

## انتخاب اغتشاش‌های بحرانی در برنامه‌ریزی توان راکتیو با قید پایداری ولتاژ

فرید کربلایی<sup>۱</sup>، استادیار، شهریار عباسی<sup>۲</sup>، دانشجوی دکتری، علی بزرگ امید<sup>۳</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران - f\_karbalaei@srttu.edu

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

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران - bozorgomid@yahoo.com

**چکیده:** یکی از مهم‌ترین اهداف برنامه‌ریزی توان راکتیو، انتخاب بهینه اندازه و مکان منابع توان راکتیو به منظور حفظ حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب می‌باشد. حاشیه پایداری ولتاژ در دو حالت نرمال و تک اغتشاش مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای رسیدن به این هدف، باید یک مسئله بهینه‌سازی که در آن همه اغتشاش‌های مورد نظر لحاظ شده باشد، طراحی شود. در محاسبه منابع توان راکتیو، باید همه اغتشاش‌ها در نظر گرفته شوند، به گونه‌ای که در صورت وقوع هر یک از آن‌ها، حاشیه پایداری مطلوب حفظ گردد. اما در نظر گرفتن همه اغتشاش‌ها، حل مسئله بهینه‌سازی را مشکل و در بعضی مواقع غیرممکن می‌کند. در این مقاله با به‌کارگیری دو شاخص پایداری ولتاژ، از بین اغتشاش‌های مورد نظر، تعداد معدودی انتخاب می‌شود به نحوی که منابع توان راکتیو محاسبه شده، برای همه اغتشاش‌ها، حاشیه پایداری مطلوب را تامین کند. به این منظور، اغتشاش‌ها بر اساس محل تأثیرگذاری آن‌ها در سیستم قدرت به چند دسته تقسیم می‌شوند. به گونه‌ای که اغتشاش‌های هر دسته بر محل مشترکی اثر می‌گذارند. سپس از هر دسته، شدیدترین اغتشاش انتخاب می‌شود. روش پیشنهادی بر روی یک شبکه ۵۷ شینه IEEE مورد شبیه‌سازی قرار گرفته که نتایج مطلوبی را به همراه داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** حاشیه پایداری ولتاژ، مکان‌یابی منابع توان راکتیو، مسئله بهینه‌سازی، شاخص L.

## Selection of Critical Contingencies in Voltage Stability Constrained Reactive Power Planning (RPP)

F. Karbalaei<sup>1</sup>, S. Abasi<sup>2</sup>, A. Bozorgomid<sup>3</sup>

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

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

**Abstract:** One of the most important objectives in Reactive Power Planning (RPP) is to select optimal location and size of var sources for maintaining the required voltage stability margin under normal and single-contingency cases. To meet this objective, an optimization problem must be formulated considering N-1 contingencies constrained for a set of predetermined contingencies. In optimization problem, all the contingencies must simultaneously be considered. This may cause the convergence of solution in a large power system to make impossible. This paper uses two voltage stability indices to select a small number of contingencies instead of all ones in optimization problem, so that the allocated var sources cover all of the contingencies. The contingencies divided into some groups, each group affects one part of power system. Then the worst contingency from each group is selected. The method is tested on IEEE 57-bus test system and the results are compared with the ones when all the contingencies are included in the optimization problem.

**Keywords:** Voltage Stability Margin (SM), Optimal allocation of Var sources, Optimization Problem, L-index.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۲/۰۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول: فرید کربلایی

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

## ۱- مقدمه

تعیین منابع جدید استفاده شده است. اثر منابع تعیین‌شده با شبیه‌سازی‌های غیرخطی بررسی می‌گردد.

یکی از دلایل وجود بار محاسباتی سنگین در مسئله برنامه‌ریزی توان راکتیو با قید پایداری ولتاژ، این است که نیاز به تعریف دو دسته متغیر و قید می‌باشد. این متغیرها و قیود مربوط به حالت‌های پایه و مرزی پایداری ولتاژ هستند [۱۱]. در مرجع [۴]، به منظور حل این مشکل، مکان هندسی نقطه سقوط ولتاژ برحسب منابع توان راکتیو جدید با یک تابع درجه ۲ تقریب زده شده است. با این کار، متغیرها و قیود مربوط به مرز پایداری ولتاژ از مسئله بهینه‌سازی حذف می‌شوند. با این روش، شین‌های معدودی را می‌توان برای نصب منابع توان راکتیو در نظر گرفت. در این مقاله، جایابی منابع توان راکتیو جدید، تنها برای شرایط بدون اغتشاش انجام می‌شود. در مرجع [۱۱] نیز از یک تقریب خطی برای تخمین اثر منابع توان راکتیو استفاده شده است. در این مرجع، یک روش دسته‌بندی فازی برای انتخاب شین‌های کاندید به کار رفته است.

در حالت‌هایی که برنامه‌ریزی توان راکتیو با هدف حفظ حاشیه پایداری ولتاژ هنگام وقوع مجموعه‌ای از اغتشاش‌های محتمل انجام می‌شود، در نظر گرفتن شدیدترین اغتشاش به تنهایی کافی نیست. زیرا با این کار، اغتشاش‌هایی که بخش‌های متفاوتی از سیستم قدرت را تحت تاثیر قرار می‌دهند، پوشش داده نمی‌شوند. از طرف دیگر، در نظر گرفتن همه اغتشاش‌ها، ممکن است همگرایی محاسبات را با مشکلات جدی روبرو کند. در این مقاله، به جای در نظر گرفتن همه اغتشاش‌ها، تعداد معدودی از آن‌ها با به‌کارگیری دو شاخص پایداری ولتاژ انتخاب می‌شوند، به گونه‌ای که منابع توان راکتیو محاسبه شده، همه اغتشاش‌ها را پوشش دهند. اغتشاش‌ها بر اساس ناحیه‌ای که تحت تاثیر قرار می‌دهند، به چند دسته تقسیم می‌شوند. سپس از هر دسته، شدیدترین اغتشاش انتخاب می‌گردد.

