جایابی بهینه منابع تولید پراکنده به همراه SSVR در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم تکاملی ایمنی

سید عباس طاهر[۱] اکرم شاهقلیان[۲]

۱- دانشیار- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان-کاشان- ایران
sataher@kashanu.ac.ir
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه کاشان- کاشان- ایران
akramshahgholian@yahoo.com

چکیده:در این مقاله به تعیین مکان و سایز بهینه منابع تولید پراکنده و SSVR با استفاده از الگوریتم تکاملی سیستم ایمنی در شبکه‌های توزیع پرداخته می‌شود. تابع هدف پیشنهاد شده جهت این جایابی شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و سود ناشی از کاهش تلفات بوده، همچنین شامل شاخص‌های کیفیت توان که نشان‌دهنده وضعیت ولتاژ، جریان، تلفات توان اکتیو و راکتیو می‌باشد. به منظور بررسی نتایج شبیه‌سازی دو شبکه توزیع نمونه استاندارد ۳۳ و ۶۹ باسه IEEE در نظر گرفته شده است. با این جایابی و تعیین اندازه بهینه ظرفیت منابع تولید پراکنده و SSVR در دو شبکه تحت مطالعه، تلفات سیستم بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و پروفیل ولتاژ نیز در باس‌های مختلف شبکه‌ها بهبود می‌یابد. همچنین بعد از طی مدت زمان معینی حدود ۷ سال سود حاصل از کاهش تلفات بیش از هزینه سرمایه‌گذاری با در نظرگرفتن نرخ تورم و هزینه‌های تعمیر و نگهداری خواهد بود.

کلمات کلیدی: جایابی بهینه،تولید پراکنده (DG)، جبران‌کننده استاتیکی سری ولتاژ (SSVR)، الگوریتم ایمنی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۱/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۰۶/۲۵
نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر سید عباس طاهر
نشانی نویسنده‌ی مسئول : : ایران – کاشان – بلوار قطب راوندی – دانشگاه کاشان– دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر-گروه مهندسی برق (قدرت)- کد پستی ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۱- مقدمه

به طور کلی هر نوع تولید انرژی در ظرفیت‌های نسبتاً کم که در محل مصرف یا در نزدیکی آن (عمدتاً در بخش توزیع شبکه قدرت) صورت می‌پذیرد، بدون در نظر گرفتن تکنولوژی مورد استفاده در پروسه تولید آن، نوعی تولید پراکنده (DG[1]) محسوب می‌شود. از دیدگاه عملی این سیستم یک نوع امکان برای تولید برق است که می‌تواند در داخل یا کنار محل استفاده مشتری نهایی (که ممکن است یک ناحیه دور افتاده، منطقه صنعتی، یک ساختمان تجاری یا یک مجتمع باشد) نصب و استفاده شود. واحدهای تولید پراکنده دارای انواع مختلفی هستند که بسته به نوع، ظرفیت نامی و نیز قیمت متفاوتند. استفاده از DG می‌تواند سبب کاهش تلفات سیستم و نیز بهبود ولتاژ گردد [۲-۱]. همچنین جبران‌کننده استاتیکی سری ولتاژ (SSVR[2]) که یکی از ادوات سری است، می‌تواند با اضافه نمودن یک بردار ولتاژ به شبکه، علاوه بر تنظیم استاتیکی ولتاژ، تلفات سیستم را نیز کاهش دهد [۳]. جایابی بهینه DG و SSVR در شبکه با در نظر گرفتن مکان و سایز بهینه آن منجر به بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش قابل توجه تلفات سیستم و در نهایت فراهم آمدن بیشترین سود و بازگشت سرمایه برای شبکه خواهد شد. استفاده از تابع هدف مناسب و بهره‌گیری از یک الگوریتم بهینه‌سازی مناسب که تقریبا به جوابهای مینیمم کلی نزدیک باشد، می‌تواند تاثیر به سزایی در یافتن بهترین مکان و بهترین سایز جهت نصب DG و SSVR داشته باشد.

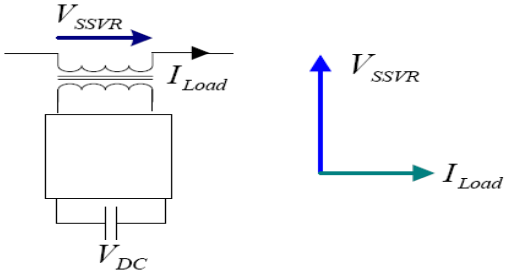
تاکنون تحقیقات زیادی در مورد تاثیر و جایابی بهینه DG و انواع جبران‌کننده‌ها در شبکه‌های توزیع انجام شده است. به عنوان نمونه در مرجع [۳] تاثیر استفاده از SSVR در چندین باس از شبکه‌های توزیع بررسی شده است. جایابی بهینه و سایز مناسب DG توسط الگوریتم حرکت جمعی پرندگان[3] در مرجع [۴] به‌گونه‌ای انجام گرفته که توان DG نصب شده در هر باس کوچکتر یا مساوی توان مصرفی آن باشد. در مرجع [۵] جایابی بهینه DG براساس آنالیز حساسیت معادلات پخش بار صورت گرفته است. در تعدادی از مراجع از الگوریتم‌های مختلفی همچون الگوریتم ژنتیک جهت بهبود قابلیت اطمینان، پروفیل ولتاژ و کاهش دادن هزینه سرمایه‌گذاری و تلفات شبکه استفاده شده است [۱۱-۶]. در بعضی مراجع مانند [۱۲] به ذکر روش‌های تحلیلی برای مشخص نمودن مکان بهینه DG با توجه به مینیمم کردن تلفات توان پرداخته شده است.

آنچه مسلم است استفاده از الگوریتم مناسب می‌تواند نقش بسزایی در پروسه بهینه‌سازی تابع هدف داشته باشد. یکی از الگوریتم‌های تکاملی مناسب که در علوم مهندسی و بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، الگوریتم سیستم ایمنی[4] بوده که با الهام از نظریه ایمنی در علوم زیستی می‌باشد. از این الگوریتم در حوزه‌های مختلف سیستم‌های قدرت جهت بهینه‌سازی استفاده شده که به عنوان نمونه می‌توان به استفاده از این الگوریتم جهت جایابی بهینه خازنها در سیستم‌های توزیع شعاعی [۱۳]، سوئیچینگ بهینه جهت کاهش تلفات توزیع و تعادل بار [۱۴] و نیز مکان‌یابی خطا در سیستم [۱۶-۱۵] اشاره نمود.

در این مقاله از الگوریتم ایمنی جهت جایابی بهینه و همزمان DG و SSVR در شبکه توزیع استفاده شده است. جهت این جایابی بهینه تابع هدف جامعی در نظر گرفته شده، به طوری که علاوه بر حداقل نمودن تلفات شبکه و جریان عبوری از شاخه‌ها و بهبود بخشیدن به پروفیل ولتاژ، هزینه کلی که شامل: الف) هزینه سرمایه گذاری جهت نصب این ادوات، ب) هزینه تلفات انرژی تا سال افق با در نظر گرفتن نرخ بهره و ج) هزینه تعمیر و نگه‌داری این ادوات هم حداقل گردد.

