. همین کار برای تعیین نقطه کار اولیه نیز انجام می‌شود. معمولاً ولتاژ نقطه سقوط در شین‌های ضعیف سیستم تا حدودی مشخص است. این ولتاژ وابسته به مقدار جبران‌سازی توان راکتیو سیستم می‌باشد [۱۶].

در شبیه‌سازی‌های این مقاله، ولتاژهای مختلفی در محدوده ۰/۵ تا ۰/۷ پیرونیت برای تعیین نقطه کار اولیه در نظر گرفته شده است. این ولتاژها، نقطه کار اولیه را در نزدیکی حد بارگذاری قرار می‌دهند، هر چند که تعدادی از این ولتاژها، نقطه کار اولیه را به پایین منحنی PV منتقل می‌کنند. شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی سه سیستم ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه IEEE به ازای ولتاژهای شروع مختلف و همچنین اغتشاش‌های گوناگون اعم از قطع یک خط، خروج یک ترانسفورماتور یا خروج یک مولد، نشان می‌دهد که در تمامی موارد، حد بارگذاری با دقت ۰/۰۰۵ تا ۲ با ۵ تکرار پخش بار محاسبه می‌شود.

۲- فرمول‌بندی مسئله

آنچه در کتب و مقالات متعدد پذیرفته شده این است که مرز پایداری ولتاژ منطبق بر نقطه دوشاخگی گره زین^۱ (SNB) می‌باشد. آخرین نقطه‌ای که با افزایش بار، معادلات سیستم دارای نقطه کار حالت ماندگار است، به عنوان نقطه SNB شناخته می‌شود. اگر بارها دارای مشخصه حالت ماندگار توان ثابت باشند، نقطه SNB در حد بارگذاری سیستم اتفاق می‌افتد. به همین دلیل است که در اکثر مقالات، حاشیه پایداری ولتاژ به صورت فاصله نقطه کار کنونی تا حد بارگذاری سیستم تعریف می‌شود. اگر مشخصه حالت ماندگار بارها به صورت وابسته به ولتاژ باشد، نقطه SNB به بعد از حد بارگذاری منتقل می‌گردد. با تقریب منحنی PV که در این مقاله انجام می‌شود، نقطه SNB با هر نوع مشخصه بار به راحتی محاسبه می‌گردد زیرا نقطه SNB، در واقع نقطه تماس منحنی PV با مشخصه بار است. در ادامه مقاله فرض می‌شود که مانند [۱۴، ۱۵]، بارها دارای مشخصه توان ثابت هستند. محاسبه حد بارگذاری با افزایش توان‌های اکتیو و راکتیو در شین‌های

برای محاسبه $\frac{dV_i}{d\lambda}$ ، فرض می‌شود که روابط (۲) و (۳) به فرم فشرده زیر باشند:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (۶)$$

که برداری است که شامل اندازه ولتاژ در شین‌های PQ و زاویه ولتاژ در تمام شین‌ها بجز شین شناور است. با مشتق‌گیری از دو طرف رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Delta \lambda = 0 \quad (۷)$$

همان ماتریس ژاکوبین روابط پخش بار است. $\frac{\partial f}{\partial x}$ نیز برداری است که از مقادیر پایه توان‌های اکتیو و راکتیو تشکیل شده است. اکنون Δx بر حسب $\Delta \lambda$ محاسبه می‌شود:

$$\Delta x = - \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial f}{\partial \lambda} \right) \Delta \lambda = -H \Delta \lambda \quad (۸)$$

