

## طرح حذف بار ولتاژی در حضور منابع تولید پراکنده

محمدحسن همت پور<sup>۱\*</sup>، محمدحسین رضائیان کوچی<sup>۲</sup>، ابوالفضل شعبانی اصل<sup>۳</sup>

\*۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران، mh.hematpour@jahromu.ac.ir  
 ۲- دکتری، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، mh\_rezaeian@eng.uk.ac.ir  
 ۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد جهرم، دانشگاه آزاد اسلامی، جهرم، ایران، abolfazl\_109@yahoo.com  
 ۴- کارشناس نظارت بر بهره‌برداری، توزیع فارس، شیراز، ایران  
 تاریخ دریافت: ۹۹/۴/۶ تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۲۶

**چکیده:** امروزه از منابع تولید پراکنده به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. این منابع چالش‌های جدیدی در مسائل مختلف سیستم قدرت به وجود می‌آورد. یکی از این چالش‌ها تأثیر این منابع بر مسئله حذف بار بهینه است. حذف بار در شبکه بعد از وقوع رخدادی همچون خروج خط از شبکه رخ می‌دهد. خروج یک خط از شبکه می‌تواند سبب افزایش توان عبوری از خطوط دیگر شود و موجب عملکرد سیستم‌های حفاظتی شده و در نتیجه فروپاشی شبکه را به همراه داشته باشد. در این مقاله یک روش جامع حذف بار ولتاژی ۷ جهت جلوگیری از فروپاشی شبکه و بازگرداندن شبکه به حالت بهره‌برداری عادی در حضور منابع تولید پراکنده پیشنهاد می‌شود. در این روش ابتدا بحرانی‌ترین خط که با خروج آن پایداری شبکه حداقل می‌شود، مشخص می‌شود. سپس با خروج خط منتخب توسط اپراتور با بهره‌گیری از ویژگی الگوریتم هارمونی حداقل میزان حذف بار و مکان DG به‌گونه‌ای مشخص می‌شود که حد بارپذیری شبکه حداکثر شود و شبکه دچار فروپاشی نشود. عملکرد طرح پیشنهادی بر روی دو شبکه استاندارد ۱۴ و ۳۰ باسه IEEE در دو سناریو بدون حضور منابع تولید پراکنده و حضور آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

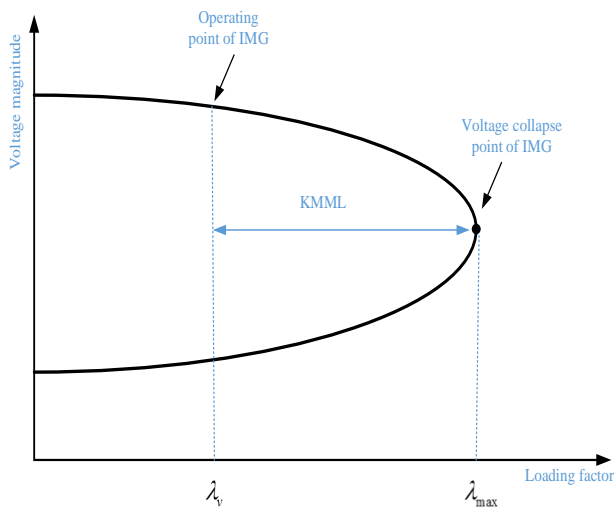
**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم جستجوی هارمونی، پایداری ولتاژ، حذف بار، منابع تولید پراکنده.

### ۱- مقدمه

برق، بهره‌برداری شبکه‌های قدرت در بیشینه حد بهره‌برداری و کمینه حد پایداری صورت می‌گیرد و با توجه به پیچیدگی ذاتی این شبکه‌ها، احتمال از دست رفتن پایداری و وقوع خاموشی‌های جزئی و سرا سری بالا است. در چنین شرایطی برای جلوگیری از خاموشی‌های گسترده و نتیجتاً فروپاشی کامل، سیستم طراحی و به‌کارگیری روش‌های کنترل اضطراری از ضروریات است. در این مسئله تأثیر منابع تولید پراکنده (DG) بر روی این مسئله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هدف کلی این تحقیق مطالعه حذف بار بهینه در راستای حداکثر سازی حد بارپذیری است. این مسئله باهدف رسیدن به پایداری و در نظر داشتن محدودیت‌های بهره‌برداری به یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مقید تبدیل می‌شود که با روش‌های هوشمند قابل حل خواهد بود. حذف بار به‌عنوان آخرین راهکار عملیاتی در ریز شبکه‌ها [۱]، سیستم‌های توزیع [۲] و سیستم‌های انتقال قدرت [۳] بکار برده

در چند دهه اخیر، به دلیل وقوع خاموشی‌های سرا سری در نقاط مختلف دنیا، موضوع پایداری ولتاژ و فرکانس به یکی از عمده‌ترین نگرانی‌های بهره‌برداران تبدیل شده است. از یک طرف به دلیل مسائل اقتصادی، باید بیشترین استفاده از ظرفیت خطوط به عمل آید و از طرف دیگر به دلیل خطر ناپایداری، بهره‌بردار باید تلاش کند که همواره سیستم را در یک فاصله مطمئن از ناپایداری نگاه‌دارند. مسئله ناپایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت در دامنه زمانی کسری از ثانیه تا چند ده دقیقه گسترش می‌یابد. مشخصه فروپاشی ولتاژ، نزول آهسته و مداوم ولتاژ باس‌های سیستم قدرت و در نهایت کاهش سریع آن‌هاست و لذا دورنگه داشتن سیستم قدرت از نقطه ناپایداری از اهداف مهم مهندسی برق هست. از طرفی امروزه با توجه به رقابتی شدن صنعت

تغییرات نسبتاً سریع تری دارند، متغیر سیستم و متغیرهایی همچون توان اکتیو و راکتیو بارها که تغییرات نسبتاً آهسته تری دارند، متغیرهای عامل نامیده می‌شوند.