## ۲- شاخص‌های پایداری ولتاژ

بر اساس آنچه که در مقالات مختلف نشان داده شده است، نقطه سقوط ولتاژ (مرز پایداری ولتاژ) همان نقطه دوشاخگی گره زین (SNB)<sup>۲</sup> است [۱۲]. در این نقطه، حداقل مقادیر ویژه و منفرد ماتریس ژاکوبین پخش بار برابر صفر می‌شوند یعنی ماتریس ژاکوبین منفرد<sup>۳</sup> می‌شود. از این رو پیشنهاد شده است که این مقادیر به‌عنوان شاخص‌هایی جهت تشخیص نزدیکی به نقطه سقوط ولتاژ مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، بردارهای ویژه چپ و راست مربوط به حداقل مقدار ویژه، برای شناسایی شین‌های ضعیف و همچنین ضرایب مشارکت مولدها و خطوط انتقال به کار برده می‌شوند [۱۴].

مشکل اصلی در به کار بردن حداقل مقادیر ویژه و منفرد این است که این مقادیر رفتاری کاملاً غیرخطی دارند و نمی‌توانند نقطه سقوط ولتاژ را پیش‌بینی کنند. علاوه بر مقادیر ویژه و منفرد، شاخص‌های دیگری نیز بر اساس ماتریس ژاکوبین پیشنهاد شده است که رفتار

کلید برنامه‌ریزی توان راکتیو، انتخاب بهینه مقدار و مکان منابع توان راکتیو جدید به‌منظور برآورده کردن اهداف گوناگونی هست [۱]. یکی از مهم‌ترین اهداف، افزایش حاشیه پایداری ولتاژ با به‌کارگیری حداقل مقدار منابع توان راکتیو جدید است. تعدادی از مقالات که در این زمینه ارائه شده‌اند تنها به افزایش حاشیه پایداری ولتاژ در حالت بدون اغتشاش می‌پردازند [۵-۲]، اما در تعدادی دیگر، هر دو حالت با و بدون اغتشاش مد نظر قرار می‌گیرد [۱۱-۶]. در [۷] و [۸]، تنها شدیدترین اغتشاش در محاسبات لحاظ می‌شود اما در [۶] و [۹-۱۱]، همه اغتشاش‌های محتمل مورد بررسی قرار می‌گیرند. در مراجع [۲] و [۶]، حفظ اندازه ولتاژ شین‌های بار در یک محدوده مجاز، به‌عنوان یک قید وارد مسئله بهینه‌سازی می‌شود و افزایش حاشیه پایداری ولتاژ به‌طور صریح مد نظر قرار نمی‌گیرد. در [۲]، از حساسیت اندازه ولتاژ در شین‌های بار به اندازه بار سیستم برای شناسایی شین‌های ضعیف استفاده می‌شود. این شین‌ها برای نصب منابع توان راکتیو انتخاب می‌شوند. در [۶]، برنامه‌ریزی توان راکتیو به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی خطی فرمول‌بندی می‌گردد. به این منظور، حساسیت اندازه ولتاژ در شین‌های بار و همچنین حساسیت توان راکتیو تولیدی در مولدها به توان راکتیو تزریقی در شین‌های منتخب مورد استفاده قرار می‌گیرند. در [۳]، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است که افزایش حاشیه پایداری ولتاژ یکی از اهداف آن می‌باشد. هدف دیگر، حداقل کردن هزینه منابع توان راکتیو جدید است. برای حل مسئله بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی دسته ذرات<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. در [۷] و [۸]، حاشیه پایداری ولتاژ به‌عنوان یک قید در مسئله بهینه‌سازی وارد شده است. در این مراجع، ابتدا مقدار و مکان بهینه منابع توان راکتیو جدید برای شدیدترین اغتشاش محاسبه می‌شود. سپس با منابع محاسبه شده، وضعیت سیستم به هنگام وقوع سایر اغتشاش‌ها بررسی می‌گردد. در این مراجع تاکید شده است که تنها در نظر گرفتن شدیدترین اغتشاش، ممکن است در بسیاری از سیستم‌ها مناسب نباشد.

در مرجع [۹] نیز یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی شده است که پایداری ولتاژ یکی از اهداف آن می‌باشد. اهداف دیگر عبارت هستند از: بهبود پروفیل ولتاژ و حداقل کردن تلفات توان راکتیو و هزینه منابع راکتیو. در این مرجع، از منابع استاتیک توان راکتیو (مانند خازن‌های قابل قطع و وصل) برای شرایط بدون اغتشاش و از منابع دینامیک (مانند SVC) برای شرایط دارای اغتشاش استفاده شده است.