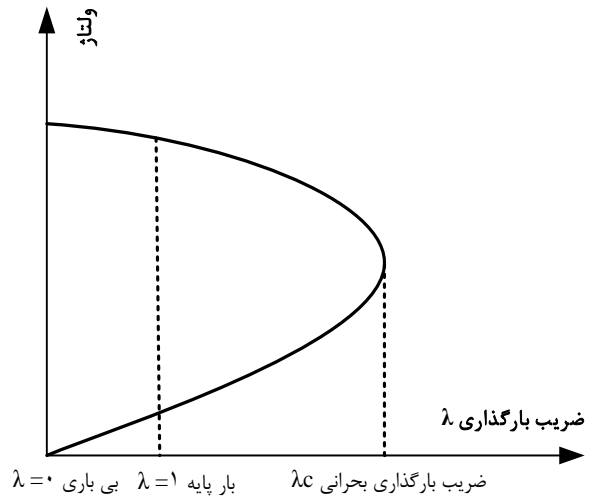
که عناصر بردار H ، شامل حساسیت متغیرها نسبت به تغییرات λ از جمله مشتقات $\frac{dV_i}{d\lambda}$ می‌شود. با انجام اولین پخش بار و محاسبه ضرایب a و b ، ضرایب بارگذاری بحرانی و همچنین ولتاژ نقطه سقوط (ولتاژ در ضریب بارگذاری بحرانی) با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) پیش‌بینی می‌گردند:

$$\frac{d\lambda}{dV} = 2aV_c^p + b = 0 \quad (۹)$$

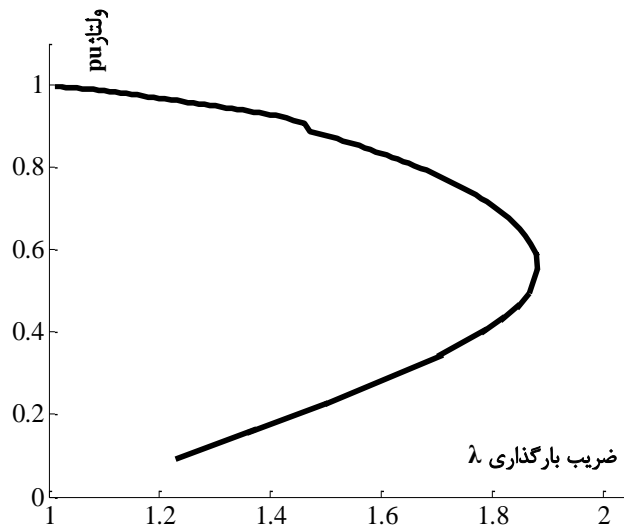
$$\lambda_c^p = a(V_c^p)^2 + bV_c^p \quad (۱۰)$$

که λ_c^p و V_c^p به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده ضریب بارگذاری بحرانی و ولتاژ نقطه سقوط هستند. از این مقادیر برای محاسبه نقطه کار بعدی استفاده می‌شود. به این منظور به جای قرار دادن λ برابر با λ_c^p ، ولتاژ شین تحت بررسی برابر با V_c^p قرار داده می‌شود و مقدار λ با حل روابط پخش بار محاسبه می‌گردد. زیرا λ_c^p موجب واگرایی پخش بار می‌شود. با محاسبه نقطه کار بعدی، مجدداً ضرایب a و b محاسبه می‌گردند و مراحل تا زمانی که فاصله دو λ_c^p متوالی از یک مقدار مطلوب کم‌تر شود، ادامه پیدا می‌کند. محاسبات بر روی هر یک از شین‌های بار می‌تواند انجام شود، اما شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که اگر یکی از شین‌های ضعیف سیستم انتخاب گردد، λ_c با تعداد تکرار کم‌تری به دست می‌آید. شین‌های ضعیف را می‌توان از مقدار ولتاژ شین‌ها در بار پایه تعیین کرد.

برای داشتن تعداد تکرار کم‌تر، نقطه کار اولیه باید به حد بارگذاری نزدیک باشد. از آنجایی که در ابتدا مقدار λ_c مشخص نیست نمی‌توان با انتخاب یک مقدار λ ، نقطه کار را نزدیک حد بارگذاری قرارداد. به این منظور، باید در ابتدا یک مقدار ولتاژ را برای شین مورد بررسی در



شکل (۱): منحنی PV



شکل (۲): منحنی PV در شین ۳۰ از سیستم ۳۰ شینه IEEE

۳- روش پیشنهادی

در این مقاله، منحنی PV در شین i با استفاده از (۴) تقریب زده می‌شود.

$$\lambda = aV_i^2 + bV_i \quad (۴)$$

در این رابطه، دو ثابت وجود دارد که در هر نقطه کار با انجام یک پخش بار تعیین می‌شوند. به این منظور باید دو نقطه (λ, V_i) و (V_i) ، از روابط پخش بار محاسبه گردند. پس از قرار دادن این دو نقطه در (۴) و (۵) و حل این دو معادله، ضرایب a و b تعیین می‌شوند.

