

دریافت مقاله: 92/2/29

پذیرش مقاله: 93/1/30

## جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM در شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم ایمنی

سید عباس طاهر<sup>1\*</sup>، سید احمدرضا افسری کاشانی<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> دانشیار گروه مهندسی برق- قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

sataher@kashanu.ac.ir

<sup>2</sup> دانشجوی دکتری مهندسی برق- قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

ahmadafsari@iust.ac.ir

---

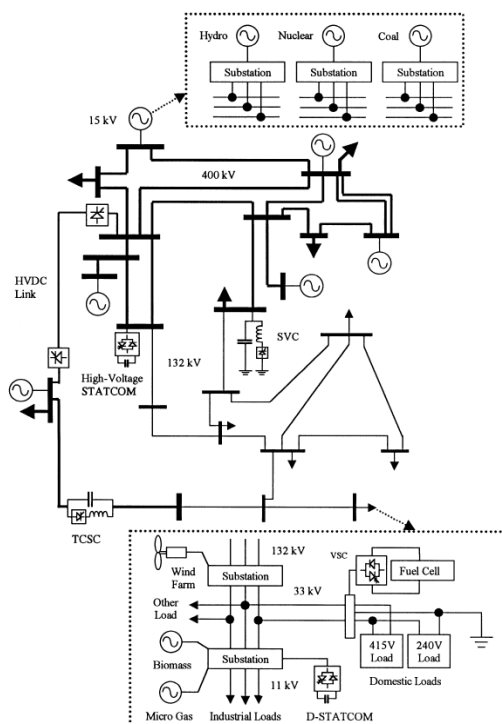
**چکیده:** با رشد و توسعه شبکه‌های قدرت، بهره‌برداری بهینه از این شبکه‌ها اهمیت فراوانی دارد. به دلیل هزینه زیاد احداث و توسعه این شبکه‌ها، استفاده از ادواتی جهت افزایش راندمان و کاهش مشکلات موجود (نظیر کاهش تلفات انرژی، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش جریان عبوری از فیدرها)، امری اجتناب‌ناپذیر است. برای مرتفع کردن این مشکلات می‌توان از عنصر جبران‌ساز موازی شبکه توزیع به نام DSTATCOM استفاده کرد و تا حد امکان، این مشکلات را کاهش داد. در این مطالعه، به جایابی و تعیین ظرفیت بهینه این المان، جهت کاهش حداکثری مشکلات موجود، با وجود و بدون وجود منابع تولید پراکنده پرداخته شده است. به همین منظور، از الگوریتم ایمنی (Immune Algorithm) که الهام‌گرفته از سیستم ایمنی و دفاعی جانداران است، استفاده شده است. شبیه‌سازی بر روی شبکه تست IEEE 33 با سه انجام گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM می‌توان به خوبی به مشکلات مذکور فائق آمد تا محدودیت‌های شبکه تأمین گردد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ایمنی، پخش بار جاروب پیش‌رو/ پس‌رو، شبکه توزیع، منبع تولید پراکنده (DG)، DSTATCOM.

## 1. مقدمه

کیفیت پخش توان تأثیرگذار هستند. در عین حال تنظیم ولتاژ، متعادل کردن ولتاژ و حذف یا کاهش هارمونیک نیز می‌تواند از آثار آن باشد [10 و 11]. سیر تکاملی جبران‌سازهای موازی در شبکه توزیع، به‌منظور بهبود کیفیت توان (ضریب توان، پروفیل ولتاژ، پایداری ولتاژ)، به جبران‌ساز ایستای توزیع (DSTATCOM) رسیده است. قابلیت تزریق و جذب توان راکتیو به همراه پاسخ دینامیکی بسیار سریع، کاربرد آن‌ها را بسیار وسیع کرده است.

DSTATCOM اساساً شامل یک اینورتر منبع ولتاژ (با استفاده از کلیدهای GTO یا IGBT) همراه با یک خازن DC است که یک ولتاژ سه فاز سنکرون در فرکانس پایه تولید می‌کند. DSTATCOM به‌صورت موازی توسط یک ترانسفورماتور کاهنده به سیستم قدرت متصل می‌شود و قادر است با تولید یا جذب توان راکتیو، ولتاژ باسی را که به آن متصل است، تنظیم کند. در شکل (1)، مکان نصب DSTATCOM در شبکه و ساختار آن نشان داده شده است [12].

