به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند در تعیین مقادیر نامی بهینه DVRها در ساختار IDVR با در نظر گرفتن تغییرات بار فیدرها

مجید مرادلو، استادیار، مهدی بیگدلی، استادیار، محمد جمادی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد

گروه مهندسی برق، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
m.bigdeli@srbiau.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند برای محاسبه مقادیر نامی بهینه بازیابنده‌های دینامیکی ولتاژ (DVR) در ساختار بازیابنده دینامیکی ولتاژ بین خطی (IDVR: Interline DVR) با در نظر گرفتن تغییرات بار فیدرها ارائه شده است. با توجه به محدودیت مبادله توان اکتیو بین DVRها در IDVR، انتخاب ولتاژ نامی مناسب برای هر کدام از DVRهای IDVR باید به گونه‌ای باشد که اولاً کمبودهای ولتاژ مورد نظر در هر کدام از فیدرها قابل جبران باشند و ثانیاً ولتاژ نامی DVRها بی‌دلیل بزرگ انتخاب نشوند تا هزینه کل IDVR کاهش یابد. بدین منظور در تحقیقات گذشته با تشکیل یک مسئله بهینه‌سازی و با فرض ثابت بودن بار فیدرها، ولتاژ نامی DVRها تعیین شده است. درحالی‌که تغییرات بار فیدرها در میزان توان اکتیو قابل مبادله بین DVRها تأثیرگذار بوده و لذا ولتاژ تزریقی DVRها تغییر خواهند کرد. در نتیجه، تغییرات بار فیدرها باید در مسئله بهینه‌سازی مذکور لحاظ گردد که این موضوع هدف اصلی این مقاله می‌باشد. با توجه به اینکه در عمل تعداد بازه‌های منحنی تغییرات بار فیدرها زیاد است، فضای جواب مسئله بهینه‌سازی مورد نظر بسیار بزرگ بوده و جستجوی تمام فضای جواب، امکان‌پذیر نیست. بنابراین استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند ضروری است. از اینرو در این مقاله پس از ارائه و تشریح استراتژی و الگوریتم پیشنهادی، مثال‌ها و نتایج عددی با استفاده از الگوریتم‌های PSO و GA در حالت‌های مختلف ارائه می‌شود. سپس به منظور اثبات قابلیت‌های روش پیشنهادی، مقایسه‌ای با نتایج به دست آمده از جستجوی تمام فضای جواب، انجام می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کیفیت توان، DVR، IDVR، کمبود ولتاژ، تغییرات بار، بهینه‌سازی، PSO، GA

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۲/۰۲

نام نویسنده‌ی مسئول: مهدی بیگدلی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، دانشکده برق و کامپیوتر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

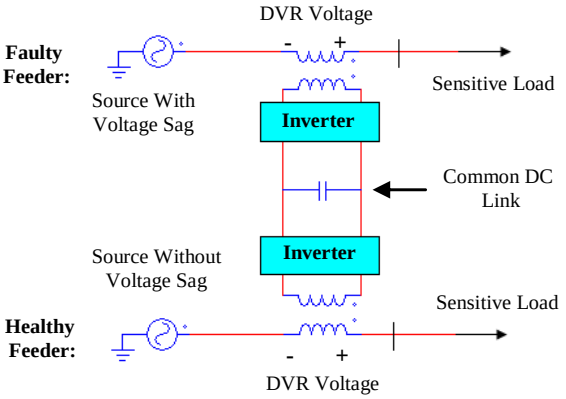
۱- مقدمه

کمبودهای ولتاژ (Voltage Sags) از مهم‌ترین پدیده‌های کیفیت توان هستند که خسارت‌های زیادی به مصرف‌کننده‌های صنعتی و تجاری وارد می‌کنند [۲-۱]. برای مقابله با این پدیده‌های مخرب، راهکارهای متعارفی چه در شبکه و چه در محل بارهای صنعتی ارائه شده‌اند که هر یک تا حدی اثرات مخرب این پدیده‌ها را کاهش می‌دهند. با پیشرفت روزافزون مبدل‌های الکترونیک قدرت، کاربرد ادوات مبتنی بر این مبدل‌ها با نام Custom Power در سیستم‌های توزیع به عنوان راهکاری مناسب و با قابلیت انعطاف بسیار بالا برای بهبود مسائل کیفیت توان پیشنهاد شده‌اند [۳]. یکی از این ادوات، DVR است.

DVR یک جبران‌کننده سری است که بین شبکه و بار نصب شده و هدف اصلی آن، حفاظت بار در مقابل کمبودها و بیشبودها (Swell) و نامتعادلی ولتاژ می‌باشد. این هدف به وسیله تزریق ولتاژ با دامنه و زاویه مناسب و به صورت سری در هر فاز تحقق می‌یابد. به گونه‌ای که در حین اختلال ولتاژ، ولتاژ بار در دامنه مطلوب و مجاز بازیابی گردد. جبران به وسیله DVR می‌تواند با و یا بدون تزریق توان اکتیو صورت بپذیرد. DVRها با توانایی تزریق توان اکتیو و انرژی، محدوده جبران وسیع‌تری دارند ولی نیازمند یک مبدل و یا یک منبع ذخیره کننده انرژی اضافی بوده و لذا هزینه بالاتری دارند [۷-۳].

در برخی از محیط‌های صنعتی مانند پارک‌های صنعتی به دلیل افزایش قابلیت اطمینان و سایر ملاحظات شبکه، تغذیه بارها از دو یا چند فیدر متصل به پست‌های متفاوت صورت می‌گیرد. این فیدرها از نظر الکتریکی از هم مستقل بوده ولی در محیط صنعتی مورد نظر از نظر مکانی به هم نزدیک هستند. در صورتی که در این محیط‌ها قرار باشد در هر فیدر مستقل از یک DVR به منظور جبران اختلال‌های ولتاژ استفاده شود آنگاه این DVRها قادر به مبادله توان اکتیو از طریق لینک dc خواهند بود. لذا در هنگام وقوع اختلال ولتاژ در یکی از فیدرها، توان اکتیو مورد نیاز برای عملکرد DVR واقع در آن فیدر را می‌توان از فیدر یا فیدرهای سالم دیگر دریافت نمود. این ساختار که در شکل (۱) برای دو DVR نشان داده شده است، IDVR یا بازیابنده دینامیکی ولتاژ بین خطی نام دارد [۹-۸]. قابلیت تبادل توان اکتیو بین DVRها در IDVR، موجب می‌شود که علاوه بر حذف نیاز به منابع ذخیره کننده انرژی و صرفه‌جویی در هزینه آن‌ها، محدوده جبران توسط DVR وسیع‌تر شود.

پس از ارائه ایده اولیه IDVR [۹-۸]، تحقیقات مختلفی در زمینه آن ارائه شده است. در [۱۰] یک نمونه آزمایشگاهی برای یک IDVR متشکل از دو DVR پیاده شده است. در [۱۱] استراتژی مینیمم انرژی متعارف برای عملکرد IDVR پیشنهاد گردیده که در آن، فیدر معیوب با استراتژی مینیمم انرژی کار کرده و فیدر سالم در جهت ثابت نگه‌داشتن ولتاژ لینک dc عمل می‌کند. در [۱۲] از استراتژی هم‌فاز برای عملکرد DVR واقع در فیدر معیوب و از روش امپدانس مجازی برای عملکرد DVR واقع در فیدر سالم استفاده گردیده است. در [۱۳]، مقایسه‌ای بین اینورتر منبع ولتاژ (VSI) و اینورتر منبع جریان (CSI) در IDVR به منظور جبران Voltage Sag و هارمونیک‌ها صورت پذیرفته است. در [۱۴] روش کنترلی مبتنی بر شبکه عصبی برای IDVR به منظور جبران کمبودها و بیشبودها و نامتعادلی ولتاژ ارائه شده است و در [۱۵] اینورتر منبع امپدانس (ZSI) به منظور افزایش قابلیت اطمینان و کاهش تعداد ادوات کلیدزنی در IDVR پیشنهاد گردیده است. در [۱۶]، تزریق انرژی از طریق DVR فیدر سالم به لینک dc به وسیله ترانسفورماتور شیفت فاز صورت پذیرفته است و در [۱۷] از باتری و یا سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر مانند سیستم فتوولتاییک برای تزریق انرژی به لینک dc و کمک به عملکرد IDVR استفاده گردیده است. در [۱۸] نیز با استفاده از تبادل توان اکتیو بین فیدرها در IDVR این امکان به وجود آمده که در شرایط عادی، ضریب توان جابجایی در فیدرها بهبود یابد. در [۱۹]، یک استراتژی برای محاسبه محدوده جبران انواع کمبودهای ولتاژ متعادل و نامتعادل در IDVR ارائه گردیده است.



