طرح حذف بار ولتاژی در حضور منابع تولید پراکنده

محمدحسن همت پور[۱*]، محمدحسین رضائیان کوچی[۲]، ابوالفضل شعبانی اصل[۳،۴]

*۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران، m.h.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 درنتیجه فروپاشی شبکه را به همراه داشته باشد. در این مقاله یک روش جامع حذف بار ولتاژی7 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 موردمطالعه قرار می‌گیرد.

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

۱- مقدمه

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 تبدیل‌شده است. ازیک‌طرف 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 یک‌فاصله مطمئن از ناپایداری نگه‌دارند. 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 درنهایت کاهش سریع آن‌هاست و لذا دورنگه داشتن سیستم قدرت از نقطه ناپایداری از اهداف مهم مهندسین برق هست. از طرفی امروزه با توجه به رقابتی شدن صنعت 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 موردمطالعه 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 قابل‌حل خواهد بود.

حذف بار به‌عنوان آخرین راهکار عملیاتی در ریز شبکه‌ها [۱]، سیستم‌های توزیع [۲] و سیستم‌های انتقال قدرت [۳] بکار برده

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020

می‌شود که می‌تواند درزمینه دینامیکی [۴] و استاتیکی [۳] موردمطالعه 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 قرارگرفته 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] موردمطالعه قرارگرفته‌اند. 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.

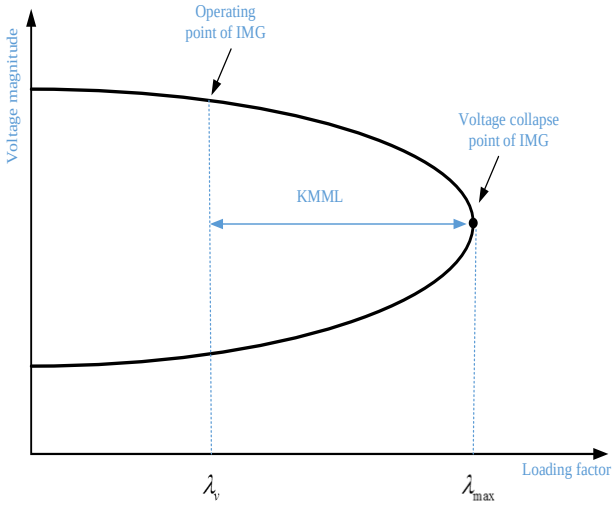
آریا و همکارانش در [۱۶] برای حذف بار بهینه بر پایه بهبود پایداری ولتاژ روشی ارائه داده‌اند. شین‌های بار بر اساس حداقل مقدار حساسیت ماتریس ژاکوبین پخش بار مرتب‌شده و حذف بار بر اساس آن به کمک الگوریتم تفاضلی صورت می‌پذیرد. در [۱۷] حذف بار فرکانسی و ولتاژی بر اساس تاریخچه اتفاقات رایج در شبکه موردمطالعه 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 به‌منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ استفاده‌شده 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 به‌صورت مدل دو هدفه سلسه‌مراتبی مطرح می‌شود. تابع هدف مسئله پیشنهادی حداکثر سازی حد بارپذیری شبکه است. همانند سیستم‌های قدرت متداول از روش *KMML*[۱] 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[۲] 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 تغییرات نسبتاً سریع‌تری دارند، متغیر سیستم و متغیرهایی همچون توان اکتیو و راکتیو بارها که تغییرات نسبتاً آهسته‌تری دارند، متغیرهای عامل نامیده می‌شوند.



شکل (۱): ترسیم شاخص KMML

چنانچه یک متغیر همچون ولتاژ برحسب یک عامل همچون توان حقیقی رسم شود، یک منحنی P-V (یا λ-V) به دست می‌آید. همان‌گونه که می‌دانیم، این منحنی دارای دونقطه تعادل است. اگر توان اکتیو مصرف‌کننده 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 همان‌گونه که بیان شد، یک‌دو شاخگی بر اساس یک تغییر اساسی در ساختار پایداری سیستم رخ می‌دهد. برخی از این دوشاخگی‌ها، دوشاخگی ناشی از محدودیت (LIB[۳]) و برخی ناشی از دوشاخگی زینی (SNB[۴]) می‌باشند. با رسیدن یکی از متغیرهای شبکه (شامل متغیرهای بهره‌برداری یا تجهیزات) به حد خود، یک LIB رخ می‌دهد.