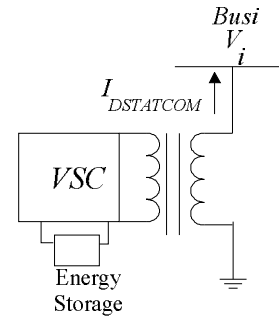


1- الف) موقعیت نصب STATCOM و DSTATCOM به

ترتیب در شبکه قدرت و توزیع

افزایش بارگذاری و نیاز به بهره‌برداری اقتصادی از شبکه‌های انتقال و توزیع، شرکت‌های مرتبط را بر آن داشته تا از شبکه‌های فوق در حداکثر راندمان و بارگذاری ممکن استفاده کنند [1]. از جمله مشکلات موجود در شبکه‌های فوق می‌توان به از بین رفتن پایداری، تلفات انتقال زیاد، عبور از محدوده مجاز ولتاژها و عدم توانایی در استفاده کامل از ظرفیت خطوط اشاره کرد. این مشکلات معمولاً بر اثر افزایش بی‌رویه بار یا تغییرات بارهای غیرخطی و ... روی می‌دهند [2]. از علل وقوع افت ولتاژ در شبکه‌های توزیع، وجود بارهای سه فاز در حال رشد، بارهای تک‌فاز با توزیع نامتوازن و نیز وجود خطوط توزیع با امپدانس بالا را می‌توان نام برد. این موضوع در شبکه‌های پیشرفته‌تر توزیع به دلیل وجود منابع تولید پراکنده و تغییر مسیر عبور جریان در خطوط، شکل پیچیده‌تری به خود می‌گیرد [3 و 4]. امروزه بر سر این مسئله که تکنیک‌ها و تجهیزات الکترونیک صنعتی، مناسب‌تر از روش‌های سنتی و قدیمی هستند که براساس تکنولوژی‌های الکترومکانیکی بوده و سرعت پایین و هزینه زیادی دارند، اتفاق نظر عمومی وجود دارد [5 و 6]. توسعه شبکه‌های فوق نیاز به تأمین توان راکتیو توسط منابع توان راکتیو و استفاده روزافزون از جبران‌سازهای FACTS را (که جایابی آن‌ها از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است) اجتناب‌ناپذیر می‌کند [7-9]. به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های الکترونیک قدرت جهت فعالیت در سیستم توزیع، به‌منظور فراهم‌آوردن انرژی با کیفیت مناسب جهت مشترکین خواهد بود. به‌طور کلی، راه حل اصولی سودمند و مورد توجه برای مقابله با مشکلات وقفه و کیفیت پایین توان در بخش سطح مشترک، به‌عنوان Custom Power (CP) شناخته می‌شود که شبیه تکنولوژی ادوات FACTS است. هر چند FACTS و CP پایه و مبنای تکنیکی مشترکی دارند، اهداف عملکردی متفاوتی را دنبال می‌کنند. ادوات FACTS در سطح انتقال استفاده می‌شوند؛ درحالی‌که ادوات CP در سطح توزیع به‌کار گرفته می‌شوند. ادوات CP به‌طور ویژه بر روی قابلیت اطمینان و

پس رو استفاده شده است. جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM در شبکه نمونه 33 با سه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن ارائه شده است. حضور منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع نیز با توجه به روند رو به رشد حضور این منابع در شبکه توزیع، به عنوان منابع کوچک تولید توان اکتیو در شبکه مورد جایابی قرار گرفته و در روند جایابی DSTATCOM به عنوان منبع ثابت تولید توان اکتیو لحاظ شده است.



1-ب) DSTATCOM همراه با منبع انرژی

شکل (1): الف و ب) نمای کلی اجزای شبکه قدرت و موقعیت نصب و ساختار DSTATCOM

## 2. مدل سازی DSTATCOM و حل معادلات حاکم

### بر سیستم

عملکرد DSTATCOM مانند یک جبران ساز گردان (کندانسور سنکرون) است و با ماهیت الکترونیک قدرت آن، کنترل سریع نوسانات به راحتی انجام می شود. هنگام عملکرد DSTATCOM پارامترهای خط به طور دائم نظارت شده و با مقدار سیگنال مطلوب مقایسه و سپس مقدار جریان و ولتاژ لازم برای حذف اغتشاش ایجاد شده توسط بار، تولید می شود؛ بنابراین، این دستگاه اجازه ورود اغتشاشات ایجاد شده توسط بار را به سیستم نمی دهد [10].