در مرجع [۱۰]، علاوه بر ناپایداری ولتاژ حالت ماندگار، وضعیت گذرای ولتاژ نیز در مسئله برنامه‌ریزی توان راکتیو در نظر گرفته شده است. در این مرجع نیز از حساسیت ولتاژها به منابع توان راکتیو برای

### ۳- فرمول‌بندی مسئله

همان‌گونه که اشاره شد، مسئله برنامه‌ریزی توان راکتیو با قید پایداری ولتاژ باید به صورت یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شود. تابع هدف این مسئله بهینه‌سازی، حداقل کردن منابع توان راکتیو به صورت زیر است:

$$\sum_{i \in \alpha_L} Q_{ci} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $\alpha_L$  مجموعه شین‌های بار و  $Q_{ci}$  مقدار توان راکتیو جدید در شین  $i$  هست. با منابع توان راکتیو جدید، حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب باید در حالت بدون اغتشاش و همچنین در حالتی که یک اغتشاش از مجموعه اغتشاش‌های محتمل رخ می‌دهد حفظ شود. در همه حالت‌های با و بدون اغتشاش، کلیه متغیرها و قیود به ۳ دسته تقسیم می‌شوند: متغیرها و قیود مربوط به حالت پایه، متغیرها و قیود مربوط به مرز پایداری ولتاژ، و متغیرها و قیود مربوط به هر دو حالت پایه و مرز پایداری ولتاژ. از این به بعد، متغیرهای مربوط به حالت پایه با بالانویس " $b_k$ " و متغیرهای مربوط به مرز پایداری ولتاژ با بالانویس " $c_k$ " نشان داده می‌شوند.  $k$  نشان‌دهنده شماره اغتشاش است.  $k = 0$  بیانگر حالت بدون اغتشاش هست. متغیرها و پارامترهایی که در دو حالت پایه و مرز پایداری دارای مقدار یکسان هستند، با بالانویس  $k$  نشان داده می‌شوند که نشان‌دهنده شماره اغتشاش است.  $Q_{ci}$  بدون بالانویس است زیرا در همه حالت‌ها و اغتشاش‌ها دارای مقدار یکسان است.

### ۳-۱- قیود مربوط به هر دو نقطه پایه و مرز پایداری

الف- حدود فیزیکی منابع توان راکتیو جدید

$$0 \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{max}; i \in \alpha_L \quad (4)$$

ب- حفظ ضریب قدرت ( $PF$ ) در شین‌های بار

$$PF_i = \frac{P_{li}}{S_{li}} = \text{عدد ثابت} \quad (5)$$

### ۳-۲- قیود مربوط به نقطه پایه

الف- معادلات پخش بار

$$P_{gi}^{b_k} - P_{li}^{b_k} = \sum_{j \in \alpha_L + \alpha_G} V_i^{b_k} V_j^{b_k} \left( G_{ij}^k \cos(\delta_{ij}^{b_k}) + B_{ij}^k \sin(\delta_{ij}^{b_k}) \right); i \in \alpha_L + \alpha_G, k \in \alpha_C \quad (6)$$

$$-Q_{li}^{b_k} + Q_{ci} = \sum_{j \in \alpha_L + \alpha_G} V_i^{b_k} V_j^{b_k} \left( G_{ij}^k \sin(\delta_{ij}^{b_k}) - B_{ij}^k \cos(\delta_{ij}^{b_k}) \right); i \in \alpha_L, k \in \alpha_C \quad (7)$$

بهتری از خود نشان می‌دهند. یکی از آن‌ها، حداقل مقدار منفرد ماتریس ژاکوبین کاهش یافته است. اما این شاخص نیز در نزدیکی نقطه سقوط ولتاژ، دارای رفتاری غیرخطی است [۱۳].

محاسبه شاخص  $L$  که در ابتدای مرجع [۱۴] ارائه شده است ساده‌تر از محاسبه مقادیر ویژه و منفرد ماتریس ژاکوبین می‌باشد. این شاخص که برای شین‌های بار محاسبه می‌شود می‌تواند برای شناسایی شین‌های ضعیف به کار برده شود. شاخص  $L$  در هنگام بارگذاری سبک سیستم، مقادیری نزدیک به صفر و در هنگامی که سیستم به مرز پایداری ولتاژ نزدیک می‌گردد، دارای مقادیری نزدیک به یک می‌شود. هر چه مقدار این شاخص برای یک شین بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده ضعیف‌تر بودن آن شین است. در مرجع [۱۵]، از این شاخص به عنوان یک تابع هدف برای بهبود حاشیه پایداری ولتاژ استفاده شده است. شاخص  $L$  نیز مانند حداقل مقادیر ویژه و منفرد ماتریس ژاکوبین، دارای رفتاری غیرخطی می‌باشد و نمی‌تواند برای پیش‌بینی نقطه سقوط ولتاژ به کار برده شود. اما می‌تواند برای رتبه‌بندی اغتشاش‌ها و شناسایی نواحی که به وسیله هر اغتشاش تحت تاثیر قرار می‌گیرند، استفاده شود. در این مقاله، اغتشاش‌ها بر اساس نواحی که تحت تاثیر قرار می‌دهند دسته‌بندی می‌گردند. این نواحی بر پایه ضعیف‌ترین شین که در هنگام وقوع هر اغتشاش ایجاد می‌شوند، تعیین می‌گردند. اغتشاش‌هایی که ضعیف‌ترین شین مربوطه‌شان یکسان می‌باشد، در یک گروه قرار می‌گیرند. از هر گروه شدیدترین اغتشاش، انتخاب و در مسئله برنامه‌ریزی توان راکتیو در نظر گرفته می‌شود. شاخص  $L$  در شین بار  $i$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_i = \left| 1 - \frac{\sum_{j \in \alpha_G} F_{ij} V_j}{V_i} \right| \quad (1)$$