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

این روش به صورت دیاگرام $(x^j,\lambda^j) \xrightarrow{\text{Predictor}} (\hat{x}^{j+1},\hat{\lambda}^{j+1}) \xrightarrow{\text{Corrector}} (x^{j+1},\lambda^{j+1})$ براساس شکل (۲) نمایش داده می‌شود. که در آن (x^j,λ^j) بیانگر نقطه فعلی حل مسئله، $(\hat{x}^{j+1},\hat{\lambda}^{j+1})$ نقطه پیش‌بینی‌شده و (x^{j+1},λ^{j+1}) نقطه تصحیح‌شده بر روی منحنی است. مرحله پیش‌بینی بر اساس بردار خط

[۱] *kVA* Margin to Maximum Loadability

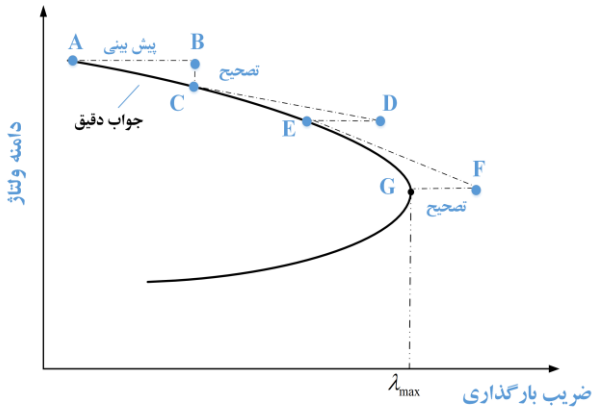
[۲] Continuation Power Flow

[۳] Limited Induced Bifurcation

[۴] Saddle Node Bifurcation

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

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



شکل (۲): تئوری CPF

برای درک بهتر مسئله، یک سیستم غیرخطی را با n معادله $g(x)=0, x\in R$ در نظر بگیرید. با اضافه کردن پارامتر λ و یک معادله به سیستم x به‌وسیله تغییرات λ ردیابی می‌شود. درنتیجه f (x, λ) =0 از n+۱ معادله تشکیل‌شده است. این مجموع معادلات شامل معادلات پخش بار حاکم بر شبکه است. در اینجا $x=(V,\delta)$ که همان اندازه و دامنه ولتاژ شین ها است. بنابراین به کمک رابطه (۱) مقادیر (x,λ) مشخص می شود.

نقش اصلی مرحله پیش‌بینی یافتن پاسخ بعدی در این فرایند است. روش خطی سازی در نقطه پاسخ فعلی (x^j,λ^j) برای یافتن بردار شیب $z_j=[dx_j \;\; d\lambda_j]^T$ مورداستفاده قرار می‌گیرد. اندیس j در این قسمت بیانگر جواب فعلی و j+۱ مقدار جواب بعدی است.

$$f\ (x_j,\lambda_j)\ =\ 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{df}{dx}|_{(x_j,\lambda_j)}= \qquad (۲)$$

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

$f\ (x_j,\lambda_j)$ معادلات پخش بار حاکم بر شبکه در شرایط فعلی j است. $\frac{df}{dx}|_{(x_j,\lambda_j)}$ شیب خط مماس بر معادله پخش بار در جواب فعلی j را مشخص می کند. ∇ و $\frac{d}{d\lambda}$ بیانگر علامت گرادیان و مشتق است.

تقریب بردار شیب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau|_{(x^j,\lambda^j)}=\frac{dx}{d\lambda}|_{(x_j,\lambda_j)}\approx\frac{\Delta x|_{(x_j,\lambda_j)}}{\Delta\lambda|_{(x_j,\lambda_j)}} \qquad (۳)$$

Δ بیانگر تغییرات اندک پارامتر است. با توجه به رابطه (۲) و (۳) داریم:

$$\tau|_{(x_j,\lambda_j)}=-\nabla_y g\,|^{-1}_{(x_j,\lambda_j)}\times\frac{dx}{d\lambda}|_{(x_j,\lambda_j)} \qquad (۴)$$

$$\Delta x\,|_{(x_j,\lambda_j)}=\tau|_{(x_j,\lambda_j)}\,\Delta\lambda|_{(x_j,\lambda_j)} \qquad (۵)$$

براساس تعیین گام CPF ($\Delta\lambda|_{(x_j,\lambda_j)}$) و به کمک بردار شیب خط مماس $\tau|_{(x_j,\lambda_j)}$ (رابطه (۴)) تغییرات $x|_{(x_j,\lambda_j)}=(V,\delta)|_{(x_j,\lambda_j)}$ به کمک رابطه (۵) محاسبه می شود.