۲- معرفی اجمالی و مدل SSVR

SSVR یک جبران‌کننده سری است که علاوه بر تنظیم استاتیکی ولتاژ تلفات سیستم را نیز کاهش می‌دهد. در شکل (۱) شماتیک SSVR نمایش داده شده است. یک تنظیم‌کننده استاتیکی سری ولتاژ (SSVR) برای یک شبکه توزیع شامل یک مبدل VSI[5]، یک منبع پل[6] که از منبع توان تغذیه شده و ورودی DC اینورتر را تغذیه می‌کند، یک ترانسفورمر سری که بین منبع توان و بار قرار می‌گیرد و یک کنترل‌کننده بوده که این کنترل‌کننده برای عملکرد اینورتر می‌باشد، به‌گونه‌ای که در طی عملکرد عادی اینورتر همانند اتصال کوتاه بر روی ترانسفورمر سری عمل می‌نماید. در هنگام یک خطا که باعث ایجاد دیپ ولتاژ می‌شود خروجی اینورتر به صورت یک منبع ولتاژ سری تزریق می‌شود تا با یک عکس‌العمل سریع ولتاژ بار در اندازه مورد نظر باقی بماند[۳].



شکل (۱): شماتیک کلی یک SSVR به همراه دیاگرام فازوری عملکرد آن

سیستم کنترل SSVR در حالت ماندگار بین شبکه و SSVR توان راکتیو مبادله می‌کند، به عبارت دیگر مولفه ولتاژ تزریق شده توسط مبدل ولتاژ SSVR باید که عمود بر جریان بار (I_{Load}) نگه داشته شود.

۲-۱- مدل حالت ماندگار SSVR

دیاگرام تک خطی یک سیستم توزیع دو باسه و دیاگرام فازوری آن در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب نشان داده شده است. به طور کلی ولتاژ

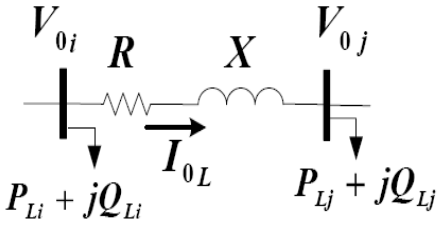
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

باس‌ها در سیستم کمتر از یک پریونیت است و ما تمایل داریم که با استفاده از SSVR ولتاژ باس مورد نظر (V_{0j}) را به یک پریونیت افزایش دهیم. با توجه به شکل (۳) رابطه بین ولتاژ و جریان را می‌توان به صورت زیر نوشت [۳]:

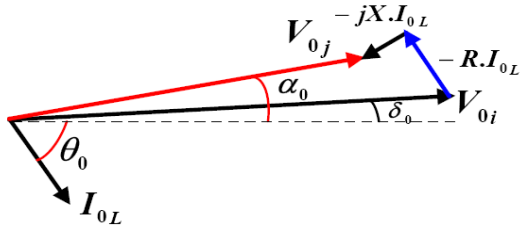
$$V_{0j}\angle\alpha_0 = V_{0i}\angle\delta_0 - (R+jX)I_{0L}\angle\theta_0 \qquad (۱)$$

که در آن:

$V_{0j}\angle\alpha_0$ ولتاژ باس j قبل از جبران، $V_{0i}\angle\delta_0$ ولتاژ باس i قبل از جبران، Z=R+jX امپدانس بین باس i و j و $I_{0L}\angle\theta_0$ جریان خط قبل از جبران می‌باشد.



شکل(۲): دیاگرام تک خطی یک سیستم توزیع ۲ باسه



شکل(۳): دیاگرام فازوری ولتاژ و جریان سیستم توزیع شکل (۲)

ولتاژهای $V_{0j}\angle\alpha_0$ و $V_{0i}\angle\delta_0$ و جریان $I_{0L}\angle\theta_0$ از محاسبات پخش بار بدست می‌آیند.

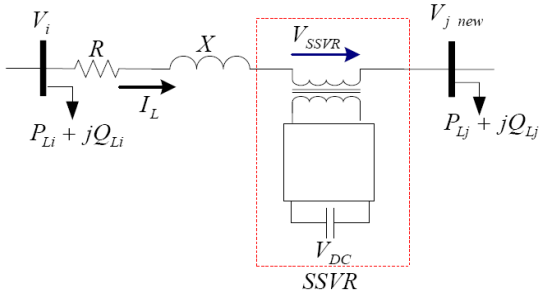
ولتاژ تزریق شده توسط SSVR و زاویه جدید ولتاژ جبران شده از میزان تغییرات اندازه ولتاژ از $V_{0j}\angle\alpha_0$ به مقدار ۱ پریونیت در شرایط حالت ماندگار بدست می‌آید. با نصب SSVR در شبکه توزیع، ولتاژ همه نقاط بخصوص نقاط نزدیک محل SSVR و جریان شاخه‌های شبکه در شرایط حالت ماندگار تغییر خواهد کرد. شماتیک دیاگرام تک خطی باس‌های i و j شبکه توزیع هنگامی که SSVR به منظور تنظیم ولتاژ در باس j قرار گرفته است در شکل (۴) مشاهده می‌شود. از آنجایی که SSVR برای تنظیم ولتاژ در شرایط حالت ماندگار استفاده می‌شود، فقط قادر به تزریق توان راکتیو به سیستم است. بنابراین ولتاژ SSVR باید عمود بر جریان SSVR (I_L) نگه داشته شود. همانطور که در دیاگرام فازوری شکل (۵) دیده می‌شود با استفاده از SSVR ولتاژ باس j از مقدار V_j به مقدار $V_{j\ new}$ تغییر می‌کند [۳]، بر این اساس داریم:

$$V_{SSVR}\angle\rho = V_{j\,new}\angle\alpha_{new} + (R+jX)I_L\angle\theta - V_i\angle\delta \qquad (۲)$$

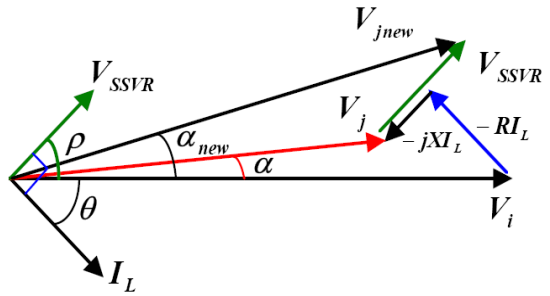
که در آن:

$$\rho = \frac{\pi}{2} + \theta \quad ,\theta < 0$$

$V_{j\,new}\angle\alpha_{new}$ ولتاژ باس j پس از جبران توسط SSVR، $V_i\angle\delta$ ولتاژ باس i پس از جبران توسط SSVR، $I_L\angle\theta$ جریان خط پس از نصب SSVR و $V_{SSVR}\angle\rho$ ولتاژ تزریق شده توسط SSVR می‌باشد.