$$\frac{dV_i}{d\lambda} = \frac{1}{2aV_i + b} \quad (۵)$$

۱ تا ۳، مراحل رسیدن به حد بارگذاری در سیستم ۱۴ شینه نشان داده شده است. این جداول برای حالت بدون اغتشاش و با سه ولتاژ شروع مختلف می‌باشند. این محاسبات بر روی شین شماره ۱۴ انجام شده است. محاسبات انجام شده بر روی شین‌های ۵ و ۱۲ نیز نتایج مشابهی دارد. مشاهده می‌گردد که حد بارگذاری با دقت ۰/۰۰۰۵ با حداکثر ۴ تکرار به دست می‌آید.

در جداول ۴ تا ۹ نیز نتایج محاسبه بر روی دو سیستم ۳۰ و ۵۷ شینه آورده شده است. محاسبات برای سیستم ۳۰ شینه بر روی شین ۳۰ و برای سیستم ۵۷ شینه بر روی شین ۳۱ انجام شده است. محاسبات انجام شده بر روی شین‌های ۱۹ و ۲۶ در سیستم ۳۰ شینه و بر روی شین‌های ۲۵ و ۴۲ در سیستم ۵۷ شینه، نتایج کاملاً مشابهی دارد.

جدول (۱): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۱۴ شینه با ولتاژ شروع ۰/۷ pu

گام	۱	۲	۳	۴
λ_C^P	۱/۷۴۹۷	۱/۷۴۸۷	۱/۷۴۸۸	۱/۷۴۸۸

جدول (۲): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۱۴ شینه با ولتاژ شروع ۰/۱۶ pu

گام	۱	۲	۳	۴
λ_C^P	۱/۷۴۸۸	۱/۷۴۸۸	-	-

جدول (۳): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۱۴ شینه با ولتاژ شروع ۰/۵ pu

گام	۱	۲	۳	۴
λ_C^P	۱/۷۴۶۹	۱/۷۴۸۳	۱/۷۴۸۸	۱/۷۴۸۸

جدول (۴): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۳۰ شینه با ولتاژ شروع ۰/۷ pu

گام	۱	۲	۳	۴	۵
λ_C^P	۱/۸۷۶۷	۱/۸۸۳۴	۱/۸۸۵۱	۱/۸۸۵۷	۱/۸۸۵۷

جدول (۵): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۳۰ شینه با ولتاژ شروع ۰/۱۶ pu

گام	۱	۲	۳	۴
λ_C^P	۱/۸۸۲۲	۱/۸۸۴۹	۱/۸۸۵۷	۱/۸۸۵۷

جدول (۶): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۳۰ شینه با ولتاژ شروع ۰/۵ pu

گام	۱	۲	۳	۴	۵
λ_C^P	۱/۸۷۹۳	۱/۸۸۲۲	۱/۸۸۵۲	۱/۸۸۵۷	۱/۸۸۵۷

نظر گرفت. این ولتاژ باید تا حد امکان به ولتاژ نقطه سقوط نزدیک باشد. ولتاژ نقطه سقوط به طور دقیق مشخص نیست اما محدوده آن تا حد زیادی قابل پیش‌بینی است. مقدار این ولتاژ بستگی به مقدار جبران‌سازی توان راکتیو سیستم دارد. در سیستم‌هایی که جبران‌سازی زیادی ندارند، این ولتاژ در شین‌های ضعیف بین ۰/۵ تا ۰/۷ پریونیت است. با افزایش جبران‌سازی توان راکتیو، ولتاژ نقطه سقوط افزایش می‌یابد و حتی ممکن است به حدود ۰/۹ پریونیت نیز برسد [۱۶]. به نظر می‌رسد انتخاب ولتاژ ۰/۷ پریونیت مقدار مناسبی باشد، البته ممکن است با نظر بهره‌برداران یک سیستم، مقدار دیگری انتخاب شود. اگر ولتاژ انتخاب شده کم‌تر از ولتاژ سقوط باشد، نقطه کار اولیه پایین‌تر منحنی PV قرار می‌گیرد. این موضوع تعداد تکرارها را افزایش نمی‌دهد. در این مقاله، شبیه‌سازی‌ها با سه ولتاژ ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ پریونیت انجام می‌شود، تا عملکرد روش پیشنهادی در حالت‌هایی که نقطه کار اولیه پایین‌تر منحنی PV باشد، نیز بررسی گردد. به طور خلاصه، مراحل روش پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