در یک سیستم توزیع ساده شعاعی که از یک نقطه تغذیه می شود، شاخه های سیستم دارای رنج وسیعی از مقادیر  $R$  و  $X$  هستند. همچنین نسبت  $R/X$  شاخه ها در یک سیستم توزیع، در مقایسه با سیستم انتقال، دارای مقدار نسبتاً زیادی است [11 و 16]. به همین دلیل است که روش های پخش بار متداول مانند نیوتون رافسون (NR) و پخش بار دکوپله تسریع یافته (FDLF) و بهینه شده آنها برای حل مسائل پخش بار چنین سیستم هایی مناسب نیست. در اغلب موارد، روش های NR و FDLF در حل مسائل پخش بار سیستم، توزیع یا همگرا نمی شوند و یا در تکرارهای بالا همگرا می شوند؛ بنابراین، از این روش ها اغلب در سیستم توزیع با ساختار شعاعی استفاده نمی شود [17]. به منظور اعمال DSTATCOM به معادلات پخش بار، از مدل حالت ماندگار

در [13] مدل های مختلفی از DSTATCOM برای بررسی کیفیت توان در شبکه توزیع ارائه و مدل سازی شده است. در [14] کنترل کننده غیرخطی DSTATCOM در شبکه توزیع به همراه منابع تولید پراکنده با هدف تنظیم ولتاژ خط، با استفاده از تزریق توان راکتیو به شبکه معرفی شده است. در [15] برای افزایش کیفیت توان به بررسی جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM در شبکه توزیع یازده با سه پرداخته شده و اثر حضور منابع تولید پراکنده در این مطالعه، نشان داده شده است.

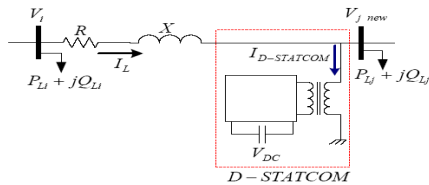
در سطح توزیع، DSTATCOM می تواند برای تثبیت دامنه ولتاژ، بهبود ضریب توان و حذف هارمونیک مورد استفاده قرار گیرد. DSTATCOM ساختمان و اصول عملکردی نظیر STATCOM دارد. پخش توان اکتیو با زاویه فاز مابین شبکه و ولتاژ مبدل، کنترل می شود و پخش توان راکتیو به وسیله اختلاف دامنه های ولتاژ انجام می شود. خازن از طریق شبکه شارژ شده و در حالت پایدار، ولتاژ شبکه همیشه پیش فاز از ولتاژ مبدل با زاویه کوچک، جهت تدارک توان تلفاتی مبدل است.

در این مطالعه، به جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM در شبکه توزیع پرداخته شده است؛ به گونه ای که در ابتدا به مدل سازی DSTATCOM و بیان روابط مربوط به آن پرداخته شده و سپس برای حل معادلات شبکه، از نوعی پخش بار به نام پخش بار جاروب پیش رو/

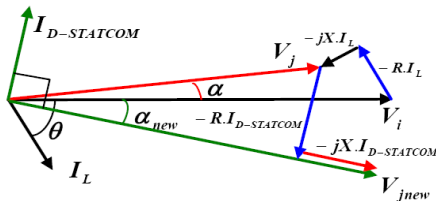
مناسب برای آن با قابلیت استفاده در محاسبات پخش بار جاروب پیش‌رو/ پس‌رو (F.B.S.) استفاده می‌شود.

### 1.2 مدل‌سازی DSTATCOM در حالت ماندگار

دیاگرام تک‌خطی دو باس متوالی سیستم و دیاگرام فازوری آن در شکل‌های (2) و (3) نشان داده شده است. به‌طور کلی، ولتاژ باس‌های سیستم از  $1^{pu}$  کمتر است و هدف جبران‌سازی ولتاژ باس مورد نظر  $1^{pu}$  تا  $(V_{0j})$  به وسیله DSTATCOM است [17].