شکل(۴): دیاگرام تک خطی سیستم توزیع ۲ باسه با در نظر گرفتن SSVR



شکل(۵): دیاگرام فازوری ولتاژ و جریان سیستم توزیع شکل (۴)

ولتاژ $V_i\angle\delta$ و جریان $I_L\angle\theta$ با استفاده از محاسبات پخش بار بدست می‌آیند، که با جدا کردن بخش حقیقی و موهومی معادله (۲) خواهیم داشت:

$$V_{SSVR}\cos(\rho) = V_{j\,new}\cos\alpha_{new} + \mathrm{Re}(ZI_L\angle\theta) - \mathrm{Re}(V_i\angle\delta) \qquad (۳)$$

$$V_{SSVR}\sin(\rho) = V_{j\,new}\sin\alpha_{new} + \mathrm{Im}(ZI_L\angle\theta) - \mathrm{Im}(V_i\angle\delta) \qquad (۴)$$

با در نظر گرفتن فرضیات زیر معادلات (۵) و (۶) از معادلات مذکور بدست می‌آیند:

$$a_1 = cos(\rho), a_2 = sin(\rho), b = V_{jnew},$$
$$c_1 = Re(ZI_L\angle\theta) - Re(V_i\angle\delta),$$
$$c_2 = Im(ZI_L\angle\theta) - Im(V_i\angle\delta),$$
$$x_1 = V_{SSVR}, x_2 = \alpha_{new}.$$

لذا داریم:

$$a_1x_1 = bcosx_2 + c_1 \qquad (۵)$$

$$a_2x_2 = bsinx_2 + c_2 \qquad (۶)$$

که در آن a_1،a_2،c_1 و c_2 ثابت بوده و x_1 و x_2 متغیر می‌باشند. b نیز اندازه ولتاژ جبران شده (۱ پریونیت) می‌باشد. با بازآرایی معادلات (۵) و (۶) خواهیم داشت:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

$$x_1 = \frac{-\mathrm{B} \pm \sqrt{\Delta}}{2\mathrm{A}} \quad (۷)$$

که در آن:

$$A = a_1^2 + a_2^2 = 1, B = -2 \times (a_1 c_1 + a_2 c_2)$$
$$C = c_1^2 + c_2^2 - b^2, \Delta = B^2 - 4AC$$

بطوریکه دو ریشه برای $x_1=V_{SSVR}$ بدست می‌آید که فقط یکی پاسخ صحیح می‌باشد. برای مشخص کردن پاسخ صحیح دو ریشه تحت شرایط مرزی زیر در نتایج پخش بارمورد آزمایش قرار می‌گیرد:

اگر $b=V_{j\,new}=V_{oj}$ آنگاه بایستی که $x_1=V_{SSVR}=0$

پس از آزمایش این شرایط در نتایج پخش بار، پاسخ صحیح برای x_1 عبارت است از:

$$x_1 = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2A} \quad (۸)$$

بنابراین با استفاده از معادلات (۵) و (۶)، $x_2= \alpha_{new}$ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$x_2 = \cos^{-1}\left(\frac{a_1 x_1 - c_1}{b}\right) \quad (۹)$$

یا

$$x_2 = \sin^{-1}\left(\frac{a_2 x_1 - c_2}{b}\right) \quad (۱۰)$$

و در نهایت توان راکتیو تزریقی توسط SSVR به شبکه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$jQ_{SSVR} = \vec{V}_{\mathrm{SSVR}} . \vec{I}_{\mathrm{L}}^{*} \quad (۱۱)$$

که در آن:

$$\vec{V}_{\mathrm{SSVR}} = V_{\mathrm{SSVR}}\angle\rho, \vec{I}_L = I_{\mathrm{L}}\angle\theta$$

۲-۲- مدل SSVR در ماکزیمم ظرفیت تزریق توان راکتیو

در بخش قبل فرض بر این بود که اندازه ولتاژ در باس j ($V_{j\,new}$) برابر مقدار از پیش تعیین شده b (به عنوان مثال ۱ پریونیت) در نظر گرفته شود. در صورتی که توان راکتیو محاسبه شده توسط معادله (۱۱) بزرگتر از ماکزیمم توان راکتیو تزریقی SSVR باشد، بیشترین اندازه ولتاژ سری تزریق شده توسط SSVR را می‌توان از طریق معادله زیر بدست آورد:

$$V_{\mathrm{SSVR\,max}} = \frac{\mathrm{Q_{SSVR\,max}}}{\mathrm{I_L}} \quad (۱۲)$$

بنابراین ولتاژ تزریق شده توسط SSVR در این حالت برابر خواهد بود با:

$$\vec{V}_{\mathrm{SSVR\,max}} = V_{\mathrm{SSVR\,max}}\angle\rho \quad (۱۳)$$

تحت این شرایط اندازه ولتاژ جبران شده نمی‌تواند در مقدار از پیش تعیین شده‌ای (به عنوان مثال ۱ پریونیت) تنظیم شود. بنابراین اندازه ولتاژ ($V'_{j\,new}$) و زاویه فاز (α'_{new}) جدید باس j با بازآرایی معادله (۲) از طریق معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$V'_{j\,new}\angle\alpha'_{new} = V_i\angle\delta - (R + jX)I_L\angle\theta + V_{SSVRmax}\angle\rho \quad (۱۴)$$

۳- الگوریتم سیستم ایمنی

الگوریتم ایمنی مصنوعی با استفاده از مدل‌های مشابه آنتی‌ژن و آنتی بادی‌های سیستم ایمنی بیولوژیکی بنا شده است. مکانیسم تشخیص در سیستم ایمنی طبیعی براساس شکل مکمل (قالب) بین آنتی‌ژن و سلول پذیرنده است. از الگوریتم ایمنی برای حل مسائل بهینه‌سازی در سیستم‌ها استفاده زیادی می‌شود. بطوریکه می‌توان در مسائل بهینه‌سازی گسسته نیز مانند سایر الگوریتم‌ها از آن استفاده نمود [۱۷-۲۲].

مراحل این الگوریتم که بر مبنای استفاده از اصول ایمنی انتخاب کلونی و جایگذاری آنتی‌بادی‌های با درجه شباهت پایین می‌باشد، به صورت زیر است [۱۸-۱۹]:

a) مقدار دهی اولیه[۷]: در مجموعه اولیه (جمعیت)، به نام AB، تعداد n آنتی‌بادی (Ab) i=1,...,n ایجاد می‌شود.

b) ارزیابی[۸]: یک آنتی‌ژن، Ag برای مسئله در نظر گرفته می شود که با تمام آنتی‌بادی‌های $Ab_i \in AB$ مقایسه می‌شود. همچنین درجه شباهت آنها f_i بوده که با توجه به آنتی‌ژن تعیین می‌گردد.

c) جایگذاری[۹]: با احتمال معین P_r یک آنتی‌بادی جدید تولید می‌شود و در یک مجموعه جدید قرار می‌گیرد، بطوریکه پارامتر P_r، احتمال جایگذاری می‌باشد.

d) کلون‌کردن: زمانی که یک آنتی‌بادی جدید در مرحله قبل تولید نشود یک آنتی‌بادی (Ab) از مجموعه فعلی انتخاب می‌شود. احتمال انتخاب شدن یک آنتی‌بادی بطور مستقیم با درجه شباهت آن به آنتی‌ژن متناسب است. به طور خلاصه هر آنتی‌بادی با احتمال P_c، کلون می‌شود و در مجموعه جدید قرار می‌گیرد. پارامتر P_c احتمال کلون شدن می‌باشد.