شکل۱: ساختار IDVR متشکل از دو DVR

با توجه به این که ولتاژ نامی DVR تعیین‌کننده‌ی توان ظاهری نامی (جریان نامی DVR برابر با جریان نامی بار است) و لذا تعیین‌کننده‌ی قیمت و اندازه آن است، ارائه یک استراتژی مناسب برای انتخاب ولتاژ نامی DVRهای موجود در IDVR در حالت ماندگار ضروری به نظر می‌رسد. هر کدام از DVRهای IDVR در دو مد جبران (در هنگام وقوع اختلال ولتاژ در فیدر خود) و مد تزریق انرژی (در هنگام وقوع اختلال ولتاژ در فیدر مجاور) می‌توانند عمل کنند. همچنین با توجه به شرایط بار فیدرها (از لحاظ توان ظاهری و ضریب توان) و نیز ولتاژ نامی DVRها، در مقدار توان اکتیو قابل‌انتقال از فیدر سالم به فیدر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

معیوب محدودیت وجود دارد [۲۰-۱۹]. لذا استراتژی طراحی باید به گونه‌ای باشد که اولاً امکان جبران انواع مشخصه‌های اختلال ولتاژ مورد نظر در هر کدام از فیدرها را به وسیله ساختار IDVR فراهم سازد و ثانیاً، حداقل مقادیر نامی ممکن را برای ولتاژ DVR های موجود در ساختار IDVR با لحاظ کردن هر دو مد عملکرد آن‌ها انتخاب نماید. در [۲۰] با انتخاب "مینیمم سازی مجموع توان ظاهری نامی DVRها" به عنوان یک تابع هدف، مسئله بهینه‌سازی مورد نظر تشکیل شده و روابط و قیود لازم آن ارائه گردیده است. این مسئله برای جبران کمبودهای ولتاژ سه فاز متعادل در هر فیدر ارائه شده است.

بار هر کدام از فیدرها در محیط صنعتی ممکن است در طول شبانه‌روز دارای تغییرات از لحاظ توان ظاهری و ضریب توان باشند. نکته مهم این است که مسئله طراحی بهینه ارائه شده در [۲۰] فقط با در نظر گرفتن شرایط نامی برای بارهای هر دو فیدر صورت پذیرفته و منحنی تغییرات بار دو فیدر در نظر گرفته نشده است. درحالی‌که بر اساس [۲۰-۱۹]، توان اکتیو قابل‌انتقال از DVR فیدر سالم به DVR فیدر معیوب، به نسبت توان ظاهری بار دو فیدر و ضریب توان آن‌ها بستگی دارد. لذا تغییرات بار فیدرها می‌تواند روی توان مبادله شده DVRهای دو فیدر و همچنین ولتاژ تزریقی این DVRها اثرگذار باشد. بنابراین اگر مسئله طراحی بهینه فقط برای شرایط بار نامی صورت بپذیرد آنگاه ممکن است که ولتاژهای نامی محاسبه شده برای DVRها در IDVR جوابگوی جبران در شرایط تغییرات بار نباشد و یا این احتمال وجود خواهد داشت که ولتاژهای نامی DVRها بی‌دلیل بزرگ انتخاب شده باشند. لذا تغییرات بار فیدرها باید در مسئله طراحی بهینه IDVR مورد توجه قرار گیرد که این موضوع هدف اصلی این مقاله می‌باشد.

نکته مهم دیگری که باید به آن توجه شود این است که اگر تعداد بازه‌های تغییرات بار فیدرها زیاد باشد (در عمل چنین است)، تعداد متغیرهای مسئله زیاد شده و لذا فضای جواب مسئله بهینه‌سازی مورد نظر بسیار بزرگ بوده و عملاً استفاده از روش‌های کلاسیک و جستجوی کل فضای جواب مسئله، امکان‌پذیر نخواهد بود. بنابراین استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند برای حل این مسئله بهینه‌سازی ضروری است. به همین منظور در این مقاله از دو الگوریتم بهینه‌سازی کارآمد (PSO و GA) که توانایی آن‌ها قبلاً در حل مسائل بهینه‌سازی به اثبات رسیده، استفاده می‌شود. ضمناً با ارائه مثال‌های متنوع، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از این دو الگوریتم در حالت‌های مختلف ارائه می‌گردد.

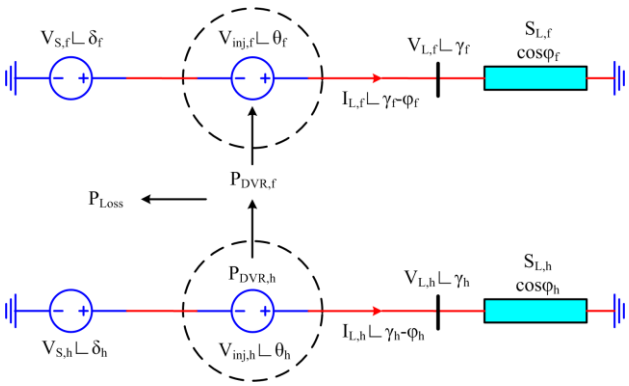
سایر بخش‌های مقاله بدین شرح است: در بخش (۲) به مدل‌سازی و تحلیل حالت ماندگار IDVR پرداخته شده است. بخش (۳) اختصاص به تشریح روابط، قیود و تابع هدف مسئله بهینه‌سازی مورد نظر یعنی "تعیین مقادیر بهینه ولتاژ نامی DVR ها در IDVR با در نظر گرفتن تغییرات بار" دارد. در بخش (۴)، نحوه پیاده‌سازی مسئله بهینه‌سازی مورد نظر با استفاده از الگوریتم‌های PSO و GA تشریح گردیده و در بخش (۵)، نتایج حاصل از پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها در حالت‌های مختلف ارائه شده و نتایج، مورد تحلیل و بحث قرار خواهند گرفت. بخش نهایی یعنی بخش (۶) نیز به نتیجه‌گیری این مقاله اختصاص دارد.

۲- عملکرد حالت ماندگار IDVR

در این بخش، مدل‌سازی و روابط حاکم بر عملکرد حالت ماندگار IDVR تشریح می‌گردند.

۲-۱- مدار معادل IDVR

در شکل (۲)، مدار معادل حالت ماندگار یک IDVR متشکل از دو DVR نشان داده شده است. تحلیل‌ها و روابط این بخش قابل تعمیم به ساختار IDVR بیش از دو DVR نیز می‌باشند. در این شکل، اندیس‌های "f" و "h" به ترتیب بیان‌گر پارامترهای فیدرهای معیوب ("faulty") و سالم ("healthy") هستند و فرض شده است که کمبود ولتاژ به طور همزمان در هر دو فیدر رخ نمی‌دهد.



شکل ۲- مدار معادل تکفاز IDVR

در شکل (۲)، DVRها به وسیله منبع ولتاژ قابل‌کنترل با فازور $V_{inj}\angle\theta$ مدل گردیده‌اند. پارامترهای V_L، γ، S_L، φ و I_L به ترتیب بیانگر دامنه ولتاژ بار، زاویه ولتاژ بار (نسبت به مرجع اختیاری)، توان ظاهری بار، زاویه بار (میزان پس‌فازی جریان بار نسبت به ولتاژ بار) و دامنه جریان بار در هر فیدر می‌باشند. همچنین V_S و δ به ترتیب نشان‌دهنده دامنه و زاویه ولتاژ منبع در هر فیدر هستند. تحلیل‌های ارائه شده در این مقاله با در نظر گرفتن فرضیات زیر صورت پذیرفته است:

- ✓ از امپدانس منبع در فیدرها صرف‌نظر شده است. این موضوع خطای چندانی در روند و نتایج تحلیل‌های این مقاله ندارد.
- ✓ بار به صورت سه فاز متعادل فرض شده است.
- ✓ فقط کمبودهای ولتاژ سه فاز متعادل (به عنوان شدیدترین کمبودها از لحاظ نیاز به توان اکتیو برای جبران) در نظر گرفته

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

شده‌اند. اگر مقدار $V_{S,f}$ کمتر از ۰/۹ پریونیت باشد، نشان‌دهنده‌ی وقوع کمبود ولتاژ در فیدر معیوب است.

- ✓ روابط و محاسبات به صورت پریونیتی ارائه شده‌اند. ولتاژ مبنا در هر فیدر برابر با ولتاژ نامی بار آن فیدر و توان ظاهری مبنای سیستم برابر با توان ظاهری نامی بار یکی از فیدرها در نظر گرفته شده است.

۲-۲- مقادیر نامی DVR

اندازه و هزینه هر تجهیز مبتنی بر الکترونیک قدرت مانند DVR، تقریباً متناسب با توان ظاهری نامی آن می‌باشد. لذا محاسبه توان ظاهری نامی DVR، در طراحی و ارزیابی اقتصادی آن از اهمیت زیادی برخوردار است.

چون DVR به طور سری با بار قرار می‌گیرد، جریان نامی آن با جریان نامی بار برابر است یعنی:

$$I_{\mathrm{DVR,rated}} = I_{\mathrm{L,rated}} \qquad (۱)$$

ولتاژ نامی DVR، بر اساس محدوده جبران مورد نظر و همچنین استراتژی کنترلی انتخابی تعیین می‌گردد [۳]. با توجه به شکل (۲)، اندازه ولتاژ تزریقی DVR در هر فاز برابر خواهد بود با:

$$V_{\mathrm{inj}} = \sqrt{{V_{\mathrm{S}}}^2 + {V_{\mathrm{L}}}^2 - 2V_{\mathrm{S}}V_{\mathrm{L}}\cos(\delta - \gamma)} \qquad (۲)$$

ولتاژ نامی DVR یعنی $V_{\mathrm{DVR,rated}}$، بر اساس رابطه (۲) و سایر معیارهای طراحی و عملکرد انتخاب می‌شود. ولتاژ تزریقی DVR در هر فاز یعنی V_{inj}، در حالت ماندگار نباید از $V_{\mathrm{DVR,rated}}$ تجاوز کند.