شکل (4): دیاگرام تک‌خطی دو باس مجاور شبکه قدرت در حضور DSTATCOM



شکل (5): دیاگرام فازوری ولتاژها و جریان‌های شبکه شکل (4)

ولتاژ باس  $j$  هنگام استفاده از DSTATCOM از  $V_j$  به  $V_{jnew}$  تغییر پیدا می‌کند. به‌منظور سادگی، زاویه ولتاژ  $V_i$  یعنی  $\delta$  در دیاگرام فازوری صفر فرض می‌شود. با توجه به شکل‌های قبلی می‌توان نتیجه گرفت:

$$\angle I_{D-Statcom} = \frac{\pi}{2} + \alpha_{new} \quad \alpha_{new} < 0 \quad (2)$$

$$V_{jnew} \angle \alpha_{new} = V_i \angle \delta - (R + jX) \cdot I_L \angle \theta - (R + jX) \cdot I_{D-Statcom} \angle (\alpha_{new} + \pi/2) \quad (3)$$

که در آن:

$$I_{D-Statcom} = \angle(\pi/2 + \alpha_{new})$$

DSTATCOM

ولتاژ باس  $j$  پس از جایگذاری DSTATCOM،  $V_{jnew} \angle \alpha_{new}$

ولتاژ باس  $i$  بعد از جایگذاری DSTATCOM و  $V_i \angle \delta$

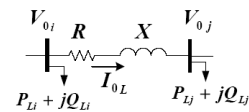
جریان موجود در خط پس از جایگذاری  $I_L \angle \theta$

DSTATCOM

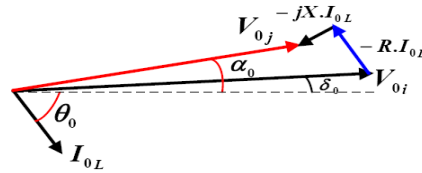
ولتاژ  $V_i \angle \delta$  و جریان  $I_L \angle \theta$  از محاسبات پخش بار

به‌دست می‌آیند. با تفکیک بخش‌های حقیقی و موهومی معادله

قبلی می‌توان نتیجه گرفت:



شکل (2): دیاگرام تک‌خطی دو باس متوالی از شبکه توزیع



شکل (3): دیاگرام فازوری ولتاژها و جریان‌های شکل (2)

رابطه بین ولتاژ و جریان را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$V_{0j} \angle \alpha_0 = V_{0i} \angle \delta_0 - (R + jX) \cdot I_{0L} \angle \theta_0 \quad (1)$$

که در آن:

$V_{0j} \angle \alpha_0$ : ولتاژ باس  $j$  قبل از جبران‌سازی،

$V_{0i} \angle \delta_0$ : ولتاژ باس  $i$  قبل از جبران‌سازی،

$Z = R + jX$ : امپدانس بین باس‌های  $i$  و  $j$  و

$I_{0L} \angle \theta_0$ : جریان موجود در خط قبل از جبران‌سازی است.

ولتاژهای  $V_{0i} \angle \delta_0$  و  $V_{0j} \angle \alpha_0$  و جریان  $I_{0L} \angle \theta_0$  از معادلات

پخش بار به‌دست می‌آیند. همان‌طور که بیان شد، DSTATCOM به‌منظور تنظیم ولتاژ در شرایط حالت

ماندگار، مورد استفاده قرار می‌گیرد و تنها می‌تواند توان راکتیو

به سیستم تزریق کند؛ بنابراین،  $I_{D-Statcom}$  بایستی به‌صورت

متعامد با ولتاژ سیستم ( $V_{jnew}$ ) نگه داشته شود. با جایگذاری

DSTATCOM در سیستم توزیع، ولتاژ همه گره‌ها به‌ویژه

گره‌های مجاور موقعیت DSTATCOM و جریان شاخه‌های

پس از تعیین کردن  $x$ ،  $x_2 = \alpha_{new}$  (زاویه ولتاژ اصلاح شده) به صورت زیر تعریف می شود:

$$x_2 = \sin^{-1} x \quad (16)$$

به وسیله یکی از معادلات (11) یا (12)، مقدار  $x_1 = I_{D-Statcom}$  نیز به دست می آید.