که در این رابطه  $\alpha_G$  مجموعه شین‌های دارای مولد و  $V_i$  فازور ولتاژ در شین  $i$  است.  $F$  یک زیر ماتریس از ماتریس  $H$  است که از ماتریس ادمیتانس به دست می‌آید. مطابق رابطه (۲)، ماتریس  $H$  بردار ولتاژ در شین‌های بار و جریان‌ها در شین‌های مولد را به بردار جریان در شین‌های بار و ولتاژ در شین‌های مولد مربوط می‌کند.

$$\begin{bmatrix} V^L \\ I^G \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} I^L \\ V^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^{LL} & F^{LG} \\ K^{GL} & Y^{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^L \\ V^G \end{bmatrix} \quad (2)$$

در این مقاله علاوه بر شاخص  $L$ ، از حساسیت اندازه ولتاژ به مقدار بار نیز به عنوان یکی دیگر از شاخص‌های پایداری ولتاژ استفاده شده است. این حساسیت به سادگی از عناصر ماتریس ژاکوبین محاسبه می‌گردد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، شبیه‌سازی بر روی سیستم ۵۷ شینه IEEE انجام می‌شود. اطلاعات این سیستم در مرجع [۱۶] آمده است. نمودار تک‌خطی این سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است.

تمامی شین‌های بار به‌عنوان کاندید نصب منابع توان راکتیو جدید در نظر گرفته می‌شوند.

در جدول (۱)، حاشیه پایداری ولتاژ در حالت بدون اغتشاش و هم‌چنین در تعدادی از حالت‌های دارای اغتشاش نشان داده شده است. اغتشاش‌های انتخاب‌شده، قطع یکی از عناصر شبکه می‌باشد. حاشیه پایداری منفی به این مفهوم است که برخی از اغتشاش‌ها باعث می‌شوند در بارگذاری پایه، معادلات پخش بار واگرا شوند. در این شرایط، معادلات پخش بار در باری کم‌تر از بار پایه همگرا می‌شوند، یعنی حاشیه پایداری منفی می‌شود.

در این جدول به ازای هر اغتشاش، حداکثر مقدار شاخص  $L$  و شین مربوط به آن نیز در داخل پرانتز آورده شده است. این شاخص در بار پایه محاسبه شده است. البته در اغتشاش‌هایی که حاشیه پایداری منفی است ابتدا بار را کاهش داده تا معادلات پخش بار همگرا شوند، آنگاه در این بار، شاخص  $L$  محاسبه می‌شود.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اغتشاش شماره ۳۱، بدترین اغتشاش است. اغتشاش‌های ۱ تا ۲۰ در یک دسته قرار می‌گیرند زیرا در همه آن‌ها، شین ۳۱، ضعیف‌ترین شین است. اغتشاش‌های ۲۱ تا ۳۰ (با شین ۳۳ به‌عنوان ضعیف‌ترین شین)، اغتشاش‌های ۳۱ تا ۳۹ (با شین ۳۰ به‌عنوان ضعیف‌ترین شین) و اغتشاش ۴۰ (با شین ۵۲ به‌عنوان ضعیف‌ترین شین) نیز در سه دسته مجزا قرار می‌گیرند.

ستون آخر جدول (۱) مربوط به حساسیت اندازه ولتاژ به مقدار بار است. این حساسیت‌ها دارای علامت منفی می‌باشند. در این ستون به ازای هر اغتشاش، بیشترین حساسیت از نظر قدر مطلق و شین مربوط به آن در داخل پرانتز آورده شده است. بدیهی است، به ازای هر اغتشاش، شینی که دارای حداکثر مقدار شاخص  $L$  است، دارای بیش‌ترین حساسیت ولتاژ نیز می‌باشد.

حل مسئله بهینه‌سازی، در ۳ حالت انجام شده است. در حالت اول، همه اغتشاش‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در حالت دوم، اغتشاش‌های ۱، ۲۱، ۳۱ و ۴۰ به‌عنوان شدیدترین اغتشاش‌های هر دسته لحاظ گردیده‌اند. در حالت سوم نیز تنها شدیدترین اغتشاش در نظر گرفته شده است. فرض شده که در هر شین، حداکثر مقدار قابل نصب توان راکتیو برابر ۱ pu باشد. حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب برابر با ۰.۴۵٪ است. در جدول‌های ۲ تا ۴، اندازه و مکان منابع توان راکتیو محاسبه شده، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج برای حالت‌های ۱ و ۲ کاملاً یکسان است. بنابراین، در نظر گرفتن اغتشاش‌های ۱، ۲۱، ۳۱ و ۴۰، همه اغتشاش‌ها را پوشش می‌دهد. سایر اغتشاش‌ها که حاصل از قطع یکی از عناصر شبکه می‌باشند نیز در یکی از ۴ دسته فوق قرار می‌گیرند. در این شبکه حدود ۸۰ اغتشاش از نوع مذکور وجود دارد که

در این روابط  $\alpha_C$  مجموعه اغتشاش‌هایی است که در مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. نوآوری این مقاله، انتخاب تعداد معدودی از اغتشاش‌های محتمل هست به‌گونه‌ای که منابع توان راکتیو محاسبه شده، همه اغتشاش‌ها را پوشش دهد.