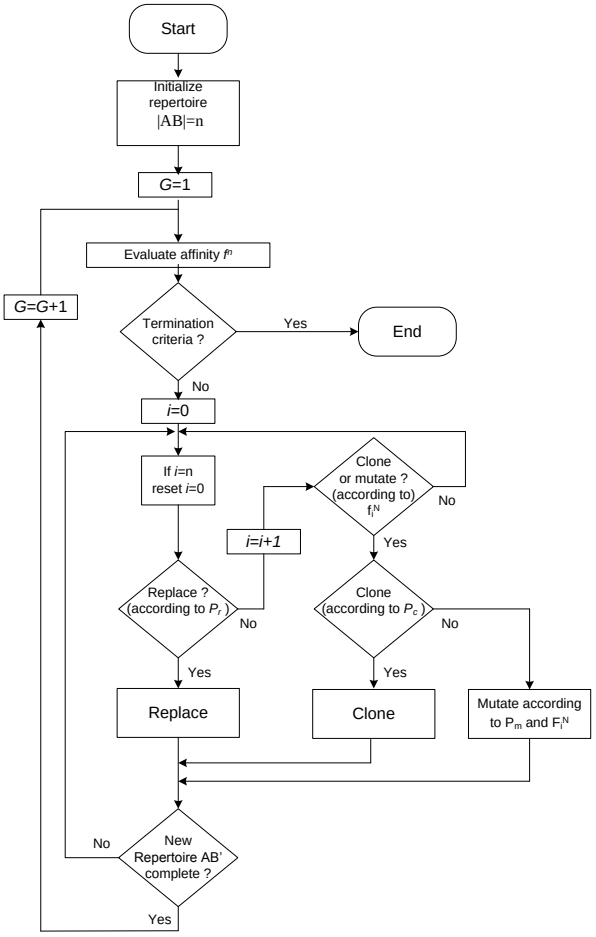
e) ابرجهش: اگر آنتی‌بادی با درجه شباهت بالا انتخاب شود و در مرحله قبلی کلون نشده باشد به قسمت ابرجهش فرستاده می‌شود. آنتی‌بادی انتخاب شده برای ابرجهش هر عنصر رشته مربوطه‌اش با احتمال P_m جهش می‌یابد. این احتمال نسبت عکس با درجه شباهت آنتی‌بادی با آنتی‌ژن دارد.

f) تکرار – مجموعه[۱۰]: مراحل c تا e تکرار شده تا مجموعه جدید AB با اندازه n ایجاد گردد.

g) تکرار الگوریتم: مجموعه جدید تولید می‌شود و به مرحله b (ارزیابی) فرستاده می‌شود این پروسه به صورت تکرار تا رسیدن به شرایط توقف ادامه می‌یابد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

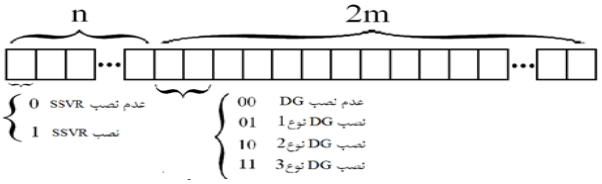
در شکل (۶) فلوچارت الگوریتم ایمنی آورده شده است.



شکل(۶): فلوچارت الگوریتم ایمنی

۳-۱- ساختار آنتی بادی

با توجه به تعداد نقاط و سایز منابع تولید پراکنده و SSVR، ساختار هر کروموزوم یا آنتی‌بادی مشخص می‌گردد. به عنوان مثال در صورتی که تعداد n نقطه جهت نصب SSVR و m نقطه جهت نصب DG در نظر گرفته شده باشد، طول هر رشته کروموزوم یا آنتی بادی،(n+2m) می‌باشد. به این صورت که n آلل ابتدای هر رشته نمایش‌دهنده نصب یا عدم نصب SSVR در نقاط پیشنهادی جهت نصب SSVR می‌باشد که در صورت یک بودن به نصب و در صورت صفر بودن به عدم نصب SSVR در آن نقطه اشاره می‌کند. ۲m آلل بعدی به صورت دوتا دوتا نصب یا عدم نصب و همچنین سایز DG را نشان می‌دهند. در شکل(۷) ساختار هر رشته آنتی بادی نشان داده شده است.



شکل (۷): ساختار هر رشته آنتی بادی

۴- شاخص‌های کیفیت توان

به منظور اعمال تاثیر همزمان نصب DG یا SSVR بر میزان کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو، بهبود پروفیل ولتاژ و نیز کاهش جریان عبوری از فیدرها از تعدادی شاخص‌های کیفیت توان استفاده می‌شود. این شاخص‌ها شامل چهار شاخص مربوط به تلفات توان اکتیو و راکتیو، پروفیل ولتاژ و نیز ظرفیت جریان شاخه‌ها می‌باشند،که در ادامه به ذکر آنها پرداخته خواهد شد [۲۴-۲۳].

۴-۱- شاخص‌های کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو

به دلایل اقتصادی و ملاحظات زیست محیطی یکی از مهمترین اهداف استفاده از SSVR و DG و جایابی بهینه آن‌ها رساندن تلفات شبکه به حداقل ممکن می‌باشد. هرچند استفاده از DG در بسیاری از موارد با کاهش بار خطوط می‌تواند باعث کاهش تلفات شبکه گردد، لیکن در مواردی استفاده از DG با ظرفیت بالا می‌تواند با جاری کردن یک جریان معکوس در شبکه باعث افزایش تلفات شبکه شود. لذا لازم است از شاخص‌هایی که مرتبط با تلفات توات اکتیو راکتیو می‌باشند، استفاده گردند که بر این اساس از شاخصهای بیان شده توسط معادلات (۱۵) و (۱۶) بهره گرفته می‌شود. بطوریکه نصب SSVR یا DG در یک مکان مناسب تلفات توان اکتیو و راکتیو را کاهش خواهد داد که این به معنای نزدیک به مقدار ۱بودن هر کدام از شاخص‌ها می‌باشد.

$$ILP^k = 1 - \frac{Re\{Losses^k\}}{Re\{losses^0\}} \qquad (۱۵)$$

$$ILQ^k = 1 - \frac{Im\{Losses^k\}}{Im\{losses^0\}} \qquad (۱۶)$$

که در آن، $Losses^k$ تلفات شبکه درkامین مکان یابی SSVR یا DG و $Losses^0$ تلفات شبکه بدون وجود ادوات مذکور در شبکه می‌باشد.

۴-۲- شاخص بهبود پروفیل ولتاژ

یکی دیگر از مزایای جایابی مناسب SSVR و DG افزایش پروفیل ولتاژ شبکه می‌باشد. جایابی باید به‌گونه‌ای باشد که ولتاژ هیچ نقطه‌ای از شبکه از حد پایین مجاز کمتر نباشد. لذا سومین شاخص در خصوص میزان تاثیر SSVR یا DG به منظور بهبود پروفیل ولتاژ می‌باشد، که توسط معادله (۱۷) بیان شده است:

$$IVD^k = 1 - max\left(\frac{|V_0| - |V_i^k|}{|V_0|}\right)_{i=1}^{nn} \qquad (۱۷)$$

که در آن،nn تعداد باس‌های شبکه، V_i^k ولتاژ باس i در kامین مکان‌یابی SSVR یا DG و V_0 مینیمم ولتاژ مجاز شبکه و بنابر استاندارد IEEE 519 برابر با 0.9 pu می‌باشد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

بدیهی است در صورتی که ولتاژ هیچ نقطه‌ای از شبکه از مینیمم ولتاژ مجاز شبکه کمتر نباشد مقدار این شاخص بزرگتر یا مساوی ۱ خواهد بود.