شکل (۱): ترسیم شاخص KMML

چنانچه یک متغیر همچون ولتاژ بر حسب یک عامل همچون توان حقیقی رسم شود، یک منحنی P-V (یا V-λ) به دست می‌آید. همان گونه که می‌دانیم، این منحنی دارای دونقطه تعادل است. اگر توان اکتیو مصرف کننده زیاد شود ولتاژ افت می‌کند و نقطه تعادل پایدار و ناپایدار به هم نزدیک می‌شوند و همدیگر را قطع می‌کنند. چنانچه توان حقیقی از این مقدار بیشتر شود، سیستم به حالتی وارد می‌شود که سیستم نقطه تعادل ندارد و ناپایدار می‌شود.

معادلات پخش بار در سیستم قدرت در نقاط بحرانی دارای پاسخ نمی‌باشند و به دوشاخگی خود می‌رسند و همان گونه که بیان شد، یک دو شاخگی بر اساس یک تغییر اساسی در ساختار پایداری سیستم رخ می‌دهد. برخی از این دوشاخگی‌ها، دوشاخگی ناشی از محدودیت (LIB<sup>۲</sup>) و برخی ناشی از دوشاخگی زینی (SNB<sup>۳</sup>) می‌باشند. با رسیدن یکی از متغیرهای شبکه (شامل متغیرهای بهره‌بردار یا تجهیزات) به حد خود، یک LIB رخ می‌دهد.

روش CPF که به روش پیش‌بینی - تصحیح معروف است، برای رسم منحنی P-V (یا V-λ) از یک مقدار اولیه بهره می‌گیرد.

این روش به صورت دیباگرام

$$(x^j, \lambda^j) \xrightarrow{\text{Predictor}} (\hat{x}^{j+1}, \hat{\lambda}^{j+1}) \xrightarrow{\text{Corrector}} (x^{j+1}, \lambda^{j+1})$$

شکل (۲) نمایش داده می‌شود. که در آن  $(x^j, \lambda^j)$  بیانگر نقطه فعلی حل مسئله،  $(\hat{x}^{j+1}, \hat{\lambda}^{j+1})$  نقطه پیش‌بینی شده و  $(x^{j+1}, \lambda^{j+1})$  نقطه تصحیح شده بر روی منحنی است. مرحله پیش‌بینی بر اساس بردار خط

می‌شود که می‌تواند در زمینه دینامیکی [۴] و استاتیکی [۳] مورد مطالعه قرار گیرد. حذف بار می‌تواند، حذف بار فرکانسی یا ولتاژی باشد و برای حل آن از الگوریتم‌های بهینه‌سازی متفاوت استفاده شود [۱، ۵-۶]. مسئله حذف بار در حضور منابع انرژی‌های تجدید پذیر نیز مدنظر قرار گرفته شده است. مثلاً در [۷-۹] به مسئله حذف بار در حضور توربین‌های بادی پرداخته است. مسئله حذف بار در حضور خودروهای برقی، در [۱۰-۱۱] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مسئله حذف بار در حضور انرژی خورشیدی موضوع مرجع [۱۲] است. مراجع [۱۳-۱۵] مسئله حذف بار در حضور منابع تولید پراکنده مورد تحلیل و بررسی قرار داده‌اند. در ادامه به شرح برخی مطالعات در این زمینه می‌پردازد.

آریا و همکارانش در [۱۶] برای حذف بار بهینه بر پایه بهبود پایداری ولتاژ روشی ارائه داده‌اند. شین‌های بار بر اساس حداقل مقدار حساسیت ماتریس ژاکوبین پخش بار مرتب‌شده و حذف بار بر اساس آن به کمک الگوریتم تفاضلی صورت می‌پذیرد. در [۱۷] حذف بار فرکانسی و ولتاژی بر اساس تاریخچه اتفاقات رایج در شبکه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این الگوریتم حذف بار بر اساس محاسبات فازوری شامل اطلاعات فرکانس و ولتاژ صورت می‌پذیرد. در راستای بهبود الگوریتم هوشمند از الگوریتم تفاضلی در [۱۸] برای ارزیابی حذف بار به منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ استفاده شده است. در [۱۹] با بهره‌گیری از الگوریتم منطق فازی، پایداری ولتاژ را بهبود می‌دهند. در [۲۰] با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی به مطالعه مسئله پخش بار در راستای افزایش حد بارپذیری پرداخته می‌شود.

## ۲- بیان ریاضی مسئله

### ۲-۱- تابع هدف

حذف بار در شرایط بهره‌برداری اضطراری به دنبال خروج یک خط انتقال یا نیروگاه از شبکه اتفاق می‌افتد. در این مسئله حذف بار به صورت مدل دو هدفه سلسله‌مراتبی مطرح می‌شود. تابع هدف مسئله پیشنهادی حداکثر سازی حد بارپذیری شبکه است. همانند سیستم‌های قدرت متداول از روش  $KMML^1$  برای ارزیابی پایداری ولتاژ در ریز شبکه‌ها بهره می‌برد.  $KMML$  یک شاخص استاتیکی ولتاژ است که میزان نزدیکی نقطه بهره‌برداری شبکه تا نقطه فروپاشی ولتاژ همچون شکل (۱) تعیین می‌کند [۲۱].