توان ظاهری نامی DVR برابر با حاصل‌ضرب جریان نامی و ولتاژ نامی آن است. در محاسبات پریونیت و در مبنای $V_{\mathrm{L,rated}}$ یعنی ولتاژ نامی بار، پریونیت جریان نامی DVR با پریونیت $S_{\mathrm{L,rated}}$ یعنی توان ظاهری نامی بار برابر است و لذا رابطه (۳) برقرار می‌باشد:

$$\begin{aligned} {S_{\mathrm{DVR,rated}}}^{\mathrm{p.u}} &= {V_{\mathrm{DVR,rated}}}^{\mathrm{p.u}} \times {I_{\mathrm{DVR,rated}}}^{\mathrm{p.u}} \\ &= {V_{\mathrm{DVR,rated}}}^{\mathrm{p.u}} \times {S_{\mathrm{L,rated}}}^{\mathrm{p.u}} \end{aligned} \qquad (۳)$$

۳-۲- مبادله توان اکتیو در یک IDVR

همان‌طور که در مقدمه گفته شد، قابلیت مبادله توان اکتیو بین دو یا چند DVR از طریق لینک dc مشترک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های عملکرد IDVR است. لذا پارامتر اساسی در عملکرد IDVR، توان اکتیو مورد نیاز یک DVR برای جبران کمبود ولتاژ می‌باشد. نیاز یا عدم نیاز به تزریق توان اکتیو توسط DVR برای جبران یک کمبود ولتاژ مشخص، به استراتژی کنترلی و همچنین شدت کمبود ولتاژ بستگی دارد [۳]. توان اکتیو مورد نیاز DVR فیدر معیوب در شکل (۲) برای جبران کمبود ولتاژ سه فاز متعادل در همان فیدر، از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه است [۲۰].

$${P_{\mathrm{DVR,f}}}^{\mathrm{p.u}} = {S_{\mathrm{L,f}}}^{\mathrm{p.u}}\left[\cos(\phi_{\mathrm{f}}) - \frac{V_{\mathrm{S,f}}}{V_{\mathrm{L,f}}}\cos(\delta_{\mathrm{f}} - \gamma_{\mathrm{f}} + \phi_{\mathrm{f}})\right] \qquad (۴)$$

مشابه با رابطه (۴)، توان اکتیو انتقالی از DVR فیدر سالم به لینک dc در IDVR از رابطه (۵) حاصل می‌شود.

$${P_{\mathrm{DVR,h}}}^{\mathrm{p.u}} = {S_{\mathrm{L,h}}}^{\mathrm{p.u}}\left[\frac{V_{\mathrm{S,h}}}{V_{\mathrm{L,h}}}\cos(\delta_{\mathrm{h}} - \gamma_{\mathrm{h}} + \phi_{\mathrm{h}}) - \cos(\phi_{\mathrm{h}})\right] \qquad (۵)$$

با صرف‌نظر کردن از انواع تلفات در ساختار IDVR، توان اکتیو تزریقی DVR فیدر سالم به لینک dc با توان اکتیو دریافتی DVR فیدر معیوب از لینک dc برابر می‌باشد، یعنی:

$$P_{\mathrm{DVR,f}} = P_{\mathrm{DVR,h}} \qquad (۶)$$

در این مقاله، این توان اکتیو انتقالی با P_{ex} نشان داده می‌شود.

وجود محدودیت در توان اکتیو قابل‌انتقال از فیدر سالم به فیدر معیوب، در عملکرد IDVR تأثیرگذار است. با توجه به رابطه (۵)، ماکزیمم توان اکتیو قابل‌انتقال از فیدر سالم به فیدر معیوب متناظر است با $\gamma_h = \delta_h + \varphi_h$ و $V_{\mathrm{L,h}}=V_{\mathrm{Lmin,h}}$ و از رابطه (۷) قابل‌محاسبه می‌باشد.

$$P_{\mathrm{ex\text{-}max}} = S_{\mathrm{L,h}}\left[\frac{V_{\mathrm{S,h}}}{V_{\mathrm{Lmin,h}}} - \cos(\phi_{\mathrm{h}})\right] \qquad (۷)$$

در این رابطه، $V_{\mathrm{Lmin,h}}$ بیان‌گر مینیمم ولتاژ مجاز بار در فیدر سالم در حین جبران است. این محدودیت بر این اساس بوده که در حین انتقال توان اکتیو از فیدر سالم به فیدر معیوب، عملکرد فیدر سالم در تأمین بار خود نباید مختل گردد.

با توجه به رابطه (۴)، مینیمم توان اکتیو مورد نیاز برای جبران کمبود ولتاژ در فیدر معیوب متناظر است با $V_{\mathrm{L,f}}=V_{\mathrm{Lmin,f}}$ و $\gamma_f = \delta_f + \varphi_f$ و از رابطه (۸) حاصل می‌گردد. در این رابطه، $V_{\mathrm{Lmin,f}}$ بیان‌گر مینیمم ولتاژ مجاز بار در فیدر معیوب در حین جبران است.

$$P_{\mathrm{min,f}} = S_{\mathrm{L,f}}\left[\cos(\phi_{\mathrm{f}}) - \frac{V_{\mathrm{S,f}}}{V_{\mathrm{Lmin,f}}}\right] \qquad (۸)$$

بر اساس روابط (۷) و (۸)، اگر $P_{\mathrm{min},f} > P_{ex-\max}$ باشد آنگاه کمبود ولتاژ مورد نظر در فیدر معیوب به طور کامل توسط ساختار IDVR قابل جبران نخواهد بود. لذا با توجه به روابط (۷) و (۸) و همچنین شرط $P_{\mathrm{min},f} \le P_{ex-\max}$، شدیدترین کمبود ولتاژ قابل جبران در فیدر معیوب توسط IDVR دارای دامنه V_{Fmin} بوده و برابر خواهد بود با:

$$VF_{\mathrm{min}} = V_{\mathrm{Lmin,f}}\left[\cos(\phi_{\mathrm{f}}) - \frac{S_{\mathrm{L,h}}}{S_{\mathrm{L,f}}}\left[\frac{V_{\mathrm{S,h}}}{V_{\mathrm{Lmin,h}}} - \cos(\phi_{\mathrm{h}})\right]\right] \qquad (۹)$$

۳- فرمول‌بندی مسئله با در نظر گرفتن تغییرات بار فیدرها

توان ظاهری نامی یک ساختار مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت مانند ساختار DVR، تعیین‌کننده‌ی اندازه و هزینه آن است. لذا مینیمم سازی توان ظاهری چنین ساختارهایی همواره می‌تواند یک

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

هدف مهم در طراحی باشد. در یک ساختار IDVR، مینیمم سازی مجموع توان ظاهری DVRها می‌تواند در راستای هدف مذکور باشد. بدین منظور در [۲۰]، یک استراتژی طراحی برای انتخاب ولتاژهای بهینه DVRها در IDVR برای جبران کمبود ولتاژهای متعادل ارائه گردیده است. در مقاله مذکور، تغییرات بار فیدرها در نظر گرفته نشده و طراحی فقط برای شرایط نامی بار فیدرها صورت پذیرفته است.

۳-۱- لزوم در نظر گرفتن تغییرات بار در مسئله طراحی بهینه IDVR

در مرجع [۲۰] فقط از مقادیر نامی بار فیدرها برای تعیین ولتاژ نامی DVRها در IDVR به‌منظور بهینه‌سازی S_{total} استفاده شده است. یعنی فرض شده است که بار هر کدام از فیدرها در تمام ساعات روز برابر با مقدار نامی خود است. به‌عبارت‌دیگر، فقط یک بازه برای طراحی بهینه در نظر گرفته شده است. این کار با این استدلال انجام شده است که بدترین حالت برای محاسبه و طراحی بهینه ولتاژ DVRها و لذا توان ظاهری کل IDVR، همان شرایط بار نامی فیدرها می‌باشد. درحالی که در مقاله فعلی، تغییرات بار فیدرها نیز لحاظ گردیده و از منحنی بار فیدرها بدین منظور استفاده شده است. به‌طورکلی هدف و تفاوت اصلی این مقاله نسبت به [۲۰]، پاسخ به این سؤال است که آیا لزومی دارد که در طراحی بهینه IDVR در حالت ماندگار، تغییرات بار فیدرها نیز لحاظ شود و یا طراحی برای بار نامی (همانند [۲۰]) کفایت می‌کند؟ اگر قرار باشد این تغییرات لحاظ شود، مسئله طراحی بهینه چگونه باید تعریف گردد؟

در پاسخ به سؤال باید گفت که در نظر گرفتن تغییرات بار در طراحی بهینه IDVR یک ضرورت است. زیرا با توجه به رابطه (۹) مشاهده می‌شود که نسبت توان ظاهری بار فیدرها و همچنین مقدار ضریب توان آن‌ها، در قابلیت جبران کمبود ولتاژ توسط ساختار IDVR بسیار مؤثرند. بنابراین اگر بر اساس ایده [۲۰]، طراحی فقط برای شرایط بار نامی فیدرها صورت بگیرد آنگاه ولتاژهای به دست آمده برای DVRها ممکن است جوابگوی جبران در شرایط تغییرات بار نباشد و عمل جبران به طور کامل در IDVR محقق نگردد.