الف: بر اساس میزان جبران‌سازی توان راکتیو سیستم و هم‌چنین تجربه بهره‌برداران، ولتاژی برای شین مورد نظر انتخاب شود (مثلاً ۰/۷ پریونیت).

ب: با ولتاژ انتخاب شده، مقدار λ و هم‌چنین مقدار $\frac{dV}{d\lambda}$ را با حل روابط پخش بار و به‌کارگیری رابطه (۸) به دست می‌آید. این کار مشابه گام تصحیح در روش پخش بار تداومی است. به عبارتی در روابط پخش بار، مقدار λ معلوم، و در عوض اندازه یکی از ولتاژها مجهول در نظر گرفته می‌شود. با جایگزینی متغیرهای به دست آمده در رابطه (۸)، مقدار $\frac{dV}{d\lambda}$ به دست می‌آید.

ج: با استفاده از روابط (۴) و (۵)، ضرایب a و b محاسبه می‌شوند. **د:** با به‌کارگیری روابط (۹) و (۱۰)، V_C^P و λ_C^P تعیین می‌شوند. اگر مقدار λ_C^P اولین حدس از λ نیست، به قسمت «ه» ارجاع می‌شود. در غیر این صورت به قسمت «و» ارجاع می‌شود.

ه: فاصله دو مقدار تداومی λ_C^P محاسبه می‌شود. اگر این فاصله کم‌تر از ۰/۰۰۰۵ باشد، مقدار λ به دست آمده است، در غیر این صورت به قسمت «و» ارجاع می‌شود.

و: با قرار دادن ولتاژ شین برابر با V_C^P ، مقدار λ و $\frac{dV}{d\lambda}$ مشابه قسمت «ب» به دست می‌آید. سپس به قسمت «ج» ارجاع می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

۴-۱- شبیه‌سازی روش پیشنهادی

در این مقاله شبیه‌سازی بر روی سه سیستم ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه IEEE انجام شده است. در شرایط بدون اغتشاش، حد بارگذاری این سه سیستم که با روش پخش بار تداومی به دست آمده است، به ترتیب برابر ۱/۷۴۸۸، ۱/۸۸۵۷ و ۱/۷۰۱۸ می‌باشند. ابتدا نتایج اعمال روش پیشنهادی در حالت بدون اغتشاش ارائه می‌گردد. برای نقطه کار اولیه، از سه ولتاژ ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۷ پریونیت استفاده شده است. در جدول‌های

جدول (۱۱): نتایج اعمال ۳۹ اغتشاش بر روی سیستم ۳۰ شینه

ولتاژ اولیه (pu)	تعداد تکرار			
	۲	۳	۴	۵
۰/۷	۴ (۱)	۱۰ (۱)	۱۲ (۱)	۱۳ (۰)
۰/۶	۹ (۱)	۱۳ (۲)	۱۶ (۴)	۱ (۰)
۰/۵	۹ (۹)	۱۰ (۱۰)	۱۷ (۱۷)	۳ (۳)

جدول (۱۲): نتایج اعمال ۷۸ اغتشاش بر روی سیستم ۵۷ شینه

ولتاژ اولیه (pu)	تعداد تکرار			
	۲	۳	۴	۵
۰/۷	۵ (۰)	۲۰ (۰)	۲۳ (۰)	۳۰ (۰)
۰/۶	۲۳ (۱)	۲۵ (۲)	۳۰ (۰)	۰ (۰)
۰/۵	۲۲ (۷)	۴۲ (۶)	۱۴ (۱۴)	۰ (۰)

۴-۲- شبیه‌سازی روش پخش بار تداومی

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، با انتخاب مناسب گام افزایش بار، تعداد تکرار پخش بار و حجم محاسبات کاهش می‌یابد. در ابتدا باید گام افزایش بار بزرگ انتخاب گردد و با نزدیک شدن به مرز پایداری ولتاژ، از اندازه گام کاسته می‌شود.