یکی از روش‌های محاسبه  $KMML$  استفاده از روش پخش بار متوالی CPF<sup>۲</sup> که بر پایه نقطه دوشاخگی بیان می‌شود. دوشاخگی، پدیده مربوط به سیستم‌های غیرخطی است. در کاربرد تئوری دوشاخگی در بحث فروپاشی ولتاژ، ابتدا به تعریف متغیرهای سیستم و عامل‌های سیستم پرداخته می‌شود. متغیرهایی همچون ولتاژ که

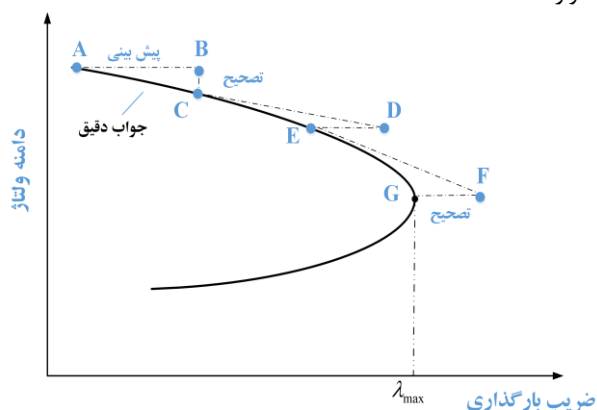
<sup>۳</sup> Limited Induced Bifurcation

<sup>۴</sup> Saddle Node Bifurcation

<sup>۱</sup> kVA Margin to Maximum Loadability

<sup>۲</sup> Continuation Power Flow

مماس است و مرحله تصحیح بر پایه پخش بار ارائه شده در قسمت قبل استوار است.



شکل (۲): تئوری CPF

## ۲-۲- قیود مسئله

محدودیت‌های حاکم بر مسئله حذف بار عبارت‌اند از:

۱. محدودیت تساوی و تعادل بین توان اکتیو (و راکتیو) تولیدی و مصرفی و همچنین تلفات توان اکتیو (و راکتیو) شبکه:

$$\sum_{i=1}^{N_{Bus}} (P_{Gi}^p - P_{Di}^p) - P_L^p = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{Bus}} (Q_{Gi}^p - Q_{Di}^p) - Q_L^p = 0 \quad (9)$$

که در این روابط،  $P_{Gi}^p, Q_{Gi}^p, P_{Di}^p, Q_{Di}^p, P_L^p, Q_L^p$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدی، مصرفی و تلفات شبکه می‌باشند.

۲. حذف بار در هر شینه باید در محدوده معینی باشد

$$P_{Di}^{\min} \leq P_{Di}^p \leq P_{Di}^0 \quad (10)$$

در این رابطه  $P_{Di}^0$  بار شینه قبل از اجرای طرح حذف بار،  $P_{Di}^p$  بار شینه پس از حذف بار و  $P_{Di}^{\min}$  محدوده مجاز بار قابل قطع توسط طرح حذف بار است که در این مقاله ۳۰٪ بار در هر شینه قابل حذف خواهد بود.

۳. ولتاژ کلیه شین‌ها در حالت ماندگار بعد از حذف بار بایستی در محدوده بهره‌برداری قرار گیرد.

$$V_i^{\min} \leq V_i^p \leq V_i^{\max} \quad (11)$$

در رابطه‌ی فوق  $V_i^{\min}, V_i^{\max}$  به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مجاز ولتاژ شین نام و  $n$  تعداد کل باس‌های سیستم است.  $V_i^p$  نیز ولتاژ شین نام بعد از اعمال حذف بار در سیستم است.

۴. حذف بار در سیستم در ضریب ثابت انجام خواهد شد.

$$\frac{\Delta P_{Di}}{P_{Di}^0} = \frac{\Delta Q_{Di}}{Q_{Di}^0} \quad (12)$$

برای حذف بار در ضریب ثابت باید به همان نسبت که توان اکتیو حذف می‌شود، توان راکتیو نیز حذف گردد تا ضریب ثابت باقی بماند.

برای درک بهتر مسئله، یک سیستم غیرخطی را با  $n$  معادله  $g(x) = 0, x \in \mathbb{R}$  در نظر بگیرید. با اضافه کردن پارامتر  $\lambda$  و یک معادله به سیستم  $x$  به وسیله تغییرات  $\lambda$  ردیابی می‌شود. در نتیجه  $f(x, \lambda) = 0$  از  $n+1$  معادله تشکیل شده است. این مجموع معادلات شامل معادلات پخش بار حاکم بر شبکه است. در اینجا  $x = (V, \delta)$  که همان اندازه و دامنه ولتاژ شین‌ها است. بنابراین به کمک رابطه (۱) مقادیر  $(x, \lambda)$  مشخص می‌شود.

نقش اصلی مرحله پیش‌بینی یافتن پاسخ بعدی در این فرایند است. روش خطی سازی در نقطه پاسخ فعلی  $(x^j, \lambda^j)$  برای یافتن بردار شیب  $z_j = [dx_j \quad d\lambda_j]^T$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندیس  $j$  در این قسمت بیانگر جواب فعلی و  $j+1$  مقدار جواب بعدی است.

$$f(x_j, \lambda_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{df}{dx} \Big|_{(x_j, \lambda_j)} = \nabla_x f \Big|_{(x_j, \lambda_j)} \frac{dx}{d\lambda} \Big|_{(x_j, \lambda_j)} + \frac{df}{d\lambda} \Big|_{(x_j, \lambda_j)} = 0 \quad (2)$$

$f(x_j, \lambda_j)$  معادلات پخش بار حاکم بر شبکه در شرایط فعلی  $j$

است. شیب خط مماس بر معادله پخش بار در جواب فعلی  $z$  را مشخص می‌کند.  $\nabla$  و  $\frac{d}{d\lambda}$  بیانگر علامت گرادیان و مشتق تقریب بردار شیب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau \Big|_{(x^j, \lambda^j)} = \frac{dx}{d\lambda} \Big|_{(x_j, \lambda_j)} \approx \frac{\Delta x \Big|_{(x_j, \lambda_j)}}{\Delta \lambda \Big|_{(x_j, \lambda_j)}} \quad (3)$$