با توجه به معادله (15) دیده می شود که دو ریشه برای  $x$  وجود دارد؛ بنابراین، دو مقدار برای  $x_1$  و  $x_2$  به دست می آید؛ اما یکی از آن ها پذیرفتنی است. برای تعیین و تشخیص پاسخ صحیح، جواب ها تحت شرایط حدی در معادلات پخش بار امتحان می شوند:

اگر  $b = V_{jnew} = v_{oj}$  سپس  $x_2 = \alpha_{new} = \alpha$  و  $x_1 = I_{D-Statcom} = 0$ . پس از تست این شرایط روی نتایج پخش بار،  $x = \frac{-B + \sqrt{\Delta}}{2A}$  به عنوان جواب صحیح معادله درجه دوم انتخاب و سپس  $x_1$  و  $x_2$  به ترتیب از معادلات بیان شده به دست می آیند و در نهایت، توان راکتیو تزریق شده توسط DSTATCOM را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$jQ_{D-Statcom} = \vec{V}_{jnew} \cdot \vec{I}_{D-Statcom}^* \quad (17)$$

$$\vec{V}_{jnew} = V_{jnew} \angle \alpha_{new} \quad (18)$$

$$\vec{I}_{D-Statcom} = I_{D-Statcom} \angle (\alpha_{new} + \pi / 2) \quad (19)$$

هنگامی که توان راکتیو محاسبه شده توسط رابطه Q به ماکزیمم حد خود برسد، دیگر به هیچ وجه ولتاژ گره J را در 1pu کنترل نخواهد کرد. در این شرایط، DSTATCOM به عنوان یک خازن ثابت در نظر گرفته می شود که توان راکتیوی برابر با ماکزیمم توان خود تولید می کند و به عنوان بار با توان راکتیو ثابت منفی در گره J فرض می شود.

## 2.2. اعمال مدل DSTATCOM در معادلات پخش بار

در این مقاله، از روش پخش بار جاروب پیش رو/پس رو جهت محاسبه ولتاژ باس ها و جریان خطوط استفاده شده است. برای مدل سازی DSTATCOM در محاسبات پخش بار

$$V_{jnew} \cos \alpha_{new} = \text{Real}(V_i \angle \delta) - \text{Real}(Z I_L \angle \theta) - R I_{D-Statcom} \cos(\pi / 2 + \alpha_{new}) + \quad (4)$$

$$X I_{D-Statcom} \sin(\pi / 2 + \alpha_{new})$$

$$V_{jnew} \sin \alpha_{new} = \text{Imag}(V_i \angle \delta) - \text{Imag}(Z I_L \angle \theta) - X I_{D-Statcom} \cos(\pi / 2 + \alpha_{new}) - R I_{D-Statcom} \sin(\pi / 2 + \alpha_{new}) \quad (5)$$

با فرضیات زیر، معادلات مذکور را می توان ساده تر نوشت:

$$a_1 = \text{real}(V_i \angle \delta) - \text{real}(Z I_L \angle \theta) \quad (6)$$

$$a_2 = \text{imag}(V_i \angle \delta) - \text{imag}(Z I_L \angle \theta) \quad (7)$$

$$b = V_{jnew}, C_1 = -R, C_2 = -X, x_1 = I_{DSTATCOM}, x_2 = \alpha_{new} \quad (8)$$

و می توان بیان کرد که:

$$b \cdot \cos x_2 = a_1 - c_1 \cdot x_1 \cdot \sin x_2 - c_2 \cdot x_1 \cdot \cos x_2 \quad (9)$$

$$b \cdot \sin x_2 = a_2 - c_2 \cdot x_1 \cdot \sin x_2 + c_1 \cdot x_1 \cdot \cos x_2 \quad (10)$$

که  $a_1, a_2, c_1$  و  $c_2$  ثابت، و  $b$  دامنه ولتاژ جبران سازی شده (برای مثال  $1^{pu}$ ) و  $x_1$  و  $x_2$  متغیرهایی هستند که باید معین شوند؛ لذا با استفاده از معادلات (9 و 10) داریم:

$$x_1 = \frac{b \cdot \cos x_2 - a_1}{-c_1 \cdot \sin x_2 - c_2 \cos x_2} \quad (11)$$

و از طرف دیگر:

$$x_1 = \frac{b \cdot \sin x_2 - a_2}{-c_2 \cdot \sin x_2 + c_1 \cos x_2} \quad (12)$$

بنابراین می توان بیان کرد که:

$$(a_1 \cdot c_2 - a_2 \cdot c_1) \sin x_2 + (-a_1 \cdot c_1 - a_2 \cdot c_2) \cos x_2 + b \cdot c_1 = 0 \quad (13)$$

با فرض  $x = \sin x_2$  و مربع سازی طرفین معادله می توان

به رابطه (14) رسید:

$$(k_1^2 + k_2^2) \cdot x^2 + (2k_1 \cdot b \cdot c_1) \cdot x + (b^2 \cdot c_1^2 - k_2^2) = 0 \quad (14)$$