ب- حدود مجاز ولتاژ در شین‌های بار

$$V_i^{\min} \leq V_i^{b_k} \leq V_i^{\max}; i \in \alpha_L, k \in \alpha_C \quad (8)$$

ج- حدود مجاز توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi}^{b_k} \leq P_{gi}^{\max}; i \in \alpha_G, k \in \alpha_C \quad (9)$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi}^{b_k} \leq Q_{gi}^{\max}; i \in \alpha_G, k \in \alpha_C \quad (10)$$

#### ۳-۳- قیود مربوط به مرز پایداری

الف- نامساوی‌های مربوط به حاشیه پایداری ولتاژ

$$h P_{gi}^{c_k} - h P_{li}^{c_k} \geq \sum_{j \in \alpha_L + \alpha_G} V_i^{c_k} V_j^{c_k} \left( G_{ij}^k \cos(\delta_{ij}^{c_k}) + B_{ij}^k \sin(\delta_{ij}^{c_k}) \right); i \in \alpha_L + \alpha_G, k \in \alpha_C \quad (11)$$

$$-h Q_{li}^{c_k} + Q_{ci} \geq \sum_{j \in \alpha_L + \alpha_G} V_i^{c_k} V_j^{c_k} \left( G_{ij}^k \sin(\delta_{ij}^{c_k}) - B_{ij}^k \cos(\delta_{ij}^{c_k}) \right); i \in \alpha_L, k \in \alpha_C \quad (12)$$

در نامساوی‌های (۱۱) و (۱۲)،  $h$  ضریب بارگذاری مربوط به حاشیه پایداری (SM) است به‌گونه‌ای که:

$$h = \frac{1}{1 - SM} \quad (13)$$

SM، معمولاً به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SM = \frac{S_{cp} - S_o}{S_{cp}} \quad (14)$$

که  $S_o$  و  $S_{cp}$  به ترتیب، مجموعه مگا ولت‌آمپر بارها در نقاط پایه و مرز پایداری ولتاژ هستند.

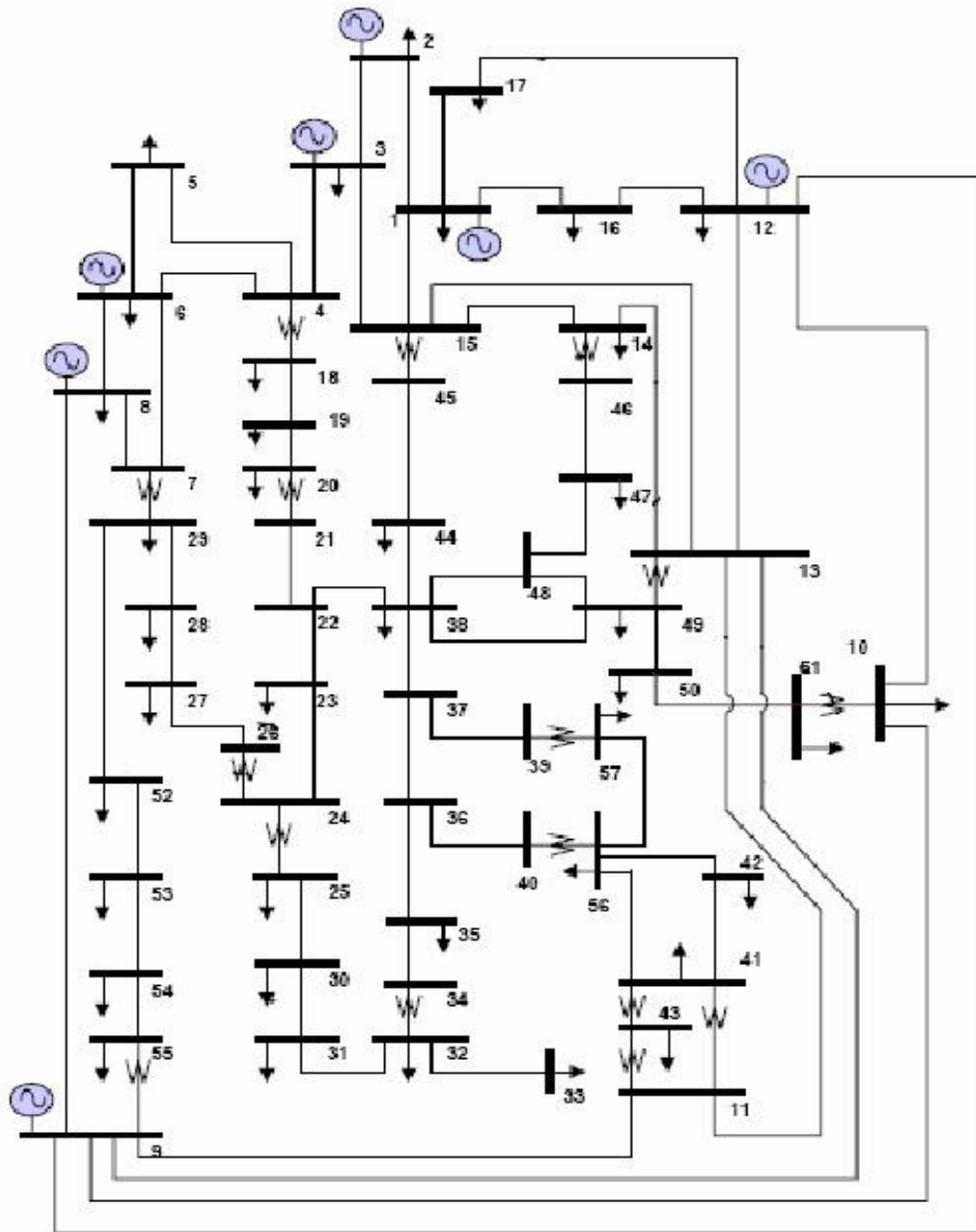
ب- حدود مجاز توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi}^{c_k} \leq P_{gi}^{\max}; i \in \alpha_G, k \in \alpha_C \quad (15)$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi}^{c_k} \leq Q_{gi}^{\max}; i \in \alpha_G, k \in \alpha_C \quad (16)$$

جلوگیری از بزرگ شدن بیش از حد جداول، حدود نیمی از اغتشاش‌ها که دارای شدت بیش‌تری هستند آورده شده‌اند.