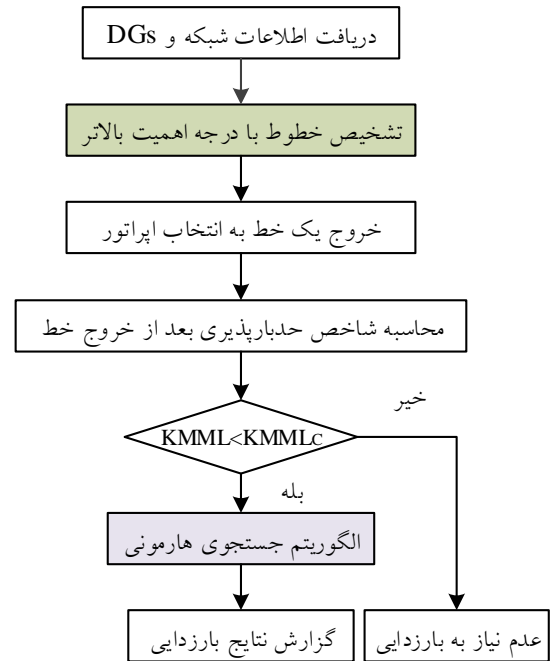
$\Delta$  بیانگر تغییرات اندک پارامتر است. با توجه به رابطه (۲) و (۳)

داریم:

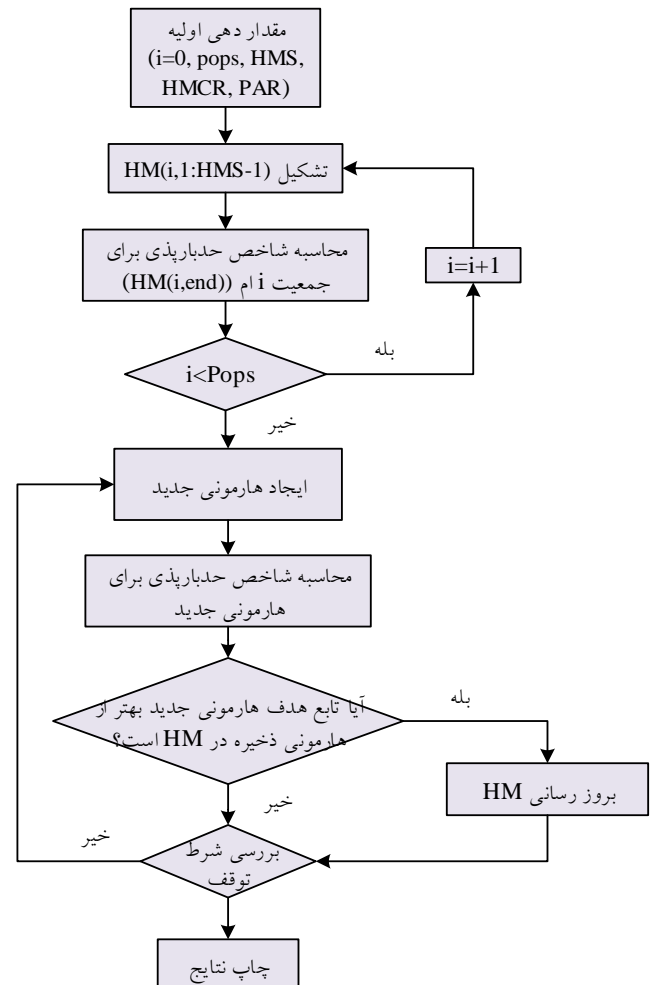
$$\tau \Big|_{(x_j, \lambda_j)} = -\nabla_y g \Big|_{(x_j, \lambda_j)}^{-1} \times \frac{dx}{d\lambda} \Big|_{(x_j, \lambda_j)} \quad (4)$$

$$\Delta x \Big|_{(x_j, \lambda_j)} = \tau \Big|_{(x_j, \lambda_j)} \Delta \lambda \Big|_{(x_j, \lambda_j)} \quad (5)$$

الگوریتم کلی مسئله حذف بار در شکل (۳) و الگوریتم هارمونی مورد استفاده در شکل (۴) آمده است.



شکل (۳): الگوریتم مسئله حذف بار پیشنهادی



شکل (۴): الگوریتم بهینه‌سازی هارمونی

تشخیص خط با درجه اهمیت بالاتر به این صورت است که خطوط یکی یکی و جداگانه از مدار خارج می‌شوند و سپس مقدار شاخص حد بارپذیری برای آن محاسبه می‌شود. هر خطی که دارای شاخص کمتر باشد، از درجه اهمیت بالاتری برخوردار است. چراکه با خروج آن شبکه دچار ناپایداری بیشتر می‌شود.

الگوریتم هارمونی مورد استفاده در مقاله دارای پنج مرحله است [۲۲]. این مراحل در شکل (۴) آمده است که جزئیات بیشتری از آن در ادامه آورده می‌شود:

مرحله اول (مقداردهی اولیه به پارامترهای مسئله): HMS سایز هارمونی، HMCR نرخ در نظر گرفتن حافظه هارمونی، PAR نرخ تنظیم قطعات، NI تعداد نرخ اصلاح، HM حافظه هارمونی مرحله دوم (مقداردهی HM): این ماتریس از میزان حذف بار در هر شین، مکان DG و تابع هدف تشکیل شده است.

$$HM = [LS \quad DG\_Place \quad OF]$$

$$LS = [LS_1 \quad LS_2 \quad \dots \quad LS_n] \quad (13)$$

$$DG\_Place = [DG_1 \quad DG_2 \quad \dots \quad DG_n]$$

مرحله سوم (ایجاد یک هارمونی جدید): بردار هارمونی جدید  $x'_i = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_N\}$  بر اساس یکی از روش‌های سه‌گانه انتخاب از حافظه، تنظیم قطعات و انتخاب تصادفی تشکیل می‌شود. الگوریتم کلی آن به صورت زیر است:

For each  $i \in [1, N]$  do  
 If  $rand < HMCR$   
 Then  $x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\}$   
 Else if  $rand < PAR$   
 Next,  $x'_i = x_i \pm rand(bw)$

برای آنکه الگوریتم دارای توانایی کاوش و جستجوی بالاتری باشد، بنابراین مقادیر  $PAR$  و  $bw$  در طول الگوریتم به نحو مناسبی بر اساس روابط زیر تنظیم می‌شود.

$$PAR(i) = PAR_{min} + \frac{PAR_{max} - PAR_{min}}{NI} i \quad (14)$$

$$BW(i) = BW_{max} \exp\left(\frac{Ln\left(\frac{BW_{max}}{BW_{min}}\right)}{NI} i\right) \quad (15)$$

بنابراین با افزایش تکرارها مقدار  $PAR$  افزایش و مقدار  $BW$  کاهش می‌یابد. این بدین مفهوم است که در تکرارهای ابتدایی، الگوریتم سعی در جستجو در کل فضای نمونه دارد که هیچ جوابی را از دست ندهد و در نهایت با افزایش تکرارها فضای جواب را به جستجو نزدیک جواب بهینه محدود می‌کند.