بدین منظور مشابه [۹]، از اطلاعات بردار مماس^۲ به منظور تعیین گام افزایش بار در هر تکرار استفاده شده است. با اعمال روش پخش بار تداومی، مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم‌های ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه IEEE در حالت بدون اغتشاش، به صورت جدول‌های ۱۳ تا ۱۵ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، حدود بارگذاری محاسبه‌شده برابر با حدود محاسبه‌شده با روش پیشنهادی است. در روش پخش بار تداومی، پس از ۱۷، ۱۵ و ۲۰ تکرار، حد بارگذاری در سیستم‌های ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه به دست می‌آید که به مراتب بیش‌تر از تعداد تکرارها در روش پیشنهادی است.

اکنون روش پخش بار تداومی در شرایط وقوع اغتشاش مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعداد اغتشاش‌ها در سیستم‌های ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه، به ترتیب ۲۱، ۳۹ و ۷۸ است. با به‌کارگیری این روش، نتایج به دست آمده به صورت جدول‌های ۱۶ تا ۱۸ است.

این جدول‌ها نشان می‌دهند که، در اکثر اغتشاش‌ها با بیش از ۱۰ تکرار، حد بارگذاری محاسبه شده است، و در تعداد کمی از اغتشاش‌ها تعداد تکرارها کم‌تر از ۵ است. بنابراین، در محاسبه حد بارگذاری، تعداد تکرارهای مورد نیاز در روش پخش بار تداومی تقریباً سه برابر تعداد تکرارها در روش پیشنهادی شده در این مقاله است. با افزایش ابعاد سیستم‌های قدرت، حجم محاسبات در روش پخش بار تداومی به مراتب بزرگ‌تر از روش پیشنهادی می‌گردد.

جدول (۷): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۵۷ شینه با ولتاژ

شروع $0.17 pu$

گام	۱	۲	۳	۴	۵	۶
λ_C^p	۱/۶۸۰۹	۱/۶۹۸۳	۱/۷۰۰۶	۱/۷۰۱۴	۱/۷۰۱۸	۱/۷۰۱۸

جدول (۸): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۵۷ شینه با ولتاژ

شروع $0.16 pu$

گام	۱	۲	۳	۴	۵
λ_C^p	۱/۶۹۶۰	۱/۶۹۹۹	۱/۷۰۱۳	۱/۷۰۱۸	۱/۷۰۱۸

جدول (۹): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۵۷ شینه با ولتاژ

شروع $0.15 pu$

گام	۱	۲	۳	۴
λ_C^p	۱/۷۰۱۱	۱/۷۰۱۶	۱/۷۰۱۸	۱/۷۰۱۸

اکنون روش پیشنهادی در شرایط وقوع اغتشاش مورد بررسی قرار می‌گیرد. اغتشاش‌های اعمالی، قطع یک خط، خروج یک ترانسفورماتور یا خروج یک مولد می‌باشند. برای سه سیستم ۱۴، ۳۰ و ۵۷ شینه، به ترتیب ۲۱، ۳۹ و ۷۸ اغتشاش اعمال شده است. نتایج محاسبات به صورت جدول‌های ۱۰ تا ۱۲ می‌باشند. در اینجا نیز محاسبات به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اولیه انجام شده است و مقدار خطا نسبت به حد بارگذاری واقعی به دست آمده از روش پخش بار تداومی، 0.005 است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تعدادی از اغتشاش‌ها، حد بارگذاری تنها با ۲ تکرار به دست می‌آید. عدد داخل پرانتز بیانگر وضعیت‌هایی است که نقطه کار اولیه در پایین منحنی PV قرار می‌گیرد. به عنوان مثال در سیستم ۱۴ شینه با ولتاژ اولیه 0.16 پریونیت، حد بارگذاری در ۱۶ اغتشاش با ۲ تکرار به دست می‌آید که از این تعداد اغتشاش، نقطه کار اولیه در ۱۱ اغتشاش در پایین منحنی PV قرار می‌گیرد.