در پاسخ به سؤال دوم فرض کنید منحنی تغییرات بار فیدرها نیز در مسئله طراحی بهینه در نظر گرفته شود. ساده‌ترین استراتژی می‌تواند این باشد که برای هر بازه از تغییرات بار فیدرها، استراتژی بهینه‌سازی ارائه شده در [۲۰] بدون هیچ تغییری اجرا گردد و نتایج بهینه برای هر بازه از تغییرات بار، به طور مجزا به دست آید. برای مثال دو فیدر با توان ظاهری نامی بار برابر با یک پریونیت را در نظر بگیرید. فرض کنید تغییرات بار فیدرها دارای دو بازه باشند. در بازه اول، توان ظاهری بار فیدرها به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۷ پریونیت و ضریب توان آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۰/۹ پس‌فاز بوده و در بازه دوم، توان ظاهری بار فیدرها به ترتیب برابر با ۰/۹۴۵ و ۰/۷ پریونیت و ضریب توان آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹۵۳ و ۰/۷۵ پس‌فاز باشد. با اجرای استراتژی بهینه‌سازی [۲۰] به طور مجزا برای هر بازه و با هدف جبران کمبود ولتاژ با دامنه ۰/۶۵ پریونیت در فیدر اول و دامنه ۰/۶۵ پریونیت در فیدر دوم، پریونیت ولتاژ نامی بهینه DVR هر فیدر در بازه اول به ترتیب برابر با $V_{DVR,rated1}$=۰/۴۰۲ و $V_{DVR,rated2}$=۰/۲۵۷ و در بازه دوم به ترتیب با $V_{DVR,rated1}$=۰/۲۸۳ و $V_{DVR,rated2}$=۰/۴۳۵ به دست می‌آیند. حال به منظور امکان‌پذیر بودن عمل جبران در هر دو بازه، باید بدترین مقدار بین دو بازه باید انتخاب گردد. لذا $V_{DVR,rated1}$ نهایی برابر با ۰/۴۰۲ پریونیت و $V_{DVR,rated2}$ نهایی برابر با ۰/۴۳۵ پریونیت خواهند بود. در نتیجه مقدار S_{total} یعنی مجموع توان ظاهری نامی DVRها برابر با ۰/۸۳۷ پریونیت خواهد گردید (S_L نامی در هر دو فیدر برابر با یک پریونیت است). نکته مهم این است که بهینه‌سازی برای هر بازه به طور مجزا صورت گرفت و لذا S_{total} برابر با ۰/۸۳۷ پریونیت، ممکن است جواب بهینه واقعی نباشد. بنابراین برای یافتن جواب بهینه واقعی، باید همه بازه‌ها به طور هم‌زمان جستجو گردند که این موضوع فضای جواب مسئله را بزرگ‌تر کرده و حل مسئله را پیچیده‌تر می‌کند که در بخش بعدی به آن پرداخته شده است. برای مثال در صورت یافتن جواب بهینه واقعی (بر اساس جستجوی هم‌زمان در بازه‌ها طبق روش بخش بعد)، S_{total} بهینه برابر با ۰/۷۵۳ پریونیت به دست می‌آید که متناظر با $V_{DVR,rated1}$=۰/۳۴۳ و $V_{DVR,rated2}$=۰/۴۱۰ می‌باشد. مشاهده می‌شود که مقدار S_{total} حاصل از بهینه‌سازی هم‌زمان، کمتر از مقدار حاصل از بهینه‌سازی مجزا است.

با توجه به این توضیحات، مسئله طراحی بهینه ارائه شده در مرجع [۲۰] باید به گونه‌ای تعمیم داده شده و اصلاح گردد که تغییرات بار فیدرها را نیز شامل شود.

۳-۲- ساختار و روابط حاکم بر مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی

در این بخش، ساختار و روابط حاکم بر مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی با در نظر گرفتن هم‌زمان تمام بازه‌های منحنی بار، ارائه می‌گردد. فرضیات مسئله عبارت‌اند از:

- ساختار IDVR متشکل از دو DVR است.
- ولتاژ منبع در فیدر سالم ($V_{S,h}$) برابر با یک پریونیت در نظر گرفته شده است.

روابط، قیود و متغیرهای مربوط به مسئله بهینه‌سازی موردنظر در ادامه تشریح می‌گردند.

۳-۲-۱- ورودی‌های اولیه و ثابت مسئله:

- مشخصه اختلال‌های ولتاژ موردنظر برای جبران:

فرض می‌شود که هدف از طراحی، جبران کمبود ولتاژ سه فاز متعادل با اندازه V_{F1} (پریونیت) در فیدر اول و با اندازه V_{F2} (پریونیت) در فیدر دوم می‌باشد (اختلال‌ها هم‌زمان نیستند).

- توان ظاهری نامی بارها:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

$S_{Lrated,1}$ و $S_{Lrated,2}$ به ترتیب بیانگر توان ظاهری نامی بار فیدرهای ۱ و ۲ بر حسب پریونیت هستند.

- مینیمم ولتاژ مجاز بارها:

$V_{Lmin,1}$ و $V_{Lmin,2}$ به ترتیب بیانگر مینیمم ولتاژ مجاز بار فیدرهای ۱ و ۲ بر حسب پریونیت هستند.

۳-۲-۲- محاسبات در هر بازه منحنی بار:

فرض می‌شود منحنی‌های بار هر دو فیدر دارای T بازه هستند و شماره هر بازه با k نشان داده می‌شود (k=1,2,...,T).

برای بازه شماره k اطلاعات ورودی بارها به شرح زیر می‌باشند:

$S_{L,1,k}$ و $S_{L,2,k}$: توان ظاهری بار فیدرهای ۱ و ۲ بر حسب پریونیت در بازه شماره k

$\cos(\varphi_{1,k})$ و $\cos(\varphi_{2,k})$: ضریب توان بار فیدرهای ۱ و ۲ در بازه شماره k

در هر بازه، متغیرهای زیر تعریف شده و محاسبات زیر صورت می‌گیرد:

- توان اکتیو تزریقی DVR هر فیدر:

فرض می‌شود که در بازه kام، $P_{ex,i,k}$ بیان‌گر توان اکتیو تزریقی DVR فیدر (i) برای جبران V_{Fi} در این فیدر بوده که این توان توسط فیدر دیگر به عنوان فیدر سالم تأمین می‌شود (i=1,2).

- ماکزیمم توان اکتیو قابل‌انتقال از فیدر سالم به معیوب:

در بازه kام، $P_{ex\text{-}max,i,k}$ بیان‌گر ماکزیمم توان اکتیو قابل‌انتقال از فیدر (i) به عنوان فیدر سالم به لینک dc به منظور جبران کمبود ولتاژ در فیدر دیگر می‌باشد و طبق (۷) برابر است با:

$$P_{ex\text{-}max,i,k} = S_{L,i,k}\left[\frac{1}{V_{Lmin,i}} - \cos(\phi_{i,k})\right] \quad i=1,2 \qquad (۱۰)$$

- مینیمم توان اکتیو لازم برای جبران اختلال ولتاژ در فیدر معیوب:

در بازه kام، $P_{min,i,k}$ بیان‌گر مینیمم توان اکتیو لازم برای DVR به منظور جبران کمبود ولتاژ با اندازه V_{Fi} در فیدر (i) می‌باشد و طبق (۸) برابر است با:

$$P_{min,i,k} = S_{L,i,k}\left[\cos(\phi_{i,k}) - \frac{VF_i}{V_{Lmin,i}}\right] \quad i=1,2 \qquad (۱۱)$$

- محدوده توان اکتیو تزریقی DVR هر فیدر:

در بازه kام، با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱)، مقدار $P_{ex,i,k}$ در محدوده نامساوی (۱۲) قرار دارد.

$$P_{min,i,k} \le P_{ex,i,k} \le P_{ex\text{-}max,j,k} \quad i=1,2\ ,\ j=1,2\ ,\ i\ne j \qquad (۱۲)$$

- ولتاژ تزریقی DVR در فیدر معیوب:

در بازه kام، $V_{inj,f,i,k}$ بیان‌گر ولتاژ تزریقی DVR واقع در فیدر (i) برای جبران کمبود ولتاژ با اندازه V_{Fi} در این فیدر می‌باشد که به صورت تابعی از $P_{ex,i,k}$ بوده و بر اساس [۲۰]، از طریق رابطه (۱۳) حاصل می‌شود. ضرایب A تا F در این رابطه، در هر بازه ضرایب ثابتی بوده و در ضمیمه آورده شده‌اند.

$$V_{inj,f,i,k}\left(P_{ex,i,k}\right) = \sqrt{A_{i,k} + B_{i,k}\times P_{ex,i,k} + C_{i,k}\sqrt{D_{i,k} + E_{i,k}\times P_{ex,i,k} + F_{i,k}\times P_{ex,i,k}^{\,2}}} \quad i=1,2 \qquad (۱۳)$$

- ولتاژ تزریقی DVR در فیدر سالم:

در بازه kام، $V_{inj,h,j,k}$ بیان‌گر ولتاژ تزریقی DVR واقع در فیدر (j) به عنوان فیدر سالم برای انتقال توان اکتیو $P_{ex,i,k}$ به فیدر (i) به عنوان فیدر معیوب برای جبران کمبود ولتاژ با اندازه VFi در فیدر (i) است. $V_{inj,h,j,k}$ به صورت تابعی از متغیرهای $P_{ex,i,k}$ و $V_{L,h,j,k}$ بوده و بر اساس [۲۰] برابر است با:

$$V_{inj,h,j,k}\left(P_{ex,i,k}, V_{L,h,j,k}\right) = \sqrt{1+V_{L,h,j,k}^{\,2}\left[G_{j,k} - E_{j,k}\times P_{ex,i,k} + H_{j,k}\sqrt{\frac{1}{V_{L,h,j,k}^{\,2}} + M_{j,k} - E_{j,k}\times P_{ex,i,k} + F_{j,k}\times P_{ex,i,k}^{\,2}}\right]} \qquad (۱۴)$$

$i=1,2 \quad , \ j=1,2 \quad , \ i\ne j$

در این رابطه، $V_{L,h,j,k}$ بیان‌گر ولتاژ بار فیدر (j) در شرایطی که این فیدر به عنوان فیدر سالم در نظر گرفته شده است (در بازه kام) می‌باشد و می‌تواند به عنوان متغیر در بازه $V_{L\min,j} \le V_{L,h,j,k} \le 1$ در نظر گرفته شود. ضرایب G، H و M نیز برای هر بازه ضرایب ثابت بوده و در ضمیمه آورده شده‌اند.

۳-۲-۳- جستجو در فضای جواب و یافتن مقدار بهینه:

با توجه به محاسبات صورت گرفته در هر بازه در بخش قبل، محاسبات و مراحل جستجوی زیر باید انجام گیرد:

- انتخاب ولتاژهای تزریقی DVRها:

$V_{DVR,i}$ بیان‌گر مقدار ولتاژ موردنظر DVR فیدر (i) بوده که باید در طراحی و انتخاب مقادیر نامی لحاظ گردد. $V_{DVR,i}$ از رابطه (۱۵) حاصل شده و تابعی از $P_{ex,i,k}$، $P_{ex,j,k}$ و $V_{L,h,i,k}$ است (k=1,2,...T). برای مثال اگر دو بازه برای منحنی بار وجود داشته باشد (یعنی T=2)، کلاً ۸ متغیر وجود خواهد داشت و هر کدام از $V_{DVR,1}$ و $V_{DVR,2}$ تابعی از ۶ متغیر خواهند بود.

$$V_{DVR,i} = \mathrm{Max}\left\{\begin{matrix} V_{inj,f,i,1}\left(P_{ex,i,1}\right), V_{inj,h,i,1}\left(P_{ex,j,1}, V_{L,h,i,1}\right), ... , \\ V_{inj,f,i,T}\left(P_{ex,i,T}\right), V_{inj,h,i,T}\left(P_{ex,j,T}, V_{L,h,i,T}\right) \end{matrix}\right\} \qquad (۱۵)$$

$i=1,2 \quad , \ j=1,2 \quad , \ i\ne j$

- تابع هدف:

S_{total} یعنی مجموع توان ظاهری نامی DVR ها برابر است با:

$$S_{total}^{\,p.u} = S_{L,rated,1}^{\,p.u}\times V_{DVR,1}^{\,p.u} + S_{L,rated,2}^{\,p.u}\times V_{DVR,2}^{\,p.u} \qquad (۱۶)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

تابع هدف مسئله موردنظر، مینیمم سازی S_{total} است. مشاهده می‌شود که S_{total} تابعی از متغیرهای $P_{ex,1,1}$، $P_{ex,2,1}$، $V_{L,h,1,1}$ و $V_{L,h,2,1}$ و ... و $P_{ex,1,T}$، $P_{ex,2,T}$، $V_{L,h,1,T}$ و $V_{L,h,2,T}$ می‌باشد (تعداد این متغیرها برابر با 4T است). هدف این است که با جستجو در بازه این متغیرها، مقادیر $V_{DVR,1}$ و $V_{DVR,2}$ به گونه‌ای انتخاب شوند که S_{total} مینیمم شود. مقادیر $V_{DVR,1}$ و $V_{DVR,2}$ متناظر با S_{total} مینیمم، به عنوان مقادیر نامی نهایی ولتاژ DVRها انتخاب شده و با متغیرهای $V_{DVR,rated,1}$ و $V_{DVR,rated,2}$ نشان داده می‌شوند.

۴- حل مسئله بهینه‌سازی با الگوریتم‌های هوشمند

مسئله بهینه‌سازی تعریف شده در بخش قبل به گونه‌ای است که با جستجو در کل فضای جواب، S_{total} مینیمم واقعی را حاصل می‌کند. اما با توجه به اینکه در عمل تعداد بازه‌های منحنی بار فیدرها زیاد است، فضای جواب مسئله بسیار بزرگ خواهد بود. برای مثال اگر هر منحنی بار دارای ۸ بازه در شبانه‌روز باشد (T=8)، آنگاه S_{total} تابعی از ۳۲ متغیر خواهد بود. بنابراین حل مسئله با جستجوی کل فضای جواب، امکان‌پذیر نبوده و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند برای حل مسئله ضروری است.

الگوریتم‌های PSO و GA از بهترین روش‌های بهینه‌سازی هوشمند هستند که توانایی آن در حل مسائل بهینه‌سازی مختلف به اثبات رسیده است. به همین منظور در این مقاله برای بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی، از این الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. بنابراین در این بخش این الگوریتم‌ها به طور مختصر معرفی می‌شوند.

۴-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی قدرتمند، در حل مسائل بهینه‌سازی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم ابتدا ورودی‌ها و محدوده‌ی تغییرات آن‌ها مشخص می‌شوند که هر یک از این ورودی‌ها به عنوان یک ژن برای الگوریتم عمل خواهند کرد. این ژن‌ها در کنار هم تشکیل یک کروموزوم را داده و چندین کروموزوم در کنار هم تشکیل یک جمعیت را می‌دهند. هدف از اجرای GA در مسائل بهینه‌سازی، یافتن نقطه‌ی بهینه آن مسئله با توجه به تابع هدف مربوطه می‌باشد که مقدار این تابع برای هر کروموزوم با توجه به مقادیر اختصاص یافته به ژن‌های آن کروموزوم قابل محاسبه است. برای راه‌اندازی یک GA، در ابتدا یک جمعیت به عنوان جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد شده و به الگوریتم داده می‌شود و در ادامه‌ی کار، جمعیت نسل جدید با توجه به نسل قبل تولید می‌شود. این کار با انجام عملیات بازتولید (Reproduction) ، تزویج (Cross Over) و جهش (Mutation) بر روی کروموزوم‌های نسل قبل صورت می‌گیرد. روند حرکت در این الگوریتم به گونه‌ای است که جمعیت جدید را با هدف تولید نسل بهتر (تابع هدف کوچک‌تر) تولید می‌کند [۲۱].

مراحل کلی الگوریتم ژنتیک برای تعیین مقادیر بهینه DVRها به شرح زیر است:

مرحله ۱: مقداردهی اولیه

توان اکتیو تزریقی DVR در هر فیدر و ولتاژ تزریقی DVR در فیدر معیوب به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب می‌شوند. رابطه (۱۷) یک نمونه از کروموزوم را یا همان ژن را نشان می‌دهد.

$$X_{in} = \left[P_{ex,1,1}\dots P_{ex,1,T}, P_{ex,2,1}\dots P_{ex,2,T}, V_{L,h,1,1}\dots V_{L,h,1,T}, V_{L,h,2,1}\dots V_{L,h,2,T}\right] \quad (۱۷)$$

مقدار اولیه کروموزوم‌ها توسط رابطه (۱۸) تعیین می‌شود [۲۲]:

$$X_i = X_{\min} + r\times\left(X_{\max} - X_{\min}\right) \quad (۱۸)$$

در رابطه فوق، r یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ بوده و X_{min} و X_{max} نیز به ترتیب مقدار حداقل و حداکثر متغیرها بوده که توسط کاربر تعیین می‌شوند.

مرحله ۲: ارزیابی تابع هدف

مقدار هر کروموزوم به وسیله تابع هدف تعیین می‌شود. تابع هدف باید کمینه شود درحالی‌که تمامی قیود باید ارضا شوند. بدین منظور مطابق رابطه (۱۹) از ضرایب پنالتی برای رعایت قیود استفاده می‌شود.

$$S_{total,i} = S_{Lrated,1}V_{DVR1,i} + S_{Lrated,2}V_{DVR2,i} + \beta_1\left(V_{DVR,1} - V_{\max,1}\right) + \beta_2\left(V_{DVR,2} - V_{\max,2}\right) \quad (۱۹)$$

که β_1 و β_2 ضرایب پنالتی بوده و در این مقاله برابر با ۱۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شده‌اند.

مرحله ۳: ایجاد جمعیت نسل بعد با اعمال عملگر تزویج با احتمال ۵۰ درصد

مرحله ۴: اعمال عملگر جهش طبق رابطه زیر [۲۲]:

$$x_i = \begin{cases} U(a_i, b_i) & if \quad i = j \\ x_i & otherwise \end{cases} \quad (۲۰)$$

در رابطه فوق a_i و b_i به ترتیب حد بالایی و پایینی متغیر موردنظر هستند. U نیز تابع توزیع یکنواخت است.