مرحله چهارم (به‌روزرسانی HM): چنانچه هارمونی جدید دارای تابع هدف بهتر از بدترین جواب موجود در HM باشد، جایگزین آن می‌شود.

مرحله پنجم (بررسی شرط توقف): چنانچه شرط توقف اتفاق بیفتد، حل مسئله به پایان می‌رسد و نتایج گزارش می‌گردد.

### ۳- پیاده‌سازی طرح حذف بار در شبکه‌های

#### نمونه

برای بررسی عملکرد طرح حذف بار پیشنهادی، این طرح حذف بار بر روی شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE اجرا می‌شود.

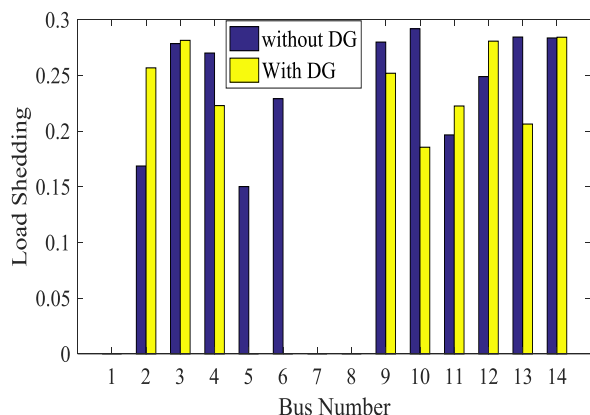
#### ۳-۱- پیاده‌سازی بر روی شبکه ۱۴ شینه IEEE

شکل (۵)، شبکه ۱۴ شینه شامل ۲ ژنراتور، ۱۱ مصرف‌کننده و ۲۰ خط انتقال را نشان می‌دهد. بروز اختلالاتی مانند خروج تک‌خطی، از جمله اختلالات مرسوم در سیستم‌های قدرت است.

ماتریس حوادث سیستم که بر اساس تأثیر خروج خط بر حاشیه پایداری ولتاژ مرتب‌شده است و در آن اولویت نخست متعلق به بحرانی‌ترین خطی است که در اثر خروج آن، حاشیه پایداری سیستم دارای کمترین مقدار خود است، در سطرهای بعد حاشیه پایداری مربوط به خط خارج‌شده افزایش می‌یابد. این ماتریس که در جدول ۱ آورده شده است شامل شاخص‌هایی مانند حاشیه پایداری ولتاژ و اضافه‌بار خطوط است.

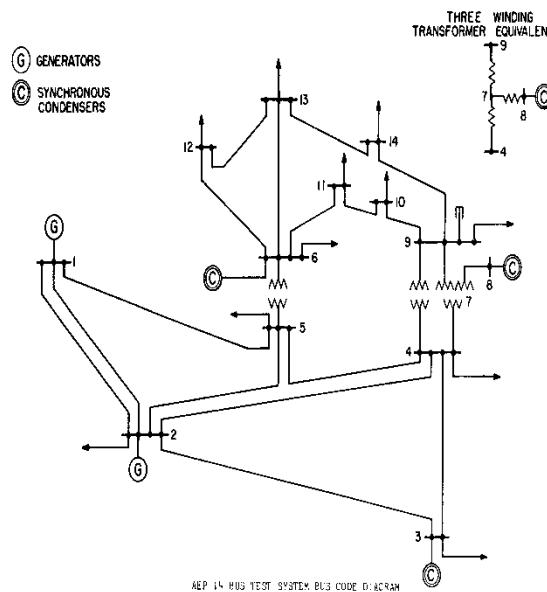
جدول (۱): ماتریس اولویت‌بندی حوادث سیستم ۱۴ شینه IEEE

اولویت	شماره خط خروجی	حد بارپذیری
۱	۱	۰/۲۲۹۴
۲	۳	۰/۸۴۸۶
۳	۱۰	۰/۸۹۸۲
۴	۱۵	۱/۲۹۷۱
۵	۱۳	۱/۵۱۵۵
۶	۴	۱/۵۲۴۶
۷	۲۰	۱/۵۴۸
۸	۵	۱/۶۳۱۳
۹	۱۱	۱/۷۲۲۲
۱۰	۸	۱/۷۵۴۴
۱۱	۲	۱/۷۸۶۲
۱۲	۱۷	۱/۸۰۰۱
۱۳	۱۸	۱/۸۵۵۲
۱۴	۷	۱/۹۶۹۱
۱۵	۹	۱/۹۷۸۲
۱۶	۶	۱/۹۷۹۶
۱۷	۱۲	۲/۰۰۲۴
۱۸	۱۶	۲/۰۲۰۴
۱۹	۱۹	۲/۰۳۳۸
۲۰	حالت پایه	۲/۰۴۰۲