برای تمامی آن‌ها، حاشیه پایداری و ضعیف‌ترین شین تعیین شده است. شبیه‌سازی حالت ۱ برای کل ۸۰ اغتشاش نیز انجام شده و نتایجی یکسان با جداول ۲ و ۳ داشته است. در این مقاله برای



شکل (۱): نمودار تک‌خطی سیستم ۵۷ شینه IEEE

جدول (۱): حاشیه پایداری ولتاژ، قبل از نصب منابع توان راکتیو جدید

شماره اغتشاش	نوع اغتشاش	حاشیه پایداری (%)	حداکثر مقدار شاخص L (ضعیف‌ترین شین)	بیش‌ترین حساست ولتاژ (ضعیف‌ترین شین)
۰	بدون اغتشاش	۴۵	۰/۱۷۷۰ (۳۱)	-۰/۲۷۸۳ (۳۱)
۱	قطع خط ۳۱-۳۰	-۱۰	۰/۴۹۸۱ (۳۱)	-۰/۴۶۵۹ (۳۱)
۲	قطع خط ۱۳-۱۲	۳۷	۰/۳۴۲۸ (۳۱)	-۰/۳۱۵۴ (۳۱)
۳	قطع خط ۲۳-۲۲	۲۹	۰/۳۷۹۹ (۳۱)	-۰/۳۵۱۰ (۳۱)
۴	قطع خط ۲۴-۲۳	۳۸	۰/۳۴۱۴ (۳۱)	-۰/۳۱۲۹ (۳۱)
۵	خروج ترانسفورماتور ۲۵-۲۴	۲۹	۰/۳۸۸۵ (۳۱)	-۰/۳۵۰۶ (۳۱)
۶	خروج ترانسفورماتور ۲۵-۲۴	۳۱	۰/۳۸۳۲ (۳۱)	-۰/۳۴۴۶ (۳۱)
۷	خروج ترانسفورماتور ۲۶-۲۴	۳۳	۰/۳۶۸۴ (۳۱)	-۰/۳۳۴۴ (۳۱)
۸	قطع خط ۲۷-۲۶	۳۳	۰/۳۶۸۴ (۳۱)	-۰/۳۳۴۴ (۳۱)
۹	قطع خط ۲۸-۲۷	۲۵	۰/۴۲۰۴ (۳۱)	-۰/۳۸۴۴ (۳۱)
۱۰	قطع خط ۲۹-۲۸	۱۵	۰/۴۶۱۷ (۳۱)	-۰/۴۳۹۹ (۳۱)
۱۱	قطع خط ۳۲-۳۱	۳۱	۰/۳۸۰۵ (۳۱)	-۰/۳۴۸۴ (۳۱)
۱۲	قطع خط ۳۸-۲۲	۳۳	۰/۳۷۱۲ (۳۱)	-۰/۳۴۰۴ (۳۱)
۱۳	قطع خط ۴۴-۳۸	۳۹	۰/۳۴۱۴ (۳۱)	-۰/۳۰۸۶ (۳۱)
۱۴	خروج ترانسفورماتور ۴۵-۱۵	۳۷	۰/۳۵۷۶ (۳۱)	-۰/۳۲۲۵ (۳۱)
۱۵	خروج ترانسفورماتور ۴۶-۱۴	۲۳	۰/۳۷۷۱ (۳۱)	-۰/۳۳۶۸ (۳۱)
۱۶	قطع خط ۴۷-۴۶	۲۳	۰/۳۷۷۳ (۳۱)	-۰/۳۳۶۹ (۳۱)
۱۷	خروج ترانسفورماتور ۵۱-۱۰	۲۴	۰/۳۴۸۲ (۳۱)	-۰/۳۱۱۹ (۳۱)
۱۸	خروج ترانسفورماتور ۴۹-۱۳	۳۹	۰/۳۵۷۵ (۳۱)	-۰/۳۱۸۱ (۳۱)
۱۹	قطع خط ۴۵-۴۴	۲۷	۰/۳۵۷۸ (۳۱)	-۰/۳۲۲۶ (۳۱)
۲۰	قطع خط ۴۸-۳۸	۳۱	۰/۳۴۵۷ (۳۱)	-۰/۳۰۷۰ (۳۱)
۲۱	خروج ترانسفورماتور ۳۲-۳۴	-۱۵	۰/۹۴۸۲ (۳۳)	-۱/۳۸۷۳ (۳۳)
۲۲	قطع خط ۱۱-۹	۴۱	۰/۳۰۴۵ (۳۳)	-۰/۲۶۳۵ (۳۳)
۲۳	قطع خط ۱۵-۳	۴۲	۰/۳۰۶۱ (۳۳)	-۰/۲۷۳۶ (۳۳)
۲۴	قطع خط ۱۵-۱۴	۴۴	۰/۳۰۴۱ (۳۳)	-۰/۲۷۴۳ (۳۳)
۲۵	قطع خط ۳۵-۳۴	-۱۴	۰/۹۴۷۴ (۳۳)	-۱/۳۸۶۰ (۳۳)
۲۶	قطع خط ۳۷-۲۶	۱	۰/۵۸۶۸ (۳۳)	-۰/۵۶۵۰ (۳۳)
۲۷	قطع خط ۳۸-۳۷	۷	۰/۶۵۵۷ (۳۳)	-۰/۷۰۲۰ (۳۳)
۲۸	قطع خط ۴۳-۴۱	۳۸	۰/۳۰۳۷ (۳۳)	-۰/۲۶۹۵ (۳۳)
۲۹	قطع خط ۴۸-۴۷	۳۹	۰/۳۰۸۸ (۳۳)	-۰/۲۷۲۱ (۳۳)
۳۰	قطع خط ۵۱-۵۰	۴۲	۰/۳۰۴۱ (۳۳)	-۰/۲۶۶۳ (۳۳)
۳۱	قطع خط ۳۰-۲۵	-۲۰	۰/۳۲۶۹ (۳۰)	-۰/۳۱۳۴ (۳۰)