مرحله ۵: بازتولید

۲۰ درصد از افراد جمعیت که دارای بهترین تابع برازش هستند جمعیت نسل بعد را ایجاد می‌کنند.

مرحله ۶: بررسی معیار توقف

در صورتی که الگوریتم به تعداد تکرار تعیین شده برسد، متوقف می‌شود. در غیر این صورت دوباره به مرحله ۳ برمی‌گردد.

لازم به ذکر است که در این مقاله تعداد افراد جمعیت برای مثال‌های اول و دوم ۲۰۰ و برای مثال سوم ۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

۴-۲- الگوریتم PSO

الگوریتم PSO یکی از روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته شده از طبیعت است. این روش که اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط دو نفر به نام‌های کندی و ابرهارت ابداع شد برای حل مسائل بهینه‌سازی عددی یا فضای جستجوی بسیار بزرگ بدون نیاز به اطلاع از گرادیان تابع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

هدف به کار گرفته می‌شود [۲۳]. در این الگوریتم موقعیت هر ذره، یک جواب ممکن مسئله در فضای چند بعدی است و ذره با یک سرعت متغیر که به صورت دینامیکی و با توجه به تجربه حرکت ذره و همچنین تجربه حرکت ذرات دیگر اصلاح می‌شود، در میان فضای جستجو به حرکت در می‌آید و سعی می‌کند با تقلید از خصوصیات ذرات موفق، موقعیت خودش را اصلاح کند.

در الگوریتم PSO هر ذره حافظه‌ای دارد و از این رو به یاد آوردن بهترین موقعیت در فضای جستجو که تا به حال مشاهده کرده، مهم است. موقعیت متناظر با بهترین مقدار تابع هدف هر ذره P_{best} و موقعیت متناظر با بهترین مقدار در بین تمامی ذرات، G_{best} است.

برای تعیین مقادیر بهینه DVRها با استفاده از الگوریتم PSO مراحل زیر باید طی شود:

مرحله اول: مقداردهی اولیه

مشابه مرحله ۱ الگوریتم GA است. فقط با این تفاوت که هر ژن، یک ذره نامیده می‌شود.

مرحله دوم: ارزیابی تابع هدف

مشابه مرحله ۲ الگوریتم GA عمل می‌شود.

مرحله ۳: مقداردهی اولیه P_{best} و G_{best}

مقادیر تابع هدف محاسبه شده توسط رابطه (۱۹) برای ذرات اولیه، به عنوان مقادیر اولیه P_{best} انتخاب می‌شوند. سپس بهترین P_{best} به عنوان G_{best} تعریف می‌شود.

مرحله ۴: به‌روز کردن مقدار سرعت ذرات

سرعت هر ذره توسط رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۴]:

$$v_{in}^{k+1}=\omega\times v_{in}^{k}+C_1\times r_1^n\times\left(P_{best_{in}}^{k}-x_{in}^{k}\right)+C_2\times r_2^n\times\left(G_{best}^{k}-x_{in}^{k}\right)+C_3\times r_3^n\times\left(I_{best}^{k}-x_{in}^{k}\right) \quad (۲۱)$$

که v_{in}^{k} و x_{in}^{k} به ترتیب سرعت و موقعیت ذره kام، C_1 تا C_3 ضرایب شتاب، r_1^n تا r_3^n اعداد تصادفی در بازه [0-1] و I_{best}^{k} بهترین پاسخ به دست آمده به وسیله هر ذره در تکرار kام می‌باشند. ω نیز ضریب اینرسی بوده و طبق رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\omega=\omega_{\max}-\frac{\omega_{\max}-\omega_{\min}}{iter_{\max}}i_{iter} \quad (۲۲)$$

در رابطه فوق، $iter_{\max}$ مقدار حداکثر تعداد تکرارها، iter شماره تکرار کنونی، $\omega_{\max}$ و $\omega_{\min}$ به ترتیب مقدار بیشینه و کمینه ضریب اینرسی می‌باشند که مقدار $\omega_{\max}$ برابر ۰/۹ و مقدار $\omega_{\min}$ برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

مرحله ۵: به‌روزرسانی موقعیت ذرات

موقعیت هر ذره طبق رابطه زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$x_{in}^{k+1}=x_{in}^{k}+Cv_{in}^{k+1} \quad (۲۳)$$

که C ضریب انقباض بوده و با استفاده از [۲۵] تعیین می‌شود.

مرحله ۶: بررسی معیار توقف

در صورتی که الگوریتم به تعداد تکرار تعیین‌شده برسد، متوقف می‌شود. در غیر این صورت به مرحله ۴ برمی‌گردد.

۵- تحلیل نتایج

در این بخش با ارائه مثال‌هایی، نتایج حاصل از الگوریتم‌های پیشنهادی مقایسه می‌شود. در همه مثال‌ها، ساختار IDVR متشکل از دو DVR در دو فیدر مستقل با $S_{Lreated,1}=S_{Lrated,2}=1p.u$ بوده و V_{Lmin} در هر فیدر برابر با ۰/۹ پریونیت می‌باشد.

۵-۱- مثال اول

در مثال اول فرض شده است که منحنی بار هر فیدر دارای دو بازه زمانی (T=2) باشد که اطلاعات توان ظاهری و ضریب توان آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. فرض می‌شود که هدف، جبران کمبود ولتاژ با $V_{F1}=0.65$ در فیدر اول و $V_{F2}=0.65$ در فیدر دوم باشد.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به بازه‌های زمانی بار فیدرها در مثال اول

فیدر	بازه اول	بازه دوم
فیدر (۱)	$S_{L,1,1}=0.8pu$ $\cos\varphi_{1,1}=0.85$	$S_{L,1,2}=0.7p.u$ $\cos\varphi_{1,2}=0.75$
فیدر (۲)	$S_{L,2,1}=1pu$ $\cos\varphi_{2,1}=0.9$	$S_{L,2,2}=0.9pu$ $\cos\varphi_{2,2}=0.995$

در جدول (۲)، نتایج حاصل از بهینه‌سازی با روش‌های مختلف آورده شده است. در سطر اول جدول، با استفاده از جستجو در کل فضای جواب به شیوه غیرهوشمند، جواب بهینه واقعی ارائه شده است. درحالی‌که سطرهای دوم و سوم به ترتیب اختصاص به الگوریتم‌های هوشمند PSO و GA دارند. از جدول ۲ مشخص است که نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های هوشمند دقیقاً برابر مقدار بهینه واقعی (به دست آمده از جستجوی کل فضای جواب) است. بنابراین می‌توان گفت که هر سه روش با دقت بسیار خوبی به جواب بهینه رسیده‌اند.

جدول ۲: نتایج حاصل از بهینه‌سازی در مثال اول

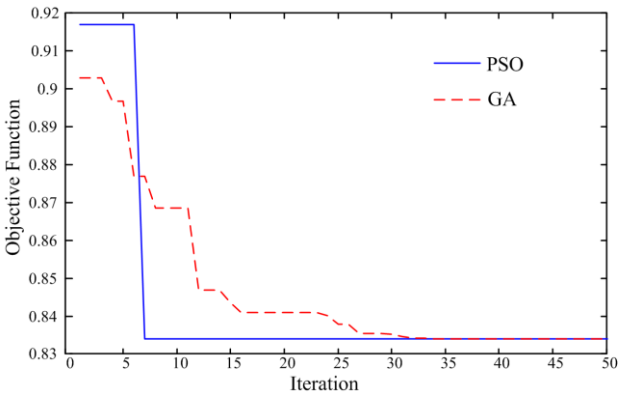
روش بهینه‌سازی	مقادیر نامی DVRها (پریونیت)	مقدار نامی IDVR (پریونیت)	مدت‌زمان اجرای برنامه (ثانیه)
جستجوی کل فضای جواب	$V_{DVR,rated1}=0.5569$ $V_{DVR,rated2}=0.2771$	$S_{total}=0.8340$	۱۴/۴
PSO	$V_{DVR,\ rated1}=0.5567$ $V_{DVR,\ rated2}=0.2768$	$S_{total}=0.8336$	۰/۷۷
GA	$V_{DVR,\ rated1}=0.5565$ $V_{DVR,\ rated2}=0.2770$	$S_{total}=0.8334$	۱۳/۸۶

برای بررسی سرعت الگوریتم‌ها در رسیدن به پاسخ بهینه، در ستون آخر جدول ۲، مدت‌زمان اجرای برنامه آورده شده است. ضمن اینکه شکل ۳ نیز نشان‌دهنده نمودار تابع هدف بر حسب تعداد تکرارها برای الگوریتم‌های هوشمند است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم‌های هوشمند (مخصوصاً الگوریتم PSO) خیلی سریع‌تر از روش کلاسیک به پاسخ بهینه دست یافته‌اند. بااین‌حال چون در این

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

حالت تعداد بازه‌ها کم بوده و فضای جواب خیلی بزرگ نیست، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند خیلی ضرورت ندارد.