جدول (۱۰): نتایج اعمال ۲۱ اغتشاش بر روی سیستم ۱۴ شینه

ولتاژ اولیه (pu)	تعداد تکرار		
	۲	۳	۴
۰/۷	۱۲ (۰)	۷ (۰)	۲ (۲)
۰/۶	۱۶ (۱۱)	۳ (۳)	۲ (۲)
۰/۵	۴ (۴)	۱۲ (۱۲)	۵ (۵)

جدول (۱۳): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۱۴ شینه با روش

پخش بار تداومی					
گام	۱	۲	۳	۴	۵
λ_C^P	۱/۱۵۱۲	۱/۳۵۱۲	۱/۵۵۱۲	۱/۶۶۱۲	۱/۶۸۱۲
گام	۶	۷	۸	۹	۱۰
λ_C^P	۱/۷۰۱۲	۱/۷۲۱۲	۱/۷۴۱۰	۱/۷۴۳۲	۱/۷۴۷۲
گام	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
λ_C^P	۱/۷۴۸۳	۱/۷۴۸۴	۱/۷۴۸۵	۱/۷۴۸۶	۱/۷۴۸۷
گام	۱۶	۱۷			
λ_C^P	۱/۷۴۸۸	۱/۷۴۸۸			

جدول (۱۴): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۳۰ شینه با روش

پخش بار تداومی					
گام	۱	۲	۳	۴	۵
λ_C^P	۱/۲۸۳۸	۱/۳۸۳۸	۱/۴۸۳۸	۱/۵۸۳۸	۱/۶۸۳۸
گام	۶	۷	۸	۹	۱۰
λ_C^P	۱/۷۸۴۸	۱/۸۵۰۰	۱/۸۵۴۰	۱/۸۶۰۱	۱/۸۷۱۰
گام	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
λ_C^P	۱/۸۸۱۱	۱/۸۸۴۴	۱/۸۸۵۳	۱/۸۸۵۷	۱/۸۸۵۷

جدول (۱۵): مراحل محاسبه حد بارگذاری سیستم ۵۷ شینه با روش

پخش بار تداومی					
گام	۱	۲	۳	۴	۵
λ_C^P	۱/۲۹۶۰	۱/۳۹۶۰	۱/۴۹۶۰	۱/۵۹۶۰	۱/۶۹۶۰
گام	۶	۷	۸	۹	۱۰
λ_C^P	۱/۶۹۷۰	۱/۶۹۸۰	۱/۶۹۹۰	۱/۷۰۰۰	۱/۷۰۱۰
گام	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
λ_C^P	۱/۷۰۱۱	۱/۷۰۱۳	۱/۷۰۱۵	۱/۷۰۱۸	۱/۷۰۱۸
گام	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
λ_C^P					

جدول (۱۶): نتایج اعمال ۲۱ اغتشاش بر روی سیستم ۱۴ شینه و

به کارگیری روش پخش بار تداومی		
تعداد تکرار ≤ 5	تعداد تکرار ≤ 10	تعداد تکرار < 10
۲	۶	۱۳

جدول (۱۷): نتایج اعمال ۳۹ اغتشاش بر روی سیستم ۳۰ شینه و

به کارگیری روش پخش بار تداومی		
تعداد تکرار ≤ 5	تعداد تکرار ≤ 10	تعداد تکرار < 10
۳	۱۱	۲۵

جدول (۱۸): نتایج اعمال ۷۸ اغتشاش بر روی سیستم ۵۷ شینه و

به کارگیری روش پخش بار تداومی		
تعداد تکرار ≤ 5	تعداد تکرار ≤ 10	تعداد تکرار < 10
۵	۲۳	۵۰