شکل (۶): مقایسه بار حذف‌شده در هر شین در حضور و عدم حضور DG

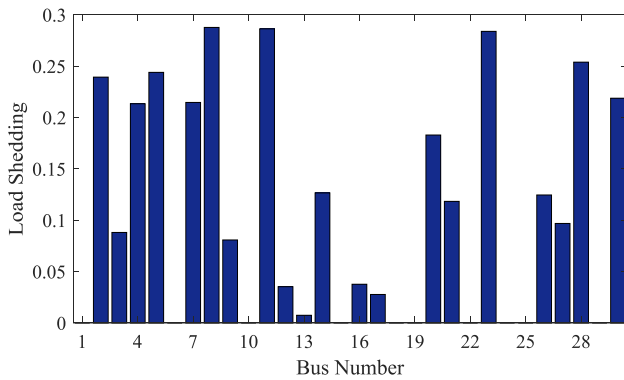
**سناریو دوم:** در این سناریو تأثیر جایابی یک DG با ظرفیت ۲۵۰ کیلووات با ضریب توان ۰/۹۵ پس فاز بر روی مسئله حذف بار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با بهره‌گیری از الگوریتم پیشنهادی جواب بهینه به دست می‌آید. بر این اساس DG در شین ۹ ام قرار می‌گیرد که حد بارپذیری شبکه به ۳/۶۱۳ بهبود می‌یابد. میزان بار حذف‌شده



شکل (۵): شبکه ۱۴ شینه IEEE پس از خروج خط

با خروج خط ۲ از مدار، شبکه دچار یک اغتشاش می‌شود که اطلاعات حالت پایه آن در ردیف ۱۱ جدول (۱) آمده است. در ادامه دو سناریو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سناریو اول فرض می‌گردد که تنها حذف بار انجام می‌شود و در سناریو دوم علاوه بر حذف بار، یک DG در شبکه جایابی می‌شود.

**سناریو اول:** با بهره‌گیری از الگوریتم پیشنهادی حذف بار به جواب بهینه همگرا می‌شود و می‌تواند حد بارپذیری شبکه را به ۲/۵۹۷ بهبود داد. بنابراین شبکه ۰/۴۵ بهبود در حد پایداری ولتاژ مواجه است. در این سناریو میزان بار حذف‌شده از هر شین به صورت پریونیت در



شکل (۸): میزان حذف بار در جواب سناریو اول

جدول (۲): ماتریس اولویت بندی حوادث سیستم ۳۰ شینه IEEE

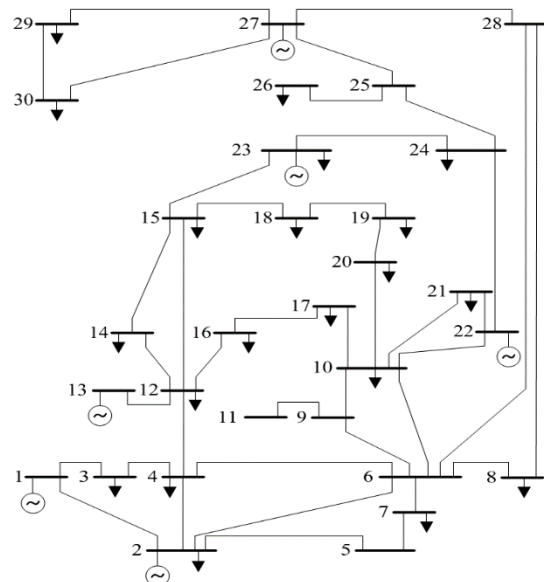
اولویت	شماره خط خروجی	حد بارپذیری
۱	۱۰	۰/۶۸۰۱
۲	۳۸	۱/۱۳۶۵
۳	۳۷	۱/۴۹۸۷
۴	۲۵	۱/۷۲۹۶
۵	۲۴	۲/۰۹۶۳
۶	۳۹	۲/۱۴۵۱
۷	۷	۲/۱۹۲۴
۸	۶	۲/۳۰۰۸
۹	۸	۲/۳۶۰۴
۱۰	۵	۲/۳۶۲۴
۱۱	۲۹	۲/۳۷۶۷
۱۲	۲۲	۲/۴۴۷۴
۱۳	۳	۲/۵۴۷۸
۱۴	۱	۲/۵۷۲۲
۱۵	۲	۲/۶۳۹
۱۶	۴	۲/۶۸۵
۱۷	۳۶	۲/۷۳۹۳
۱۸	۲۷	۲/۸۰۲۵
۱۹	۳۰	۲/۸۳۵۸
۲۰	۴۰	۲/۸۳۶۴
۲۱	حالت پایه	۱/۶۵۸۷

در هر شین در شکل (۶) آمده است. لذا DG باعث می‌گردد که حد بارپذیری شبکه افزایش یابد و شاخص انحرافات ولتاژ بهتر می‌شود.

با توجه به شکل (۶) میزان بار حذف شده در هر دو سناریو در شین‌های شماره ۱، ۷ و ۸ صفر است. باید توجه داشت که در این شین‌ها بار وجود ندارد. با توجه به شکل مذکور به جز در شین ۲ که حذف بار در سناریو دوم از سناریو اول به‌طور محسوسی بیشتر است، در بقیه شین‌ها کمتر یا تقریباً یکسان است؛ این در حالی است که در سناریو دوم حذف بار در شین ۵ و ۶ ام اتفاق نمی‌افتد. مجموع توان اکتیو و راکتیو حذف شده در سناریو اول ۶۷/۷ مگا وات و ۱۸/۵ مگا وار است؛ این در حالی است که در سناریو دوم این رقم به ۶۱/۳ مگا وات و ۱۶/۵ مگا وار کاهش می‌یابد. لذا جایابی بهینه یک DG ۲۵۰ کیلو واتی در شبکه سبب بهبود ۶/۴ مگا وات و ۲ مگا واری در حذف توان شبکه می‌شود. بنابراین استفاده از DG در برنامه‌ریزی اولویت خاموشی و حذف بار سودمند است.

### ۳-۲- پیاده‌سازی بر روی شبکه ۳۰ شینه IEEE

شکل (۷) شبکه ۳۰ شینه شامل ۲ ژنراتور، ۱۱ مصرف‌کننده و ۴۱ خط انتقال را نشان می‌دهد. بروز اختلالاتی مانند خروج تک‌خطی، از جمله اختلالات مرسوم در سیستم‌های قدرت است. جدول (۲) ماتریس اولویت بندی حوادث را برای ۲۰ خط دارای اولویت بالاتر به همراه حالت پایه را نشان می‌دهد.