۴-۳- شاخص بهبود پروفیل جریان

در نتیجه‌ی تغذیه بار در نزدیکی آن یا در همان محل بار، جریان بعضی از بخش‌های شبکه کاهش یافته و بخشی از ظرفیت آن‌ها آزاد می‌گردد لیکن ممکن است جریان بخش‌های دیگری از شبکه بیشتر از ماکزیمم جریان مجاز آن شود. لذا بهره‌گیری از یک شاخص مناسب (رابطه (۱۸)) اطلاعات مهمی را در مورد جریان شبکه با توجه به ماکزیمم ظرفیت هادی‌ها بدست می‌دهد.

$$IC^k = 1 - max\left(\frac{J_m^k}{CC_m}\right)_{m=1,2,\dots nl} \quad (۱۸)$$

که در رابطه مذکور، nl تعداد خطوط شبکه، $J_m{}^k$ جریان خط mام در kامین مکان‌یابی SSVR یا DG و CC_m ظرفیت خط mام شبکه می‌باشد. هرچه این شاخص بیشتر به سمت ۱ میل کند به این معنی است که ظرفیت خالی شبکه برای رشد بار آینده بیشتر خواهد بود.

۵- معرفی تابع هدف

یکی از مهمترین مراحل جایابی بهینه منابع تولید پراکنده به همراه SSVR در شبکه توزیع توسط الگوریتم‌های تکاملی، در نظر گرفتن تابع هدفی مناسب است. به‌گونه‌ای که علاوه بر جایابی اقتصادی این ادوات در شبکه، کاهش تلفات به بیشترین میزان ممکن صورت پذیرد و شاخص‌های کیفیت توان نیز به میزان قابل توجهی بهبود یابند. به این منظور با توجه به مطالبی که در مورد شاخص‌های کیفیت توان ذکر شد و همچنین با در نظر گرفتن قیمت انواع DG و SSVR، نرخ بهره و نیز هزینه تعمیر و نگهداری (ارائه شده در جدول (۱)) تابع هدف مورد نظر تعیین می‌گردد.

به این صورت که تابع هدف به صورت نسبت هزینه خالص سرمایه‌گذاری شده به حاصل‌ضرب پارامترهای کیفیت توان در نظر گرفته شده است (معادله (۱۹)) و هدف مینیمم کردن آن می‌باشد.

$$Fitness\ Function = \frac{\sum_{i=1}^{m} B_i(1+(a_1+a_2))^{2(m+1-i)}}{\prod_{j=1}^{4} I_j^{bj}} + \frac{\sum_{i=1}^{m}(2+a_1)C_i(1+a_1)^{2(m-1)}}{\prod_{j=1}^{4} I_j^{bj}} \quad (۱۹)$$

که در آن:

a_1 نرخ بهره، a_2 هزینه تعمیر و نگه‌داری سالیانه، m تعداد پله‌های بار، I_j شاخص کیفیت توان jام، b_j ضریب توانی متناسب با شاخص jام و B_i مجموع هزینه DG و SSVR نصب شده در پله iام بار می‌باشد که مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌گردد.

$$B_i = \sum_{k=1}^{3}(number\ of\ DG\ type\ k \times cost\ of\ DG\ type\ k) + (number\ of\ SSVR \times cost\ of\ SSVR) \quad (۲۰)$$

که در آن:

C_i سود ناشی از کاهش تلفات انرژی در پله iام بار بوده و مقدار آن از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$C_i = 8760 \times (cost\ of\ 1\ kWh\ energy) \times \Delta P_{loss\,i} \quad (۲۱)$$

که در این رابطه ΔP_{lossi} میزان کاهش تلفات انرژی طی پله iام بار بوده و مقداری منفی دارد. مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده در معادلات مذکور در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده در تابع هدف

DG cost	۷۰۰$/kW
SSVR cost	۸۰$/kVAr
Cost of energy	۰/۱$/kWh
Annual maintenance cost	٪۴
Rate of interest	٪۱۰
Maximum active power of DG type 1	۱۰۰kW
Maximum active power of DG type 2	۱۵۰kW
Maximum active power of DG type 3	۲۰۰kW
Maximum reactive power of SSVR	۱۰۰kVAr
Voltage index factor (b_1)	۱
Active power loss index factor (b_2)	۲
Reactive power loss index factor (b_3)	۱
Current index factor (b_4)	۴

در صورتی که سود حاصل از کاهش تلفات بیش از هزینه نصب ادوات مذکور گردد، صورت کسر تابع هدف برابر مقداری منفی می‌گردد در این صورت افزایش مخرج که معادل افزایش شاخص‌های کیفیت توان می‌باشد منجر به افزایش تابع هدف می‌گردد. به همین دلیل جهت پیشگیری از بروز اشتباه هنگامی که هزینه خالص سرمایه‌گذاری منفی می‌گردد، از تابع هدف زیر استفاده شده است.

$$FitnessFunction = \sum_{i=1}^{m}[B_i(1+(a_1+a_2))^{2(m+1-i)} + (2+a_1)C_i(1+a_1)^{2(m-i)}] \times \prod_{j=1}^{4} I_j^{b_j} \quad (۲۲)$$

بدیهی است هر چه هزینه خالص سرمایه‌گذاری شده کمتر بوده و شاخص‌های کیفیت توان مقادیر نزدیکتری به ۱ داشته باشند، جایابی بهتری صورت گرفته است.

۶- بررسی نتایج شبیه سازی

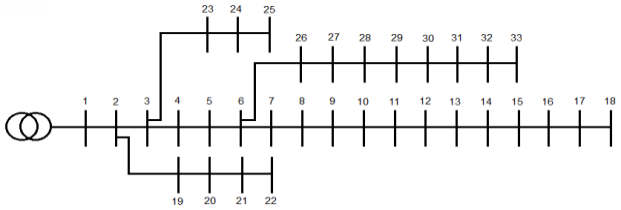
در شبکه‌های مورد مطالعه ۳۳و ۶۹ باسه IEEE با توجه به پنج سطح بار در یک دوره ۱۰ ساله، جایابی منابع تولید پراکنده به همراه SSVR انجام گرفته است. این جایابی در هر سال برای سطح بار همان سال انجام شده و مکان و توان بهینه ادوات مذکور در شبکه برای همان سال انتخاب می‌شود، در سال بعد با توجه به سطح بار آن سال و مکان‌های جایابی شده برای DG و

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

SSVR در سال قبل مکان‌یابی بهینه صورت می‌گیرد. به این صورت که در مکان‌های انتخاب شده در سال قبل فقط امکان افزایش ظرفیت DG وجود داشته و حذف آن مقدور نیست. برای حل مسئله پخش‌بار در سیستم‌های تحت مطالعه از روش پسرو-پیشرو استفاده شده است [۲۶-۲۵].

۶-۱- جایابی بهینه DG و SSVR در شبکه۳۳ باسه

دیاگرام تک خطی شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE در شکل (۸) آورده شده است. پارامترها و مشخصات شبکه مذکور در مرجع [۲۶] آمده است. جهت مقایسه میزان کارایی الگوریتم سیستم ایمنی مطالعات فوق با استفاده از الگوریتم ژنتیک نیز انجام شده است که نتایج آن ارائه شده است. نتایج حاصل از این جایابی بهینه در شبکه مورد مطالعه که در قالب هزینه کلی ادوات، هزینه و سودآوری کلی طرح و نیز میزان کاهش تلفات می‌باشد برای الگوریتم سیستم ایمنی و برای الگوریتم ژنتیک در جدول (۲) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با این جایابی تلفات توان کاهش یافته و از پله چهارم بار به بعد طرح مذکور سودآوری خواهد داشت.