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، حاشیه پایداری ولتاژ با تقریب منحنی‌های PV با یک تابع درجه دو به دست می‌آید. ضرایب این تابع درجه دو، با انجام یک پخش بار محاسبه می‌گردند. به این منظور، علاوه بر مقادیر ولتاژ و توان در هر نقطه کار، مقادیر مشتق ولتاژها نسبت به ضریب بارگذاری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مشتق به راحتی از عناصر ماتریس ژاکوبین محاسبه می‌گردد. تقریب منحنی‌های PV تا رسیدن به حد بارگذاری تکرار می‌شود. معیار رسیدن به حد بارگذاری آن است که فاصله بین دو حد بارگذاری محاسبه شده متوالی، کم‌تر از 0.005 باشد. بنابراین حداقل به دو تکرار نیاز هست. شبیه‌سازی‌های انجام شده در سه سیستم IEEE نشان می‌دهد که در تعدادی از حالت‌ها، محاسبه حد بارگذاری با تنها ۲ تکرار انجام می‌شود. حداکثر تعداد تکرارهای مورد نیاز نیز ۵ تکرار هست. این در حالی است که در روش پخش بار تداومی، تعداد تکرارها تقریباً سه برابر روش پیشنهادی است. روش ارائه شده، امکان محاسبه سریع و دقیق حاشیه پایداری ولتاژ را به هنگام وقوع اغتشاش‌های مختلف فراهم می‌کند. این موضوع از نیازهای اصلی بهره‌برداران سیستم قدرت است.

مراجع

- [1] J. F. Zhang, C. T. Tse, W. Wang and C. Y. Chung, "Voltage stability analysis based on probabilistic power flow and maximum entropy," IET Generation, Transmission, Distribution, Vol. 4, No. 4, pp. 530-537, 2009.
- [2] G. Verbic and F. Gubina, "Fast voltage-collapse line-protection algorithm based on local phasors," Generation, Transmission, Distribution, Vol. 150, No. 4, pp. 482-486, July 2003.
- [3] I. Smon, M. Pantos and F. Gubina, "An improved voltage-collapse protection algorithm based on local phasors," Int. J. Electric Power Systems Research, Vol. 78, pp. 434-440, 2008.
- [4] M. Parniani and M. Vanouni, "A fast local index for online estimation of closeness to loadability limit," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 584-585, Feb. 2010.
- [5] A. Berizzi, P. Finazzi, D. Dosi, P. Marannino and S. Corsi, "First and second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement," IEEE

- Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 543-551, May 1998.
- [6] B. Gao, G. K. Morison and P. Kundur, "Voltage stability evaluation using modal analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 1529-1541, Nov. 1992.
- [7] Y. Wang, I. R. Pordanjani, W. Li, W. Xu, T. Chen, E. Vaahedi and J. Gurney, "Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 2154-2163, Nov. 2011.
- [8] H. Razmi, M. Teshnehlab and H. A. Shayanfar, "Neural network based on a genetic algorithm for power system loading margin estimation," IEE Generation, Transmission, Distribution, Vol. 6, No. 11, pp. 1153-1163, 2012.
- [9] V. Ajjarapu and C. Christy, "The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 416-423, 1992.
- [10] N. Flatabo, R. Ognedal and T. Carlson, "Voltage stability condition in a power transmission system calculated by sensitivity methods," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 1286-1293, Nov. 1990.
- [11] N. Flatabo, O. B. Fosso, R. Ognedal, T. Carlson and K. R. Heggland, "A method for calculation of margins to voltage instability applied on the Norwegian system for maintaining required security level," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 920-928, Aug. 1993.
- [12] C. Lemaltre, J. P. Paul, J. M. Tesseron, Y. Harmand and Y. S. Zhao, "An indicator of the risk of voltage profile instability for real-time control applications," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 154-161, Feb. 1990.
- [13] A. C. Z. de Souza, C. A. Canizares and V. H. Quintana, "New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 3, pp. 1380-1387, Aug. 1997.
- [14] L. A. Li. Zarate and C. A. Castro, "Fast computation of security margins to voltage collapse based on sensitivity analysis," IEE Generation, Transmission, Distribution, Vol. 153, No. 1, pp. 35-43, Jan. 2006.
- [15] A. Pama and G. Radman, "A new approach for estimating voltage collapse point based on quadratic approximation of PV-curves," Int. J. Electric Power Systems Research, Vol. 79, pp. 653-659, April 2009.
- [16] T. V. Cutsem and C. Vournas, *Voltage stability of electric power systems*, Boston, MA:Kluwer, 1998.

زیر نویس ها

¹ Saddle Node Bifurcation

² Tangent Vector