برای بالا بردن قدرت الگوریتم پیش‌بینی و اثر دادن مسیر پیش‌بینی از ضریب کنترل 'k' استفاده می‌شود.

$$\Delta\lambda_{(x_j,\lambda_j)}\cong\frac{k}{\left\|\tau_{(x_j,\lambda_j)}\right\|} \qquad (۶)$$

$$\Delta y_{(x_j,\lambda_j)}\cong\frac{k\tau_{(x_j,\lambda_j)}}{\left\|\tau_{(x_j,\lambda_j)}\right\|} \qquad (۷)$$

مرحله تصحیح پاسخ با بهره‌گیری از روش نیوتن صورت می‌پذیرد.

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 :

$$\sum_{i=1}^{N_{Bus}}\left(P^p_{Gi}-P^p_{Di}\right)-P^p_L=0 \qquad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{Bus}}\left(Q^p_{Gi}-Q^p_{Di}\right)-Q^p_L=0 \qquad (۹)$$

که در این روابط، $P^p_{Gi},Q^p_{Gi},P^p_{Di},Q^p_{Di},P^p_L,Q^p_L$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدی، مصرفی و تلفات شبکه می‌باشند.

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

$$P^{\min}_{Di}\le P^p_{Di}\le P^0_{Di} \qquad (۱۰)$$

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

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

$$V_i^{\min}\le V_i^p\le V_i^{\max} \qquad (۱۱)$$

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

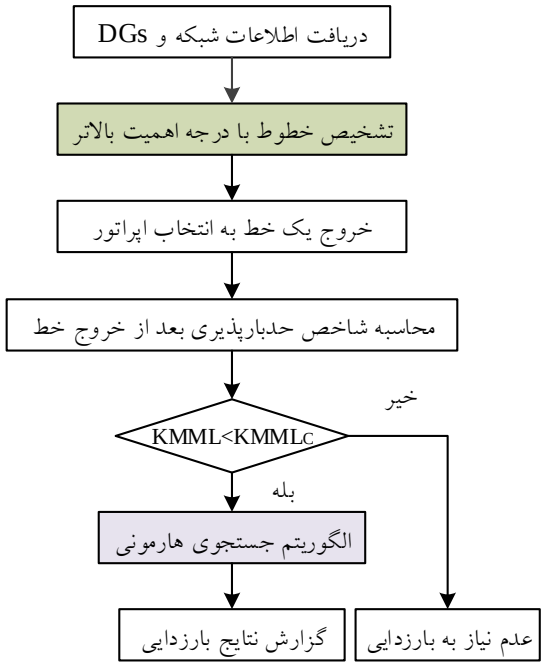
۴. حذف بار در سیستم در ضریب توان ثابت انجام خواهد شد.

$$\frac{\Delta P_{Di}}{P^0_{Di}}=\frac{\Delta Q_{Di}}{Q^0_{Di}} \qquad (۱۲)$$

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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

الگوریتم کلی مسئله حذف بار در شکل (۳) و الگوریتم هارمونی مورداستفاده در شکل(۴) آمد ه است.



شکل (۳): الگوریتم مسئله حذف بار پیشنهادی

تشخیص خط با درجه اهمیت بالاتر به این صورت است که خطوط یکی‌یکی 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 مورداستفاده در مقاله دارای پنج مرحله است [۲۲]. این مراحل در شکل (۴) آمده است که جزییات 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 تشکیل‌شده است.

$$HM = \left[\text{LS} \quad DG_Place \quad OF\right]$$
$$LS = \left[\text{LS}_1\ \text{LS}_2\ .....\ \text{LS}_n\right] \qquad (۱۳)$$
$$DG_Place = \left[DG_1\ \text{DG}_2\ .....\ \text{DG}_n\right]$$

مرحله سوم (ایجاد یک هارمونی جدید): بردار هارمونی جدید $x_i' = \{x_1', x_2', ..., x_N'\}$ بر اساس یکی از روش‌های سه‌گانه انتخاب از حافظه، تنظیم قطعات و انتخاب تصادفی تشکیل می‌شود. الگوریتم کلی آن به‌صورت زیر است:

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

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

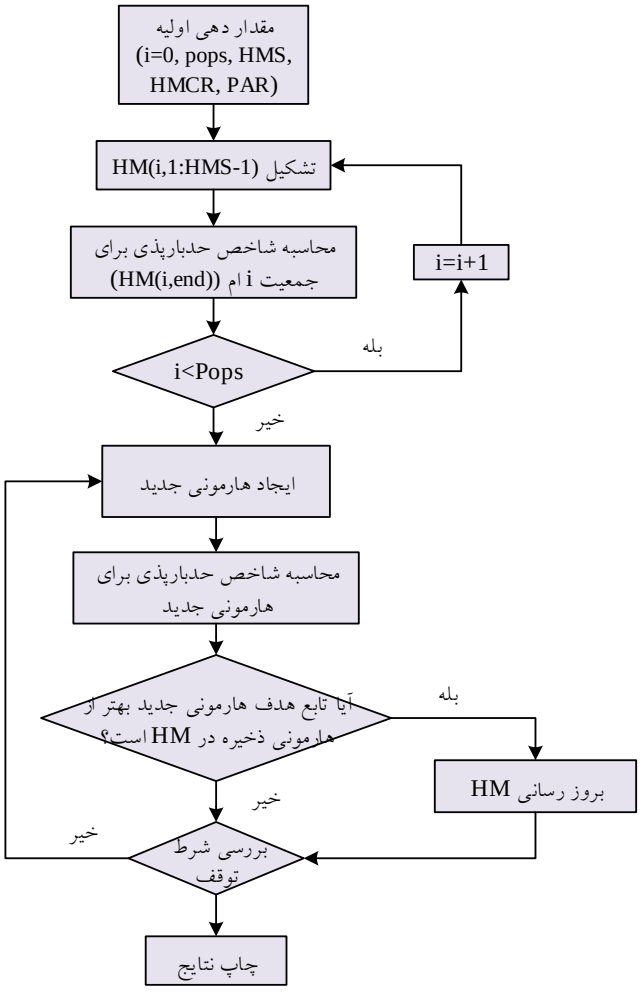
$$PAR(i) = PAR_{\min} + \frac{PAR_{\max} - PAR_{\min}}{NI} i \qquad (۱۴)$$

$$BW(i) = BW_{\max} \exp\left(\frac{Ln\left(BW_{\max}/BW_{\min}\right)}{NI} i\right) \qquad (۱۵)$$

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 درنهایت 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.



شکل (۴): الگوریتم بهینه‌سازی هارمونی

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

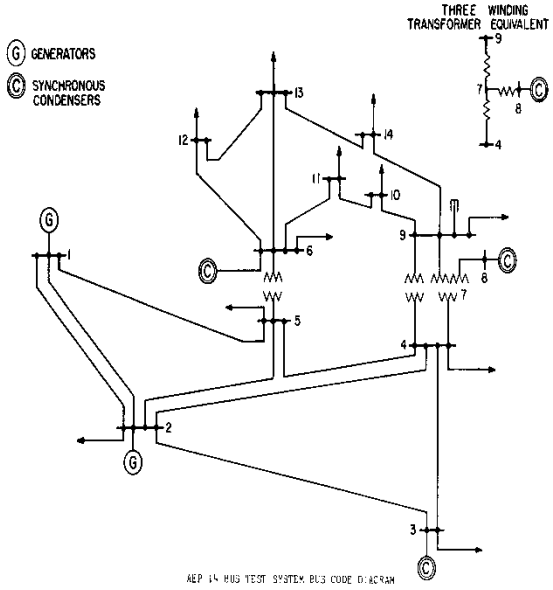
۳- پیاده‌سازی طرح حذف بار در شبکه‌های نمونه

برای بررسی عملکرد طرح حذف بار پیشنهادی، این طرح حذف بار بر روی شبکه‌های ۱۴و 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، ازجمله 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.



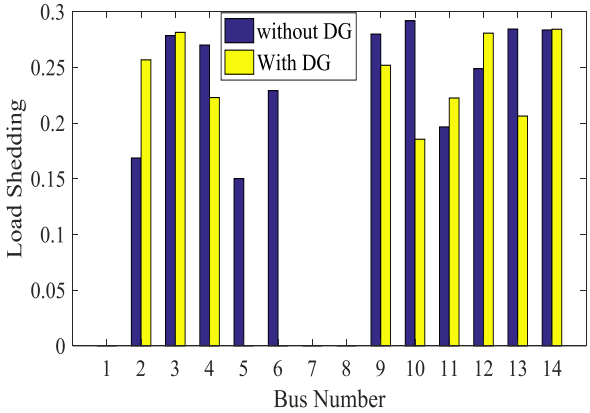
شکل (۵): شبکه ۱۴ شینه IEEE پس از خروج خط