ادامه جدول (۱)

۰/۲۵۰۹(۳۰)	۰/۲۹۲۶(۳۰)	۳۹	قطع خط ۱-۲	۳۲
۰/۲۵۱۱(۳۰)	۰/۲۹۲۶(۳۰)	۴۱	قطع خط ۲-۳	۳۳
۰/۲۶۲۰(۳۰)	۰/۲۹۰۸(۳۰)	۴۳	قطع خط ۶-۷	۳۴
۰/۲۵۸۴(۳۰)	۰/۲۸۷۸(۳۰)	۴۱	قطع خط ۶-۸	۳۵
۰/۲۵۰۵(۳۰)	۰/۲۹۲۴(۳۰)	۴۲	خروج مولد ۲	۳۶
۰/۲۷۰۴(۳۰)	۰/۲۹۲۰(۳۰)	۴۳	خروج مولد ۳	۳۷
۰/۲۵۶۸(۳۰)	۰/۲۹۲۶(۳۰)	۴۲	خروج مولد ۶	۳۸
۰/۲۵۸۰(۳۰)	۰/۲۸۷۸(۳۰)	۴۴	قطع خط ۹-۱۲	۳۹
۰/۴۲۶۲(۵۲)	۰/۳۱۵۹(۵۲)	-۹	قطع خط ۲۹-۵۲	۴۰

جدول (۵): حاشیه پایداری ولتاژ بعد از نصب منابع توان راکتیو جدید در حالت‌های ۱ و ۲

شماره اغتشاش	حاشیه پایداری (%)	شماره اغتشاش	حاشیه پایداری (%)
۰	۶۲	۲۱	۴۵
۱	۴۸	۲۲	۵۰
۲	۵۷	۲۳	۵۱
۳	۵۸	۲۴	۵۱
۴	۵۷	۲۵	۴۵
۵	۵۸	۲۶	۵۱
۶	۵۱	۲۷	۵۶
۷	۵۴	۲۸	۴۹
۸	۵۵	۲۹	۵۰
۹	۵۲	۳۰	۵۸
۱۰	۵۵	۳۱	۴۵
۱۱	۵۴	۳۲	۵۷
۱۲	۵۶	۳۳	۵۷
۱۳	۵۷	۳۴	۵۸
۱۴	۵۶	۳۵	۵۶
۱۵	۵۳	۳۶	۵۶
۱۶	۵۳	۳۷	۵۷
۱۷	۵۴	۳۸	۵۵
۱۸	۵۳	۳۹	۵۵
۱۹	۵۶	۴۰	۴۸
۲۰	۵۲		

در جدول‌های ۵ و ۶، مقدار حاشیه پایداری ولتاژ بعد از نصب منابع توان راکتیو جدید آورده شده است. همان گونه که انتظار می‌رفت، در صورتی که تنها شدیدترین اغتشاش در نظر گرفته شود، حاشیه پایداری ولتاژ مطلوب در تعدادی از اغتشاش‌ها برآورده نمی‌گردد.

جدول (۲): اندازه و مکان محاسبه‌شده برای منابع توان راکتیو جدید، در حالت ۱

اندازه (pu)	مکان (شماره شین)
۰/۴۷۵	۲۸
۰/۵۵۱	۲۹
۰/۶۳۴	۳۱
۰/۸۶۴	۳۳
۰/۵۸۲	۵۲
۰/۴۳۴	۵۳

جدول (۳): اندازه و مکان محاسبه‌شده برای منابع توان راکتیو جدید، در حالت ۲

اندازه (pu)	مکان (شماره شین)
۰/۴۷۵	۲۸
۰/۵۵۱	۲۹
۰/۶۳۴	۳۱
۰/۸۶۴	۳۳
۰/۵۸۲	۵۲
۰/۴۳۴	۵۳