شکل (۷): شبکه ۳۰ شینه IEEE

#### سناریو دوم: در این سناریو فرض می‌گردد که یک DG با

ظرفیت ۲۵۰ کیلووات در شبکه جایابی می‌شود. با بهره‌گیری از الگوریتم پیشنهادی شبکه با بهبود حد بارپذیری به ۳/۲۲ روبرو می‌شود. در این حالت مکان DG شین ۲۱ ام است و تعداد باسهایی که در حذف بار شرکت می‌کنند، ۹ عدد است. برای درک بهتر مسئله میزان توان اکتیو و راکتیو حذف شده از هر شین برحسب مگا وات و

سناریو اول: با خروج خط ۳۸ از مدار، شبکه دچار یک اغتشاش می‌شود که اطلاعات حالت پایه آن در ردیف ۲ جدول ۲ آمده است. با بهره‌گیری از الگوریتم پیشنهادی حذف بار، میزان حد بارپذیری برابر ۱/۶۵۸۷ به دست می‌آید که میزان حذف بار در شکل (۸) نمایش داده شده است.

- Renewable Energy Sources', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 118, p. 105735.
- [4] Xie, J., Liu, C.-C., Sforza, M., and Xu, Y., 'Consensus Weighting of a Multi-Agent System for Load Shedding', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 117, p. 105615.
- [5] Sapari, N.M., Mokhlis, H., Laghari, J.A., Bakar, A.H.A., and Dahalan, M.R.M., 'Application of Load Shedding Schemes for Distribution Network Connected with Distributed Generation: A Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, pp. 858-867.
- [6] Laghari, J.A., Mokhlis, H., Bakar, A.H.A., and Mohamad, H., 'Application of Computational Intelligence Techniques for Load Shedding in Power Systems: A Review', *Energy Conversion and Management*, 2013, 75, pp. 130-140.
- [7] Zare, F., Ranjbar, A., and Faghihi, F., 'Intelligent Topology-Oriented Ls Scheme in Power Systems Integrated with High Wind Power Penetration', *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14, (9), pp. 1684-1693.
- [8] Atighechi, H., Hu, P., Ebrahimi, S., Lu, J., Wang, G., and Wang, L., 'An Effective Load Shedding Remedial Action Scheme Considering Wind Farms Generation', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 95, pp. 353-363.
- [9] Aparicio, N., Añó-Villalba, S., Belenguer, E., and Blasco-Gimenez, R., 'Automatic under-Frequency Load Shedding Mal-Operation in Power Systems with High Wind Power Penetration', *Mathematics and Computers in Simulation*, 2018, 146, pp. 200-209.
- [10] Liu, H., Wang, B., Wang, N., Wu, Q., Yang, Y., Wei, H., and Li, C., 'Enabling Strategies of Electric Vehicles for under Frequency Load Shedding', *Applied Energy*, 2018, 228, pp. 843-851.
- [11] Shemami, M.S., Alam, M.S., and Asghar, M.J., 'Load Shedding Mitigation through Plug-in Electric Vehicle-to-Home (V2h) System', in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, (IEEE, 2017)
- [12] Dreidy, M., Mokhlis, H., and Mekhilef, S., 'Application of Meta-Heuristic Techniques for Optimal Load Shedding in Islanded Distribution Network with High Penetration of Solar Pv Generation', *Energies*, 2017, 10, (2), p. 150.
- [13] Sapari, N., Mokhlis, H., Laghari, J.A., Bakar, A., and Dahalan, M., 'Application of Load Shedding Schemes for Distribution Network Connected with Distributed Generation: A Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, pp. 858-867.
- [14] Das, K., Nitsas, A., Altin, M., Hansen, A.D., and Sørensen, P.E., 'Improved Load-Shedding Scheme Considering Distributed Generation', *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 32, (1), pp. 515-524.
- [15] Narayanan, K., Siddiqui, S.A., and Fozdar, M., 'Hybrid Islanding Detection Method and Priority-Based Load Shedding for Distribution Networks in the Presence of Dg Units', *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11, (3), pp. 586-595.
- [16] Arya, L., Singh, P., and Titare, L., 'Differential Evolution Applied for Anticipatory Load Shedding with Voltage Stability Considerations', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 42, (1), pp. 644-652.
- [17] Tang, J., Liu, J., Ponci, F., and Monti, A., 'Adaptive Load Shedding Based on Combined Frequency and Voltage Stability Assessment Using Synchronphasor

مگا وار در جدول (۳) آمده است. نباید فراموش کرد که در شبکه ۳۰ شینه استاندارد ۱۰ شین فاقد هرگونه بار اکتیو و راکتیو می‌باشند که این شین‌ها در جدول (۳) بارنگ سبز نمایش داده شده است. در این سناریو مجموع حذف توان اکتیو و راکتیو در شبکه به ترتیب ۱۲/۹ مگا وات و ۶/۱ مگا وار است. این در حالی است که در سناریو اول مقادیر بار حذف شده ۳۳/۲ مگا وات و ۲۱/۲ مگا وار است.