که در آن:

$$k_1 = a_1 \cdot c_2 - a_2 \cdot c_1$$

$$k_2 = a_1 \cdot c_1 - a_2 \cdot c_2$$

بنابراین:

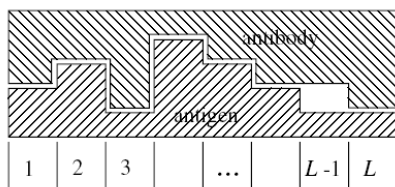
$$x = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A} \quad (15)$$

که در آن:

$$\Delta = B^2 - 4AC, B = 2k_1 b c_1, A = k_1^2 + k_2^2, C = b^2 c_1^2 - k_2^2$$

هنگامی که یک پاتوژن (عنصر خارجی آلوده) وارد بدن می‌شود، شناسایی و بدن برای حذف آن بسیج می‌شود. سیستم قادر است هر آلودگی را به خاطر بیاورد تا در مواجهه بعدی با همان پاتوژن، با قدرت بهتر و بیشتر مقابله کند. در سیستم ایمنی انسانی، به صورت ابتدایی، تعداد کمی سلول B از مغز استخوان به وجود می‌آید. برخی زیرمجموعه‌های آنتی‌ژنی را شناسایی می‌کنند و همه آن‌ها را به وسیله یادگیری، از بین می‌برند. برخی دیگر که مانند سلول‌های حافظه به نظر می‌آیند، در سیستم ذخیره می‌شوند. این پاسخ به دلیل کمی لمفوسیت‌ها کند است؛ در حالی که اگر بدن موجود زنده بار دیگر توسط همان آنتی‌ژن مورد حمله قرار گیرد، سلول‌های حافظه می‌توانند با تشخیص، تبدیل، تولید و جهش خود، به سرعت آن را از بین ببرند. عکس‌العمل مهم، تولید آنتی‌بادی‌ها است که به وسیله سلول‌های B در پاسخ به آنتی‌ژن انجام می‌شود. آنتی‌بادی‌ها توانایی شناخت بیشتر و متحدشدن نسبت به آنتی‌ژن را دارند؛ اگرچه می‌توانند به صورت مستقیم، در غیرفعال کردن پاتوژن‌ها به وسیله علامت‌دار کردن آن‌ها شرکت کنند. این عمل با فعال کردن اعضای دیگر سیستم ایمنی و با خنثی کردن سم‌های وارده به بدن انجام می‌گیرد.

الگوریتم ایمنی مصنوعی AIS به وسیله مدل‌های مشابه آنتی‌ژن و آنتی‌بادی سیستم ایمنی بیولوژیکی بنا شده است [24]. قبلاً بیان شد که روش تشخیص در سیستم ایمنی طبیعی بر اساس شکل مکمل بین آنتی‌ژن و سلول پذیرنده است. مدلی که برای مکانیسم تشخیص مورد نیاز است، یک طرح کلی مناسب است که نیازمند اطلاعات دقیق درباره شکل این عناصر می‌باشد. چنین طرحی مبتنی بر مفهوم شکل (6)، توسط Oster، Pereson ارائه شد که در زیر نشان داده شده است [24].



شکل (6): تناسب آنتی‌ژن و آنتی‌بادی در مدل شکل فضا

در هر تکرار در بخش پیش‌رو، در ابتدا فرض می‌شود که دامنه ولتاژ گره جبران‌سازی شده برابر  $1^{pu}$  (یا مقداری که مورد نیاز است) می‌باشد؛ سپس زاویه فاز ولتاژ جبران‌سازی شده و مقدار توان راکتیو تزریق شده توسط DSTATCOM به ترتیب از معادلات (16) و (17) محاسبه می‌شوند؛ سپس دامنه ولتاژ جدید و زاویه فاز گره جبران‌سازی شده برای تعیین ولتاژ باس‌های پایین دست DSTATCOM در بخش پیش‌رو معادلات پخش بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر توان راکتیو محاسبه شده برای DSTATCOM توسط رابطه (17)، بزرگ‌تر از ماکزیمم نرخ توان راکتیو DSTATCOM باشد، توان راکتیو تزریقی توسط DSTATCOM بر روی ماکزیمم نرخ خود محدود و به عنوان یک مقدار ثابت منفی در مدل بار فرض می‌شود و برنامه پخش بار به صورت عادی، با فرض عدم وجود DSTATCOM ادامه می‌یابد.