شکل (۸):دیاگرام تک خطی شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE

جدول(۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شبکه ۳۳ باسه توسط الگوریتم‌های ژنتیک و سیستم ایمنی

Load Level	Total Active (kW) and Reactive Power (kVAr)	Method	Cost of DG & SSVR ($)	Total Saving ($) [- Cost, + Saving]	Loss Reduction (kW)
۱	۲۹۷۲+J۱۸۴۴	GA	۱۴۸۶۰۰۰	-۱۷۶۲۱۴۶	۹۰/۱۸
		IA	۱۴۸۶۰۰۰	-۱۷۶۲۱۳۶	۹۰/۱۹
۲	۳۳۴۳/۵+J۲۰۷۴/۵	GA	۱۰۵۰۰۰	-۱۱۴۲۹۷۱	۱۱۵/۸۹
		IA	۱۰۵۰۰۰	-۱۱۴۲۸۴۷	۱۱۵/۹۹
۳	۳۷۱۵+J۲۳۰۵	GA	۱۴۰۰۰۰	-۱۴۳۸۳۳۴	۱۴۱/۷۸
		IA	۱۴۰۰۰۰	-۱۴۳۵۲۶۷	۱۴۵/۷۸
۴	۴۰۸۶/۵+J۲۵۳۵/۵	GA	۱۴۰۰۰۰	۱۵۲۳۶۸۳	۱۷۵/۳۴
		IA	۱۴۰۰۰۰	۱۵۲۷۸۶۸	۱۷۹/۶۶
۵	۴۴۵۸+J۲۷۶۶	GA	۱۴۰۰۰۰	۱۱۷۱۱۱۰۶	۲۱۱/۳۱
		IA	۱۴۰۰۰۰	۱۱۷۱۵۶۲۲	۲۱۷/۰۲

همانطور که از مقایسه نتایج جدول (۲) مشاهده می‌شود نتایج جایابی توسط الگوریتم سیستم ایمنی نسبت به ژنتیک بهینه‌تر بوده و لذا الگوریتم پیشنهادی به جواب بهینه کلی نزدیک‌تر می‌باشد. مکان‌های پیشنهاد شده جهت نصب DG و SSVR در هر پنج پله بار توسط الگوریتم سیستم ایمنی در جدول (۳) آورده شده است.

جدول(۳): محل نصب DG و SSVR در شبکه ۳۳ باسه

Load Level	Location of SSVR	Location of DG-Type 1	Location of DG-Type 2	Location of DG-Type 3
۱	۶,۱۳	۱۳,۱۴,۱۶,۱۸	۹,۳۱	۷,۸,۲۴,۲۵,۲۹,۳۰,۳۲
۲	۶,۱۳	۱۳,۱۶,۱۸	۹	۷,۸,۱۴,۲۴,۲۵,۲۹,۳۰,۳۱,۳۲
۳	۶,۱۳	۱۶,۱۸,۳۳	-	۷,۸,۹,۱۳,۱۴,۲۴,۲۵,۲۹,۳۰,۳۱,۳۲
۴	۶,۱۳	۱۶,۱۷,۱۸	-	۷,۸,۹,۱۳,۱۴,۲۴,۲۵,۲۹,۳۰,۳۱,۳۲,۳۳
۵	۶,۱۳	۱۶,۱۷,۱۸	۱۵	۷,۸,۹,۱۳,۱۴,۲۴,۲۵,۲۹,۳۰,۳۱,۳۲,۳۳

جهت مقایسه نتایج وضعیت شبکه قبل و بعد از جایابی منابع تولید پراکنده و SSVR توسط الگوریتم سیستم ایمنی نتایج شبیه‌سازی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): مقایسه نتایج قبل و بعد از جایابی بهینه DG و SSVR در شبکه ۳۳ باسه

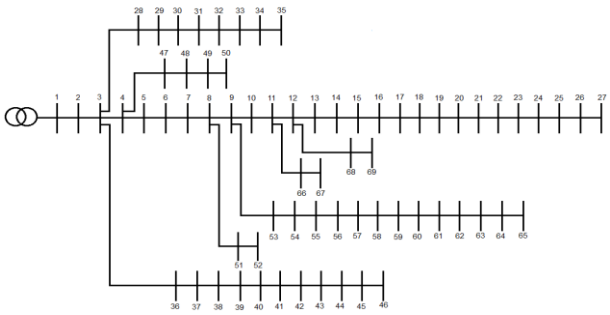
Load Level		۱	۲	۳	۴	۵
Before Optimal Location	Min Voltage (pu)	۰/۹۲۴	۰/۹۱۴	۰/۹۰۴	۰/۸۹۳	۰/۸۸۹
	Max Current (A)	۲۸۸/۶	۳۲۶/۷	۳۶۵/۳	۴۰۴/۵	۴۷۰/۴
	Active Power Loss (kW)	۱۳۱/۳	۱۶۸/۹	۲۱۲	۲۶۰/۹	۳۱۶
	Reactive Power Loss (kVAr)	۸۸/۶	۱۱۴	۱۴۳/۲	۱۷۶/۳	۲۱۳/۶
After Optimal Location	Min Voltage (pu)	۰/۹۸۸	۰/۹۸۶	۰/۹۸۴	۰/۹۸۲	۰/۹۷۹
	Max Current (A)	۱۶۱/۸	۱۸۶/۲	۲۰۷/۳	۲۳۰/۲	۲۵۵/۲
	Active Power Loss (kW)	۴۱/۱	۵۲/۹	۶۶/۲	۸۱/۳	۹۸/۹
	Reactive Power Loss (kVAr)	۲۷/۷	۳۵/۵	۴۴/۵	۵۴/۷	۶۶/۵

همانطور که از جدول (۴) مشاهده می‌شود حداقل بهبود ولتاژ، حداقل کاهش جریان فیدر و نیز حداقل کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو در پنج سطح بار به‌ترتیب عبارتند از: ۶/۹۳٪، ۴۳٪، ۶۸/۶۸٪ و ۶۸/۷۴٪ می‌باشد. بنابراین علاوه بر سودآوری طرح، ولتاژ در شبکه بهبود یافته و جریان فیدرها و تلفات کلی نیز کاهش یافته است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۶-۲- جایابی بهینه DG و SSVR در شبکه ۶۹ باسه

دیاگرام تک‌خطی شبکه توزیع ۶۹ باسه IEEE در شکل (۹) آورده شده و نیز مشخصات آن در مرجع [۲۷] آمده است. نتایج حاصل از این جایابی بهینه که در قالب هزینه کلی SSVR وDG، هزینه و سودآوری کلی طرح و نیز میزان کاهش تلفات برای الگوریتم پیشنهادی در جدول (۵) برای شبکه مذکور ارائه شده است. با توجه به جدول مذکور مشاهده می‌گردد که با این جایابی بهینه مشابه شبکه ۳۳ باسه، ضمن کاهش تلفات، از پله چهارم بار سودآوری طرح شروع خواهد شد. مکان‌های پیشنهاد شده جهت نصب DG و SSVR نیز در هر پله بار در جدول (۶) آورده شده است.