شکل ۳: نمودار همگرایی الگوریتم‌های هوشمند در مثال اول

۵-۲- مثال دوم

در مثال دوم فرض شده است که منحنی بار هر فیدر دارای سه بازه زمانی (T=3) باشد. جدول ۳ نشان‌دهنده‌ی اطلاعات توان ظاهری و ضریب توان بارها است. فرض می‌شود که هدف، جبران کمبود ولتاژ با V_{F1}= 0.65 در فیدر اول و V_{F2}=0.65 در فیدر دوم باشد.

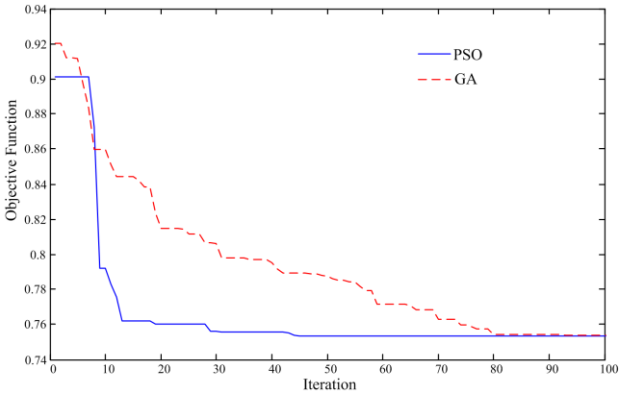
نتایج حاصل از بهینه‌سازی با روش‌های مختلف در جدول ۴ آورده شده است. شکل ۴ نیز نشان‌دهنده‌ی منحنی تغییرات تابع هدف به ازای تعداد تکرار را نشان می‌دهد. در این حالت نیز جواب‌ها بسیار نزدیک به هم بوده و تقریباً مشابه هستند. بنابراین می‌توان گفت هر سه روش با دقت خوبی به پاسخ بهینه دست یافته‌اند. ولی مدت‌زمان رسیدن به پاسخ بهینه در الگوریتم‌های هوشمند خیلی سریع‌تر از روش کلاسیک است. بااین‌حال در این حالت نیازی به استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند نیست. هرچند استفاده از این روش‌ها باعث صرفه‌جویی زیادی در زمان رسیدن به پاسخ بهینه خواهد داشت. چون روش "جستجوی کل فضای جواب" در مدت ۱۰۸۰۰ ثانیه به پاسخ می‌رسد که قابل توجه است.

جدول ۳: اطلاعات مربوط به بازه‌های زمانی بار فیدرها در مثال دوم

فیدر	بازه اول	بازه دوم	بازه سوم
فیدر (۱)	$S_{L,1,1}$=0.98pu $\cos\varphi_{1,1}$=0.85	$S_{L,1,2}$=0.94pu $\cos\varphi_{1,2}$= 0.953	$S_{L,1,3}$=1.0pu $\cos\varphi_{1,3}$= 0.95
فیدر (۲)	SL,2,1=0.7pu $\cos\varphi$2,1= 0.9	$S_{L,2,2}$= 0.7pu $\cos\varphi_{2,2}$= 0.75	$S_{L,2,3}$= 0.8pu $\cos\varphi_{2,3}$= 0.8

جدول ۴: نتایج حاصل از بهینه‌سازی در مثال دوم

روش بهینه‌سازی	مقادیر نامی DVRها (پریونیت)	مقدار نامی IDVR (پریونیت)	مدت‌زمان اجرای برنامه (ثانیه)
جستجوی کل فضای جواب	$V_{DVR,rated1}$=0.3403 $V_{DVR,rated2}$=0.4129	S_{total}=0.7533	۱۰۸۰۰
PSO	$V_{DVR, rated1}$=0.3399 $V_{DVR, rated2}$=0.4132	S_{total}=0.7529	۱/۵۱
GA	$V_{DVR, rated1}$=0.3395 $V_{DVR, rated2}$=0.4134	S_{total}=0.7525	۱۴/۷۵



شکل ۴: نمودار همگرایی الگوریتم‌های هوشمند در مثال دوم

واضح است که همگرایی الگوریتم‌های GA و PSO تقریباً یکسان است. ولی الگوریتم PSO در مدت‌زمان و تعداد تکرار کمتری نسبت به الگوریتم GA به پاسخ بهینه دست یافته است. دلیل این امر این است که الگوریتم GA نسبت به الگوریتم PSO تعداد پارامترهای زیادی برای تنظیم دارد. همین امر سبب طولانی شدن زمان اجرای برنامه می‌شود. بنابراین می‌توان گفت در این مثال، الگوریتم PSO عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

۵-۳- مثال سوم

در مثال سوم نیز فرض شده است که منحنی بار هر فیدر دارای شش بازه زمانی (T=6) باشد که اطلاعات توان ظاهری و ضریب توان آن‌ها در جدول (۵) ارائه شده است. فرض می‌شود که هدف، جبران کمبود ولتاژ با V_{F1}=0.65 در فیدر اول و V_{F2}=0.65 در فیدر دوم باشد.

جدول ۵: اطلاعات مربوط به بازه‌های زمانی بار فیدرها در مثال سوم

فیدر	بازه اول	بازه دوم	بازه سوم	بازه چهارم	بازه پنجم	بازه ششم
فیدر (۱)	$S_{L,1,1}$=0.9 pu $\cos\varphi$1,1=0.75	$S_{L,1,2}$=1 pu $\cos\varphi_{1,2}$=0.8	$S_{L,1,3}$=1 pu $\cos\varphi_{1,3}$=0.9	$S_{L,1,4}$=0.7 pu $\cos\varphi_{1,4}$=0.8	$S_{L,1,5}$=1 pu $\cos\varphi_{1,5}$=0.95	$S_{L,1,6}$=0.7 pu $\cos\varphi_{1,6}$=0.85
فیدر (۲)	$S_{L,2,1}$=1pu $\cos\varphi_{2,1}$= 0.9	$S_{L,2,2}$=1pu $\cos\varphi_{2,2}$= 0.9	$S_{L,2,3}$=0.9pu $\cos\varphi_{2,3}$= 0.9	$S_{L,2,4}$=0.9pu $\cos\varphi_{2,4}$=0.95	$S_{L,2,5}$=0.9pu $\cos\varphi_{2,5}$=0.85	$S_{L,2,6}$=0.8p.u $\cos\varphi_{2,6}$= 0.95

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

جدول ۶ نتایج حاصل از بهینه‌سازی تابع هدف با اجرای الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در سطر اول این جدول مشاهده می‌شود برای روش اول هیچ نتیجه‌ای آورده نشده است. چون مدت‌زمان اجرای برنامه در این حالت با استفاده از روش جستجوی کل فضای جواب بسیار طولانی است. به‌طوری‌که در مدت ۳۰ ساعت از اجرای برنامه، پاسخ بهینه حاصل نشد. ولی مشخص است که با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، در مدت‌زمان بسیار کمی پاسخ بهینه حاصل می‌شود. بنابراین در این حالت لزوم استفاده از الگوریتم‌های هوشمند به خوبی نمایان می‌شود.

علاوه بر این، در شکل ۵ نمودار همگرایی الگوریتم‌های هوشمند نشان‌دهنده‌ی این است که همگرایی الگوریتم‌های GA و PSO یکسان است. ولی الگوریتم PSO سریع‌تر است چون در تکرار ۴۴ به پاسخ بهینه دست یافته است درحالی‌که GA در تکرار ۸۱ به همگرایی رسیده است. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد تکرارها به ۵۰۰۰، تغییری در جواب مسئله ایجاد نمی‌شود. بنابراین می‌توان گفت که الگوریتم‌های هوشمند در مدت‌زمان کم و با دقت بالا به پاسخ بهینه دست یافته‌اند هرچند مدت‌زمان اجرای برنامه در الگوریتم PSO بسیار کمتر از الگوریتم GA است.

۵-۴- جمع‌بندی نتایج

نتایج به دست آمده از اجرای روش‌های مختلف برای بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی در این مقاله نشان می‌دهد که:

۱- زمانی که منحنی بار فیدرها دارای تعداد بازه‌های کمتری است (T=2 و T=3) لزومی به استفاده از الگوریتم‌های هوشمند نیست. هرچند استفاده از الگوریتم‌های هوشمند می‌تواند باعث صرفه‌جویی زیادی در زمان اجرای برنامه شود.

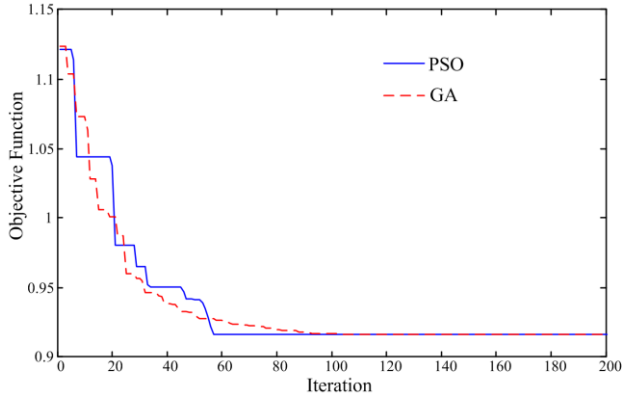
۲- زمانی که منحنی بار فیدرها دارای تعداد بازه‌های زیادی است (T=6)، روش مبتنی بر جستجوی کل فضای جواب در مدت‌زمان معقول به جواب نخواهد رسید. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های هوشمند ضروری است.