ولتاژ جدید گره‌ها و توان راکتیو تزریق شده توسط DSTATCOM برای تعیین جریان بارها در بخش پس‌رو پخش بار مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روند تا همگراشدن پخش بار ادامه و تکرار می‌یابد [17 و 18].

### 3. الگوریتم ایمنی

الگوریتم ایمنی مصنوعی به عنوان یک روش جست‌وجو و بهینه‌سازی کارآمد، در بین روش‌های دیگری مانند الگوریتم ژنتیک و هوش جمعی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. الگوریتم ایمنی مصنوعی روشی برگرفته از نحوه عملکرد سیستم ایمنی بدن در مواجهه با عوامل بیماری‌زای خارجی است [19-23].

همه عناصر قابل تشخیص توسط سیستم ایمنی، آنتی‌ژن (Antigen) نامیده می‌شوند. سلول‌های بومی که به صورت ذاتی متعلق به ارگانیسم میزبان هستند، خودی (Self) نامیده می‌شوند؛ در حالی که عناصر عامل بیماری، غیرخودی (Nonself) نامیده می‌شوند؛ بنابراین، سیستم ایمنی باید قادر باشد تا بین خودی و غیرخودی تفاوت قائل گردد. این روند تمیز خودی / غیرخودی نامیده می‌شود [19 و 21].

آنتی‌بادی،  $Ab_i$  از مجموعه (نسل) حاضر انتخاب می‌شود. احتمال انتخاب آنتی‌بادی به صورت مستقیم، با درجه شباهت آن به آنتی‌ژن متناسب است. با احتمال  $P_c$  این آنتی‌بادی کلون می‌شود و در نسل جدید جایگذاری می‌گردد. پارامتر  $P_c$  احتمال کلون‌شدن نامیده می‌شود.

- ابرجهش: اگر آنتی‌بادی با درجه شباهت بالا در مرحله قبل انتخاب شود و کلون نشود، به قسمت ابرجهش می‌رود و هر ژن، رشته مربوط به این آنتی‌بادی با احتمال جهش  $P_m$  (که نسبت عکس با درجه شباهت آنتی‌بادی و آنتی‌ژن دارد)، مورد جهش قرار می‌گیرند.

- تکرار مجموعه: مراحل سوم تا پنجم تا تشکیل یک نسل جدید با اندازه  $n$  تکرار می‌شوند.

- تکرار الگوریتم: شماره‌دهنده نسل اضافه می‌شود،  $G=G+1$  و نسل جدید به مرحله دوم فرستاده می‌شود. این روند تا رسیدن به شرایط توقف، ادامه و تکرار پیدا می‌کند.

برای ایجاد مجموعه اولیه آنتی‌بادی‌ها، از کتابخانه ژن استفاده می‌شود. این مقادیر ژن‌ها در بازه‌ای هستند که برای جواب مسئله در نظر گرفته شده‌اند [20]؛ سپس یک آنتی‌ژن،  $Ag$  به عنوان مسئله‌ای که بایستی حل گردد، مشخص می‌شود و بسته به نوع مسئله می‌تواند اشکال مختلفی را داشته باشد.

برای تعیین درجه شباهت آنتی‌بادی به آنتی‌ژن، بایستی مقادیر آنتی‌بادی‌ها (المان‌های نسل موجود) در مسئله قرار داده شده و درجه شباهت را به وسیله محاسبه معکوس تابع هزینه (فاصله) تعیین کرد. پارامترهای تأثیرگذار بر همگرایی الگوریتم شامل موارد زیر است:

- اندازه جمعیت ( $N$ ): که با افزایش تعداد آنتی‌بادی‌ها، الگوریتم سریع‌تر به پاسخ می‌رسد و بسته به نوع مسئله می‌تواند مقداری بین 10 تا 1000 انتخاب شود (افزایش بیشتر در جمعیت در کیفیت پاسخ تأثیر چندانی نخواهد داشت).

- احتمال جایگذاری ( $P_r$ ): که معمولاً مقداری بین 0/01 تا 0/8 انتخاب می‌شود.