جدول (۳): میزان حذف بار در سناریو دوم

شماره شین	P	Q	شماره شین	P	Q
۱	۰	۰	۱۶	۰	۰
۲	۰	۰	۱۷	۰/۱۸	۰/۱۲
۳	۰/۵۸	۰/۲۹	۱۸	۰	۰
۴	۲/۱۱	۰/۴۴	۱۹	۰	۰
۵	۰	۰	۲۰	۰	۰
۶	۰	۰	۲۱	۴/۷۷	۳/۰۶
۷	۰	۰	۲۲	۰	۰
۸	۰	۰	۲۳	۰/۷	۰/۳۵
۹	۰	۰	۲۴	۰/۲۴	۰/۱۹
۱۰	۰	۰	۲۵	۰	۰
۱۱	۰	۰	۲۶	۰	۰
۱۲	۱/۴۵	۰/۹۷	۲۷	۰	۰
۱۳	۰	۰	۲۸	۰	۰
۱۴	۰	۰	۲۹	۰/۵۷	۰/۲۱
۱۵	۰	۰	۳۰	۲/۳۲	۰/۴۲

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله طرح حفاظتی حذف بار پیشنهادی جهت بار زدایی بهینه در اثر بروز اختلال در سیستم قدرت در حضور DG بر روی شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE پیاده‌سازی و جهت به دست آوردن الگوی بهینه حذف بار، از روش بهینه‌سازی HSA استفاده شده است. از پاسخ‌ها نتیجه گرفت که استفاده از DG می‌تواند شاخص حد بارپذیری را بهبود بخشد و درصد کمتری بار از شبکه حذف شود.

#### مراجع

- [1] Bakar, N.N.A., Hassan, M.Y., Sulaima, M.F., Mohd Nasir, M.N.i., and Khamis, A., 'Microgrid and Load Shedding Scheme During Islanded Mode: A Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71, pp. 161-169.
- [2] Xie, S., Hu, Z., Yang, L., and Wang, J., 'Expansion Planning of Active Distribution System Considering Multiple Active Network Managements and the Optimal Load-Shedding Direction', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 115, p. 105451.
- [3] Rafinia, A., Moshtagh, J., and Rezaei, N., 'Stochastic Optimal Robust Design of a New Multi-Stage under-Frequency Load Shedding System Considering



**ابوالفضل شعبانی اصل** در جهرم متولدشده است (۱۳۶۱). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون (۱۳۸۴) و کارشناسی ارشد از دانشگاه آزاد اسلامی واحد جهرم (۱۳۹۷) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی ایشان در زمینه منابع تولید پراکنده، بررسی پایداری ولتاژ شبکه و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است. در حال حاضر کارشناس نظارت بر بهره‌برداری در حوزه ستادی شرکت توزیع نیروی برق استان فارس است.

- Measurements', *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28, (2), pp. 2035-2047.
- [18] Xu, Y., Dong, Z.Y., Luo, F., Zhang, R., and Wong, K.P., 'Parallel-Differential Evolution Approach for Optimal Event-Driven Load Shedding against Voltage Collapse in Power Systems', *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2013, 8, (4), pp. 651-660.
- [19] Hamid, Z.A. and Musirin, I., 'Optimal Fuzzy Inference System Incorporated with Stability Index Tracing: An Application for Effective Load Shedding', *Expert systems with applications*, 2014, 41, (4), pp. 1095-1103.
- [20] Tamilselvan, V. and Jayabarathi, T., 'A Hybrid Method for Optimal Load Shedding and Improving Voltage Stability', *Ain Shams Engineering Journal*, 2016, 7, (1), pp. 223-232.
- [21] Hemmatpour, M.H., Mohammadian, M., and Gharaveisi, A.-A., 'Simple and Efficient Method for Steady-State Voltage Stability Analysis of Islanded Microgrids with Considering Wind Turbine Generation and Frequency Deviation', *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10, (7), pp. 1691-1702.
- [22] Hemmatpour, M., Mohammadian, M., and Rashidinejad, M., 'A Novel Reconfiguration Mixed with Distributed Generation Planning Via Considering Voltage Stability Margin', *AUT Journal of Electrical Engineering*, 2011, 43, (1), pp. 23-34.

## رزومه



**محمدحسین همت پور** در جهرم متولدشده است (۱۳۶۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در دانشگاه شهید باهنر کرمان (در سال‌های ۱۳۸۸، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۵) به‌عنوان فارغ‌التحصیل رتبه اول سپری کرده است.

فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کنترل و بهره‌برداری از ریز شبکه‌ها و سیستم‌های توزیع، روش‌های بهینه‌سازی و مدل‌سازی منابع تولید پراکنده است. در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه جهرم است.



**محمدحسین رضائیان کوچی** در فسا متولدشده است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۸۸)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - حفاظت سیستم‌های قدرت از دانشگاه

علم و صنعت ایران (۱۳۹۱) و دکتری مهندسی برق - قدرت از دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۹۶) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی‌های ایشان در زمینه دینامیک و حفاظت سیستم‌های قدرت و همچنین استفاده از داده‌کاوی در بخش‌های مختلف سیستم قدرت است.

## Under Voltage Load Shedding Scheme in the Presence of DGs

Mohammad Hasan Hemmatpour<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Rezaeian Koochi<sup>2</sup>, Abolfazl Shabani-Asl<sup>3</sup>

1-Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Jahrom University, Jahrom, Iran

2-Ph.D - Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

3-MSc, Department of Electrical and Computer Engineering, Jahrom Branch, Islamic Azad University, Jahrom, Iran

**Abstract:** Nowadays, distributed generation (DG) is widely used in power systems. However, the use of DGs has caused new challenges in different aspects of power system operation, one of which is the effect of DGs on the optimal load shedding. Load shedding is a remedial action triggered after disturbances such line tripping. In fact, due to the line outage, the power flowing through other lines will increase which may cause protection systems to operate to trip the overloaded lines and in severe cases result in the system collapse. In this paper, a general load shedding method is proposed to prohibit the system from moving toward collapsing and helping the system to restore in the presence of DGs. In the proposed method, firstly the most critical line whose outage leads to the minimum values of stability indices is determined. Then, after putting this line out of service, harmony search algorithm is used to find the minimum amount of load shedding as well as the optimal location of DGs so that the loadability of the system is maximized preventing the system to collapse. The efficacy of the proposed methodology is demonstrated through applying it on IEEE 14 and 30-bus systems using various scenarios.

**Keywords:** Harmony search algorithm, voltage stability, load shedding, distributed generation.