شکل(۹): دیاگرام تک خطی شبکه توزیع ۶۹ باسه IEEE

جدول(۵): نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شبکه ۶۹ باسه توسط الگوریتم سیستم ایمنی

Load Level	Total Active (kW) and Reactive Power (kVAr)	Cost of DG & SSVR ($)	Total Saving ($) [- Cost, + Saving]	Loss Reduction (kW)
۱	۳۰۴۱/۷۵+J ۲۱۵۵/۷	۱۶۲۶۰۰۰	-۱۹۳۱۹۵۸	۹۶/۶۵
۲	۳۴۲۱/۹۷+J ۲۴۲۵/۱	۷۰۰۰۰	-۱۲۰۶۸۷۴	۱۲۴/۷۳
۳	۳۸۰۲/۱۹+ J ۲۶۹۴/۶	۲۱۰۰۰۰	-۱۶۱۲۴۹۶	۱۵۷/۸۵
۴	۴۱۸۲/۴۱+J ۲۹۶۴/۱	۲۱۰۰۰۰	۱۴۷۵۳۹۳	۱۹۵/۰۹
۵	۴۵۶۲/۶۳+J ۳۲۳۳/۵	۱۴۰۰۰۰	۱۲۳۹۳۰۳۴	۲۳۵/۹۹

جهت مقایسه وضعیت شبکه قبل و بعد از جایابی منابع تولید پراکنده و SSVR خلاصه نتایج شبیه‌سازی در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول(۶): محل نصب DG و SSVR در شبکه ۶۹ باسه در هر پله بار

Load Level	Location of SSVR	Location of DG-Type 1	Location of DG-Type 2	Location of DG-Type 3
۱	۵۸,۵۹	۲۱,۲۲,۲۳, ۶۵	۵۷,۵۹	۱۲,۴۹,۵۰,۶۰,۶۱,۶۲,۶۳, ۶۴
۲	۵۸,۵۹	۲۱,۲۲,۲۳	۵۷,۵۹	۱۲,۴۹,۵۰,۶۰,۶۱,۶۲,۶۳, ۶۴,۶۵
۳	۵۸,۵۹	۲۲,۲۳,۵۸	-	۱۲,۲۱,۲۲,۲۳,۴۸,۴۹,۵۰, ۵۷,۵۸,۵۹,۶۰,۶۱,۶۲,۶۳, ۶۴,۶۵
۴	۵۸,۵۹	۲۳,۴۸	-	۱۲,۲۱,۲۲,۲۳,۴۸,۴۹,۵۰, ۵۷,۵۸,۵۹,۶۰,۶۱,۶۲,۶۳, ۶۴,۶۵
۵	۵۸,۵۹	-	-	۱۲,۲۱,۲۲,۲۳,۴۸,۴۹,۵۰, ۵۷,۵۸,۵۹,۶۰,۶۱,۶۲,۶۳, ۶۴,۶۵

جدول (۷):مقایسه نتایج قبل و بعد از جایابی بهینه DG و SSVR در شبکه ۶۹ باسه

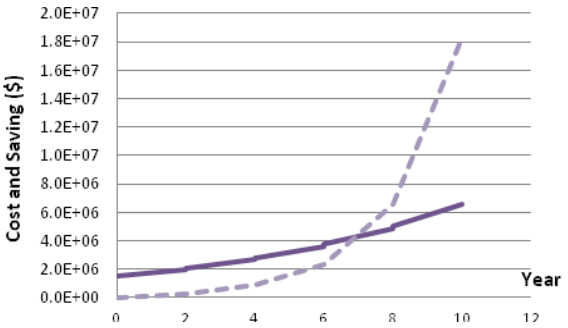
Load Level		۱	۲	۳	۴	۵
Before Optimal	Min Voltage (pu)	۰/۹۲۹	۰/۹۱۹	۰/۹۰۹	۰/۸۹۹	۰/۸۸۹
	Max Current (A)	۳۰۶/۳	۳۴۶/۶	۳۸۷/۳	۴۲۸/۶	۴۷۰/۴
	Active Power Loss (kW)	۱۳۸/۹	۱۷۸/۹	۲۲۵	۲۷۷/۵	۳۳۶/۷
	Reactive Power Loss (kVAr)	۶۳/۲	۸۱/۳	۱۰۲/۱	۱۲۵/۸	۱۵۲/۵
After Optimal	Min Voltage (pu)	۰/۹۸۸	۰/۹۸۵	۰/۹۸۴	۰/۹۸۱	۰/۹۷۶
	Max Current (A)	۱۸۰/۸	۲۰۸/۷	۲۳۱	۲۵۲/۹	۲۷۷/۳
	Active Power Loss (kW)	۴۲/۳	۵۴/۲	۶۷/۲	۸۲/۴	۱۰۰/۷
	Reactive Power Loss (kVAr)	۱۹/۷	۲۵/۵	۳۱/۷	۳۸/۸	۴۷/۳

با توجه به نتایج آورده شده در جدول (۷) مشاهده می‌شود که حداقل بهبود ولتاژ، حداقل کاهش جریان فیدر و نیز حداقل کاهش تلفات توان اکتیو و راکتیو در پنج سطح بار به ترتیب عبارتند از: ۶/۳۵٪، ۳۹/۷۹٪، ۶۹/۵۵٪ و ۶۸/۶۳٪ می‌باشد. لذا در این جایابی علاوه بر سودآوری طرح، سطح ولتاژ در شبکه بهبود یافته ضمن آنکه جریان فیدرها و تلفات کلی شبکه نیز کاهش یافته است.

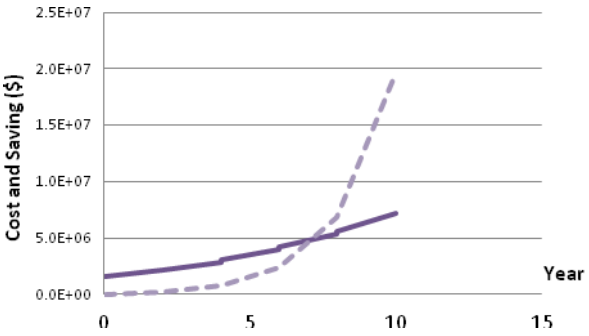
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۶-۳-بررسی بازگشت سرمایه در شبکه‌های تحت مطالعه

برای بررسی اقتصادی بودن طرح منحنی بازگشت سرمایه برای دو شبکه مورد مطالعه در شکلهای (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در هر کدام از شکل‌ها نمودار هزینه سرمایه‌گذاری شده در هر پله بار با در نظر گرفتن نرخ تورم و هزینه‌های تعمیر و نگهداری و نیز نمودار سود ناشی از کاهش تلفات نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها دوره بازگشت سرمایه حدودا" ۷ سال بوده، بطوریکه پس از این مدت ضمن جبران کلیه هزینه‌های سرمایه‌گذاری، سود آوری طرح آغاز می‌شود.