جدول (۴): اندازه و مکان محاسبه‌شده برای منابع توان راکتیو جدید، در حالت ۳

اندازه (pu)	مکان (شماره شین)
۰/۴۲۵	۲۸
۰/۵۷۴	۲۹
۰/۶۱۵	۳۱
۰/۴۱۸	۵۲
۰/۲۸۶	۵۳

جدول (۶): حاشیه پایداری ولتاژ بعد از نصب منابع توان

راکتیو جدید در حالت ۳

شماره اغتشاش	حاشیه پایداری (%)	شماره اغتشاش	حاشیه پایداری (%)
۰	۶۰	۲۱	۱۸
۱	۲۷	۲۲	۵۰
۲	۵۷	۲۳	۵۱
۳	۴۹	۲۴	۵۲
۴	۴۷	۲۵	۱۹
۵	۴۸	۲۶	۲۵
۶	۵۰	۲۷	۲۷
۷	۵۳	۲۸	۴۷
۸	۵۲	۲۹	۴۹
۹	۴۴	۳۰	۵۳
۱۰	۴۴	۳۱	۴۰
۱۱	۴۹	۳۲	۵۵
۱۲	۵۲	۳۳	۵۶
۱۳	۵۶	۳۴	۵۷
۱۴	۵۵	۳۵	۵۵
۱۵	۵۲	۳۶	۵۶
۱۶	۵۲	۳۷	۵۷
۱۷	۵۲	۳۸	۵۵
۱۸	۵۷	۳۹	۵۵
۱۹	۴۶	۴۰	۲۰
۲۰	۴۸		

## ۵- نتیجه‌گیری

یکی از دلایل وجود بار محاسباتی سنگین در مسئله برنامه‌ریزی توان راکتیو با قید پایداری ولتاژ، این است که نیاز به تعریف دو دسته متغیر و قید می‌باشد. این متغیرها و قیود مربوط به حالت‌های پایه و مرز پایداری ولتاژ می‌باشند. علاوه بر این، برای هر اغتشاش نیز باید متغیرها و پارامترهای جداگانه‌ای در نظر گرفته شود. تمرکز این مقاله بر روی انتخاب تعداد معدودی از اغتشاش‌ها است. به این منظور، ابتدا اغتشاش‌ها بر اساس نواحی که تحت تاثیر قرار می‌دهند به چند دسته تقسیم می‌شوند. این نواحی، بر اساس ضعیف‌ترین شین در هنگام وقوع هر اغتشاش تعیین می‌گردند. اغتشاش‌هایی که دارای ضعیف‌ترین شین یکسانی هستند، در یک دسته قرار می‌گیرند. سپس، ضعیف‌ترین اغتشاش هر دسته انتخاب می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی سیستم ۵۷ شینه IEEE، موثر بودن روش پیشنهادی را نشان می‌دهند.

## مراجع

- collapse," IEEE Transactions Power Systems, Vol. 229 No. 2, pp. 906-917, 1994.
- [3] A. A. El Dib, H. K. M. Youssef, M. M. El-Metwally and Z. Osman, "Optimum VAR sizing and allocation using particle swarm optimization." Electric Power Systems Research, Vol. 77, pp. 965-972, 2007.
- [4] D. Chattopadhyay and B. B. Chakrabarti. "Voltage stability constrained Var planning: Model simplification using statistical approximation," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 23, No. 5, pp. 349-358, 2001.
- [5] D. Thukaram and A. Lomi, "Selection of static VAR compensator location and size for system Voltage stability improvement," Electric Power Systems Research, Vol. 54, pp. 139-150, 2000.
- [6] B. Cova, N. LosigNore, P. Marannino and M. Montagna, "Contingency constrained optimal reactive power flow procedures for voltage control in planning and operation," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 602-608, 1995.
- [7] D. Chattopadhyay and B. B. Chakrabarti, "Reactive power planning incorporating voltage stability." International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 24, No. 3, pp. 185-200, 2002.
- [8] B. B. Chakrabarti, D. Chattopadhyay and C. Kumble, "Voltage stability constrained Var planning, a case study for new Zealand," Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, pp. 86-91, 2001.
- [9] G. R. Yousefi, H. Seifi, M. S. Sepasian, H. Haghghat, R. Riahi, H. Hosseini, A. K. Kazerouni, E. Mohseni and A. Akhavan, "A new reactive power planning procedure for Iranian Power Grid," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 77 pp. 225-234, 2004.
- [10] V. Krishnan, H. Liu and J. D. McCalley, "Coordinated reactive power planning against power system voltage instability," Power Systems Conference and Expositions, 2009.
- [11] Y. Wang, F. Li, Q. Wan and H. Chen, "Reactive power planning based on fuzzy clustering, gray code, and simulated annealing," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 2246-2255, 2011.
- [12] B. Milosevic and M. Begovic, "Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 121-127, 2003.
- [13] B. Gao, G. K. Morison and P. Kundur, "Voltage stability evaluation using modal analysis," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 1529-1541, 1992.
- [14] P. Kessel and H. Glavitsch, "Estimating the voltage stability of a power system," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, No. 3, pp. 346-354, 1986
- [15] W. zhang and Y. Liu, "Multi-objective reactive power and voltage control based on fuzzy optimization strategy and fuzzy adaptive particle swarm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol, 30, pp. 525-532, 2008.
- [16] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>, accessed June 2005.

## زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Particle Swarm Optimization  
<sup>2</sup> Saddle Node Bifurcation  
<sup>3</sup> Singular  
<sup>4</sup> Stability Margin

- [1] W. Zhang, F. Li and L. M. Tolbert, "Review of reactive" power planning: objectives, constraints, and algorithms, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 4, pp. 2177-2186, 2007.
- [2] V. Ajjarapu, P. L. Lau and S. Battula, "An optimal reactive power planning strategy against voltage