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 موردبررسی 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 ۴۵٪ بهبود در حد پایداری ولتاژ مواجه است. در این سناریو میزان بار حذف‌شده از هر شین به‌صورت پریونیت در شکل (۶) به همراه میزان بار حذف‌شده سناریو دوم نشان داده‌شده 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	۱/۵۳۴۶
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 موردمطالعه 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

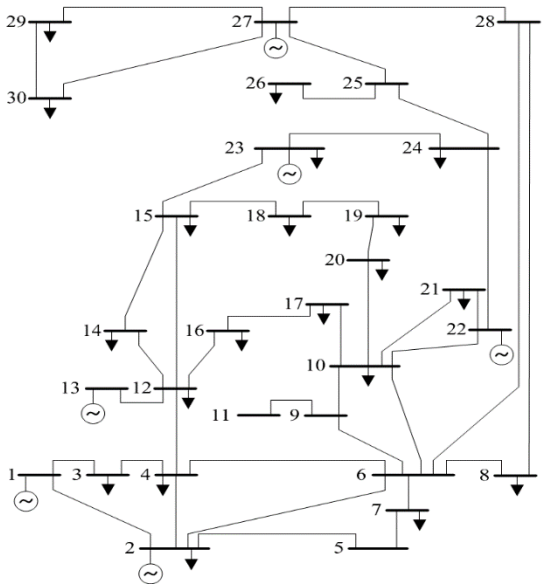
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

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 حذف‌شده 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 به‌جز 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 می یابد. لذا جایابی بهینه یک DG ۲۵۰ کیلو واتی در شبکه سبب بهبود ۶/۴ مگا وات و ۲ مگا واری در حذف توان شبکه می شود. بنابراین استفاده از DG در برنامه‌ریزی اولویت خاموشی و حذف بار سودمند است.

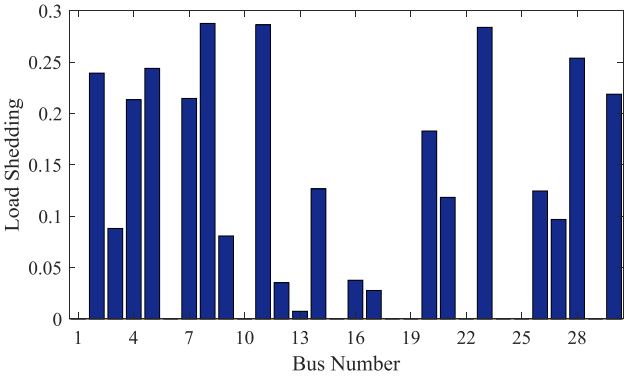
۳-۲- پیاده‌سازی بر روی شبکه ۳۰ شینه IEEE

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



شکل (۷): شبکه ۳۰ شینهIEEE

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 داده‌شده است.



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

جدول (۲): ماتریس اولویت‌بندی 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	۲/۳۰۸
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

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 حذف‌شده از هر شین برحسب مگا وات و

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

مگا وار در جدول (۳) آمده است. نباید فراموش کرد کـه در شـبکه ۳۰ شینه استاندارد ۱۰ شین فاقد هرگونه بار اکتیو و راکتیو می‌باشـند کـه این شین‌ها در جدول (۳) بارنگ سبز نمایش داده‌شـده اسـت. در ایـن 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 درسناریو 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- نتیجه‌گیری

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 جهـت بـه دسـت آوردن الگـوی بهینه حذف بـار، از روش بهینـه‌سـازی HSA اسـتفاده‌شـده اسـت. 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 Renewable Energy Sources', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 118, p. 105735.

[4] Xie, J., Liu, C.-C., Sforna, 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 Synchrophasor

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

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



محمدحسن 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 ۱۳۹۱،۱۳۸۸ و ۱۳۹۵) به‌عنوان فارغ تحصیل 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 درزمینه دینامیک و حفاظت سیستم‌های قدرت و همچنین استفاده از داده‌کاوی در بخش‌های مختلف سیستم قدرت است



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 درزمینه 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.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020

Under Voltage Load Shedding Scheme in the Presence of DGs

Mohammad Hasan Hemmatpour[1], Mohammad Hossein Rezaeian Koochi[2], Abolfazl Shabani-Asl[3]

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.**

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.2.3.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.2 Summer 2020