۳- نتایج به دست آمده در مثال‌های اول و دوم نشان می‌دهد که جواب بهینه به دست آمده از الگوریتم‌های PSO و GA بسیار نزدیک به جواب واقعی است که این نشان از دقت بسیار خوب این الگوریتم‌ها برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادشده در این مقاله دارد.

۴- بعد از اثبات توانایی الگوریتم‌های PSO و GA در حل مسئله بهینه‌سازی این مقاله در مثال‌های اول و دوم و عدم توانایی روش اول در مثال سوم، برای حل آن از این الگوریتم‌ها کمک گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی این موضوع بود که الگوریتم‌های PSO و GA قادر هستند با دقت و سرعت بسیار خوبی به پاسخ بهینه دست یابند. هرچند مدت‌زمان اجرای برنامه در الگوریتم PSO بسیار کوتاه‌تر از الگوریتم GA است.

جدول ۶: نتایج حاصل از بهینه‌سازی در مثال سوم

روش بهینه‌سازی	مقادیر نامی DVRها (پریونیت)	مقدار نامی IDVR (پریونیت)	مدت‌زمان اجرای برنامه (ثانیه)
جستجوی کل فضای جواب	$V_{DVR,rated1}$=---- $V_{DVR,rated2}$=----	S_{total}=----	در ۳۰ ساعت نتیجه‌ای حاصل نشد
PSO	$V_{DVR,\ rated1}$=0.4949 $V_{DVR,\ rated2}$=0.4219	S_{total}=0.9159	۸/۹۳
GA	$V_{DVR,\ rated1}$=0.4957 $V_{DVR,\ rated2}$=0.4221	S_{total}=0.9173	۱۰۶/۵۸



شکل ۴: نمودار همگرایی الگوریتم‌های هوشمند در مثال سوم

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک استراتژی برای انتخاب مقادیر بهینه ولتاژ DVRها در ساختار IDVR ارائه گردید. در این استراتژی برخلاف کارهای مشابه گذشته، تغییرات بار فیدرها نیز لحاظ شده و مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی، همه بازه‌های منحنی بار را به صورت هم‌زمان جستجو می‌کند.

با توجه به زیاد بودن تعداد بازه‌های منحنی تغییرات بار فیدرها و بزرگ بودن فضای جواب مسئله، جستجوی تمام فضای جواب، امکان‌پذیر نبود. بنابراین برای حل مسئله از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند (PSO و GA) کمک گرفته شد. با ارائه مثال‌های عددی نشان داده شد که هر دو الگوریتم PSO و GA با دقت و سرعت بسیار خوبی می‌توانند مقادیر بهینه ولتاژ DVRها را استخراج نمایند. هرچند سرعت همگرایی الگوریتم PSO بالاتر از GA بود.

ضمیمه

برای فیدر شماره i و بازه شماره k (i=1,2 و k=1,2,...,T):

$$A_{i,k} = VF_i^2 - V_{Lmin,i}^2\left[2\cos^2\left(\phi_{i,k}\right)-1\right]$$
$$= VF_i^2 - V_{Lmin,i}^2\cos\left(2\phi_{i,k}\right)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

$$B_{i,k} = 2\cos(\phi_{i,k})\frac{V_{Lmin,i}^{\ 2}}{S_{L,i,k}}$$

$$C_{i,k} = -2V_{Lmin,i}^{\ 2}\left|\sin(\phi_{i,k})\right|$$

$$D_{i,k} = \left(\frac{VF}{V_{Lmin,i}}\right)^2 - \cos^2(\phi_{i,k})$$

$$E_{i,k} = 2\,\frac{\cos(\phi_{i,k})}{S_{L,i,k}}$$

$$F_{i,k} = -\frac{1}{S_{L,i,k}^{\ 2}}$$

$$G_{i,k} = -\cos(2\phi_{i,k})$$

$$H_{i,k} = -2\,\left|\sin(\phi_{i,k})\right|$$

$$M_{i,k} = -\cos^2(\phi_{i,k})$$

مراجع

[1] Dugan, R. C., and Mc Granghan, M. F., "*Electrical power system quality*", 2th edition, Mc Graw-Hill, New York, 2004.

[2] Bollen, M. H. J., "*Understanding power quality problems: voltage sag and interruptions*", John Wiley, New York, 1999.

[3] Gosh, A., and Ledwich, G., "*Power quality enhancement using custom power devices*", Kluwer Academic Publishers, New York, 2002.

[4] Li, G. J., Zhang, X. P., Choi, S. S., Lie, T. T., and Sun, Y. Z., "*Control Strategy for Dynamic Voltage Restorers to Achieve Minimum Power Injection Without Introducing Sudden Phase Shift*", IET Generation, Transmissions and Distribution, Vol. 1, No. 5, pp. 847-853, 2007.

[5] Choi, S. S., Li, J. D., and Vilathgamuwa, D. M., "*A generalized voltage compensation strategy for mitigating the impacts of voltage sags/swells*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, pp. 2289-2297, 2005.

[6] Babaei, E., Farhadi Kangarlu, M., and Sabahi, M., "*Mitigation of Voltage Disturbances Using Dynamic Voltage Restorer Based on Direct Converters*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 2676-2683, 2010.

[7] Babaei, E., Farhadi Kangarlu, M., and Sabahi, M., "*Compensation of Voltage Disturbances in Distribution Systems Using Single-Phase Dynamic Voltage Restorer*", Electric Power System Research, Vol. 80, No. 12, pp. 1413-1420, 2010.

[8] Vijekoon, H. M., Vilathgamuwa, D. M., and Choi, S. S., "*Interline dynamic voltage restorer: an economical way to improve interline power quality*", IEE Proceeding-Generation, Transmissions and Distribution, Vol. 150, No. 5, pp. 513-520, 2003.

[9] Vilathgamuwa, D. M., Vijekoon, H. M., and Choi, S. S., "*Interline Dynamic Voltage Restorer: A Novel and Economical Approach for Multi-Line Power Quality Compensation*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 6, pp. 1678-1685, 2004.

[10] Vilathgamuwa, D. M., Vijekoon, H. M., and Choi, S. S., "*A novel technique to compensate voltage sags in Multi-line distribution system-The interline dynamic voltage restorer*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 53, No. 5, pp. 1603-1611, 2006.

[11] Banaei, M. R., Hosseini, S. H., and Gharehpetian, G. B., "*Inter-line dynamic voltage restorer control using a novel optimum energy consumption strategy*", Simulation Modeling Practice and Theory, Vol. 14, No. 7, pp. 989-999, 2006.

[12] Elserougi, A., Hossam-Eldin, A., Massoud, A. and Ahmed, S., "*Investigation of Inter-Line Dynamic Voltage Restorer with virtual impedance injection*", 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2010.

[13] Ramchandra Nittala; Alivelu M. Parimi; K. Uma Rao., "*Comparing the performance of IDVR for mitigating voltage sag and harmonics with VSI and CSI as its building blocks*", IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), pp. 1-5, 2015.

[14] Aali, S. R., and Nazarpour, D., "*Voltage Quality Improvement with Neural Network-Based Interline Dynamic Voltage Restorer*", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 6, No. 6, pp. 769-775, 2011.

[15] Gopinath, C., Perumal, P. S., Ramesh, R. and Fathima, A. P., "*Design an Interline Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Compensation using Z-Source Inverter*", International Journal of Electrical Engineering, Vol. 4, No. 5, pp. 541-554, 2011.

[16] Nittala, R., Parimi, A. M. and Rao, K. U., "*Phase shifting transformer based Interline Dynamic Voltage Restorer to mitigate voltage sag*", 2013 Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1-6, 2013.

[17] Elserougi, A., Abdel-Khalik, A. S., Ahmed, S. and Massoud, A., "*Active and reactive power management of photovoltaic-based interline dynamic voltage restorer in low voltage distribution networks*", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3098 – 3104, 2011.

[18] Elserougi, A., Massoud, A. M., Abdel-Khalik, A. S., Ahmed, S. and Hossam-Eldin, A. A., "*An Interline Dynamic Voltage Restoring and Displacement Factor Controlling Device (IVDFC)*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 6, pp. 2737-2749, 2014.

[19] Moradlou, M., and Karshenas, H. R., "*Compensation range calculation in an interline dynamic voltage restorer (IDVR) encountering different voltage sag types*", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 24, No. 7, pp. 992-1005, 2014.

[20] Moradlou, M., and Karshenas, H. R., "*Design Strategy for Optimum Rating Selection of Interline DVR*" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 1, pp 242-249, 2011.

[21] Goldenberg, D. E., "*Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Wesley, Reading 1989.

[22] Houck, R. C., Joines, A. J., Kay, G. M., "*A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation*", NCSU-IE TR 95-09, 1995.

[23] Kennedy, J., Eberhart, R., "*Particle Swarm Optimization*", in Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Perth, Australia. Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.

[24] Mohammadi- Ivatloo, B., Rabiee, A., Soroudi, A., Ehsan, M., "*Iteration PSO with time varying acceleration*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]

coefficients for solving non-convex economic dispatch problems", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 42, pp. 508-516, 2012.

[25] Clerc, M., Kennedy, J., "*The particle swarm- explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space*", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, pp. 58-73, 2002.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.4.1]