شکل(۱۰): منحنی بازگشت سرمایه شبکه ۳۳ باسه برای ۵ پله بار در طی ۱۰ سال (Cost, ---Saving—)



شکل(۱۱): منحنی بازگشت سرمایه شبکه ۶۹ باسه برای ۵ پله بار در طی ۱۰ سال (Cost, ---Saving—)

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم ایمنی به جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و SSVR پرداخته شد. تابع هزینه پیشنهادی شامل کلیه هزینه‌های سرمایه‌گذاری با توجه به نرخ تورم، سود ناشی از کاهش تلفات و شاخص‌های کیفیت توان که نشان‌دهنده وضعیت ولتاژ، جریان و تلفات می‌باشد. مقایسه نتایج قبل و بعد از جایابی بهینه منابع تولید پراکنده و SSVR برای شبکه‌های ۳۳ و ۶۹ باسه IEEE نشان می‌دهد که علاوه بر بهبود چشمگیر مینیمم ولتاژ، جریان خطوط نیز به مقدار زیادی کاهش یافته است. تلفات کلی دو شبکه مذکور در پنج سطح بار به ترتیب حداقل ۶۸/۷٪ و ۶۹/۳٪ کاهش یافته است. همچنین طرح‌های مذکور بعد از حدود ۷ سال به سودآوری لازم می‌رسند. با توجه به مقایسه انجام گرفته بین نتایج حاصل از روش پیشنهادی و بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، مشاهده می‌شود که جوابهای حاصل از استفاده از الگوریتم سیستم ایمنی به نقطه بهینه کلی نزدیکتر می‌باشد.

مراجع

[1] P. Chiradeja, R. Ramakumar, "An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation",IEEE Trans. on Energy Conversion, Dec. 2004, Vol. 19, No. 4, pp. 764-773.

[2] A. Invernizzi, et al., "Distribution Systems and Dispersed Generation: Anew Focus for CIGRE", Electra, Apr. 2004, No. 213, pp. 17-21.

[3] M. Hosseini, H.A. Shayanfar, M. Fotuhi-Firuzabad, "Reliability Improvement of Distribution Systems Using SSVR",Elsevier ISA Transactions, January 2009, Vol. 48, No. 1, pp. 98-106.

[4] M. Gomez, A. Lopez, F. Jurado, "Optimal Placement and Sizing from Standpoint of the Investor of Photovoltaic's Grid-Connected Systems using Binary Particle Swarm Optimization", Applied Energy, Elsevier, June 2010, Vol. 87, No. 6, pp. 1911-1918.

[5] D.H. Popović, J.A. Greatbanks, M. Begović and A. Pregelj, "Placement of Distributed Generators and Recloser for Distribution Network Security and Reliability",International Journal of Electrical Power and Energy Systems, June-July 2005, Vol. 7, No. 5-6, pp. 398-408.

[6] C.T. Borges, D.M. Falcao, "Optimal Distributed Generation Allocation for Reliability, Losses, and Voltage Improvement", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, July 2006, Vol. 28, No. 6, pp. 413–420.

[7] C.T. Borges, D.M Falcao, "Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses and Voltage Profile",IEEE Power Tech Conference Proceedings, June 2003, Vol. 2, pp. 5-12.

[8] Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighizadeh, M. R. Bayat, M. E. Khodayar, "Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile", IEEE, Universities Power Engineering Conference, UPEC, 42nd International, Sept. 2007, Vol. 37, pp. 954-959.

[9] N. Mithulananthan, T.Oo, L.V. Phu, "Distributed Generator Placement Technique in Power Distribution System Using Genetic Algorithm to Reduce Losses", Thammasat Int. J. Sci. Tech., Sept. 2004, Vol. 9, pp. 56–62.

[10] G. Celli, F. Pilo, "Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks", 22nd IEEE PES International Conference on Power Industry Computer Applications PICA 2001, May 2001, pp. 81–86.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[۱۱] محمد فرشاد، محمد حسین جاویدی، جواد ساده، "ارائه قانون تشویقی تولیدات پراکنده در سیستمی با قانون تسویه تمایزی و پیشنهاد الگوریتم جایابی و تعیین ظرفیت بهینه"، نشریه انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال ۹، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۱.

[12] D.Q. Hung, N. Mithulananthan, R.C. Bansal, "Analytical Expressions for DG Allocation in Primary Distribution Networks", IEEE Trans. on Energy Conversion, Sept. 2010, Vol. 25, No. 3, pp. 814-820.

[13] S.J. Huang, "An Immune-Based Optimization Method to Capacitor Placement in a Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, April 2000, Vol. 15, No. 2, pp. 744-749.

[14] C.H. Lin, C.S. Chen, C.J. Wu, M.S. Kang, "Application of Immune Algorithm to Optimal Switching Operation for Distribution-Loss Minimization and Loading Balance", IEE, Generation, Transmission and Distribution, March 2003, Vol. 150, No. 2, pp. 183-189.

[15] L. FábioBertequini, A.F. Rodrigo, R.S. José, "Fault Section Estimation in Electric Power Systems Using an Optimization Immune Algorithm", Electric Power Systems Research, November 2010, Vol. 80, No. 11, pp. 1341-1352.

[16] C.Y. Ho, T.E. Lee, C.H. Lin, "Optimal Placement of Fault Indicators Using the Immune Algorithm", IEEE Trans. on Power System, Feb. 2011, Vol. 26, No. 1, pp. 38-45.

[17] J. Timmis, "Artificial Immune Systems: A Novel Data Analysis Technique Inspired by the Immune System", Ph.D. Thesis, University of Wales, Aberystwyth, 2000.

[18] P. Musilek, A. Lau, M. Reformat, L. Wyard-Scott, *"Immune Programming",* Information Sciences, April 2006, Vol. 176, No.8, pp. 972-1002.

[19] S.A. Taher, M.K. Amooshahi, "Optimal Placement of UPFC in Power Systems Using Immune Algorithm", Simulation Modeling Practice and Theory 2011, Vol. 19, No. 5, pp. 1399-1412.

[20] M.T. Tsai, H.J. Gow, W.M. Lin, "Hybrid Taguchi Immune Algorithm for the Thermal Unit Commitment" ,International Journal of Electrical Power and Energy Systems, May 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 1062-1069.

[21] M. Basu, "Artificial Immune Algorithm System for Fixed Hydrothermal Power System", Energy, Elsevier, Jan. 2011, Vol. 36, No. 1, pp. 606-612.

[22] M. Basu, "Artificial Immune System for Dynamic Economic Dispatch", Journal of Electrical Power and Energy Systems, Jan. 2011, Vol. 33, No. 1, pp. 131-136.

[23] L.F. Ochoa, A. Padilha-Feltrin, G.P. Harrison, "Evaluating Distributed Generation Impacts with a Multi-Objective Index", IEEE Trans. on Power Delivery, July 2006, Vol. 21, No. 3, pp. 1452-1458.

[24] A. Barin, L.F. Pozzatti, L.N. Canha, R.Q. Machado, A. R. Abaide and G. Arend, "Multi-Objective Analysis of Impacts of Distributed Generation Placement on the Operational Characteristics of Networks for Distribution System Planning", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Dec. 2010, Vol. 32, No. 10, pp. 1157-1164.

[25] G.W. Chang, S.Y. Chu, H.L. Wang, "An Improved Backward/Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Systems, May 2007, Vol. 22, No. 2, pp. 882-884.

[26] S. Ghosh, D. Das, "Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks", IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, Nov. 1999, Vol. 146, No. 6, pp. 641-648.

[27] N. Rugthaicharoencheep, S. Sirisumaranunukul, "Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution System with Distributed Generators by Tabu Search", GMSARN International Journal 3, 2009, pp. 47-54.

زیرنویس‌ها

1 Distributed Generation
2 Static Series Voltage Regulator
3 Particle Swarm Optimization
4 Immune Algorithm
5 Voltage Source Inverter
6 Source Bridge
7 Initialization
8 Evaluation
9 Replication
10 Iteration – Repertoire

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]