- احتمال کلون‌شدن ( $P_c$ ): برای احتمال کلون‌شدن بازه

مفهوم شکل فضا، امکان توصیف آنتی‌ژن و سلول پذیرنده و بیان میزان تناسب بین آن‌ها را نشان می‌دهد. شکل کلی یک المان، چه آنتی‌ژن و چه آنتی‌بادی می‌تواند به صورت یک رشته (مانند  $m$ ) نمایش داده شود. ویژگی رشته شامل مقادیر هماهنگی شخصی شکل در مدل شکل - فضا با نام  $S$  (برای مثال  $m \in S = \langle m_1, \dots, m_l \rangle$ ) است که به‌طور کلی، روی مجموعه اعداد حقیقی  $S \subset R$  تعریف می‌شود (یا در حالت‌هایی رشته‌هایی در مجموعه اعداد صحیح  $m \in Z$  یا باینری  $\{0,1\}$ ).

فاصله بین آنتی‌ژن و آنتی‌بادی ( $Ag, Ab$ ) می‌تواند توسط رابطه اندازه فاصله Minkowski به صورت زیر تعریف شود:

$$D_M(Ag, Ab) = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^L |Ag_i - Ab_i|^p} \quad (20)$$

که  $Ag_i$  و  $Ab_i$  مقادیر ژن‌های موجود در آنتی‌بادی و آنتی‌ژن هستند. با تغییر مقدار متغیر  $p$  حالت‌های ویژه‌ای همچون فاصله همانی ( $p=1$ ) و فاصله اقلیدسی ( $p=2$ ) را می‌توان به دست آورد. انتخاب نوع فاصله اندازه‌گیری مناسب، بستگی به مسئله مورد نظر دارد.

الگوریتم مورد استفاده، الگوریتم کلون‌کردن همراه با ابرجهش، شامل مراحل زیر است:

- مقداردهی اولیه: یک مجموعه (جمعیت) اولیه  $AB$  از  $n$  آنتی‌بادی،  $Ab_i, i=1, \dots, n$  تولید می‌شود. شماره‌دهنده نسل در  $G=1$  تنظیم می‌شود.

- ارزیابی: یک آنتی‌ژن،  $Ag$ ، که نمایش‌دهنده مسئله‌ای است که قرار است حل شود، ارائه می‌گردد. این آنتی‌ژن با تمامی آنتی‌بادی‌ها مقایسه ( $Ab_i \in AB$ ) و درجه شباهت آن‌ها ( $f_i$ ) نسبت به آنتی‌ژن تعیین می‌گردد.

- جایگذاری: با احتمال معین،  $P_r$ ، یک آنتی‌بادی جدید تولید و در مجموعه جدید (نسل بعدی) قرار داده می‌شود. با این کار، آنتی‌بادی‌های با درجه شباهت پایین به‌سادگی جایگزین می‌شوند (پارامتر  $P_r$  احتمال جایگزینی است).

- کلون‌کردن: اگر آنتی‌بادی جدیدی تولید نشود، یک



روش پخش بار مورد استفاده روش پیش‌رو/پس‌رو است. الگوریتم تکاملی ایمنی جهت تحلیل داده‌ها و یافتن بهترین پاسخ با کمترین مقدار شاخص عملکرد (P.I) مورد استفاده قرار گرفته و هم‌زمان برای بررسی و مقایسه نتایج و توانمندی الگوریتم معرفی شده، از الگوریتم ژنتیک (GA) نیز استفاده شده است. شایان ذکر است هر دو الگوریتم در شرایط یکسان (از نظر اندازه جمعیت و تعداد تکرار) و با بهترین تنظیمات داخلی ممکن با یکدیگر مقایسه می‌شوند. تعداد تکرار معادل 30 و تعداد جمعیت اولیه برابر با 40 در نظر گرفته شده است هر سلول با 8 بیت نمایش داده شده و خطای قابل قبول معادل  $10^{-5}$  در نظر گرفته شده است. تنظیم پارامترها نیز به شرح زیر است:

- الگوریتم ژنتیک: نرخ جهش: 30%، نرخ انتخاب: 50%.
- الگوریتم ایمنی: احتمال جایگزینی  $(P_r)$ : 0/3، احتمال کلون  $(P_c)$ : 0/9، احتمال جهش  $(P_m)$ : 0/1.

به منظور عینیت بخشی بیشتر و با توجه به در نظر گرفتن توزیع توان راکتیو توسط DSTATCOM به شبکه، حضور منابع تولید پراکنده (DG) نیز در شبکه مورد نظر اعمال شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است. جایابی در دو بخش بدون حضور DG و با حضور DG انجام شده است. ذکر شدنی است که برنامه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده است.

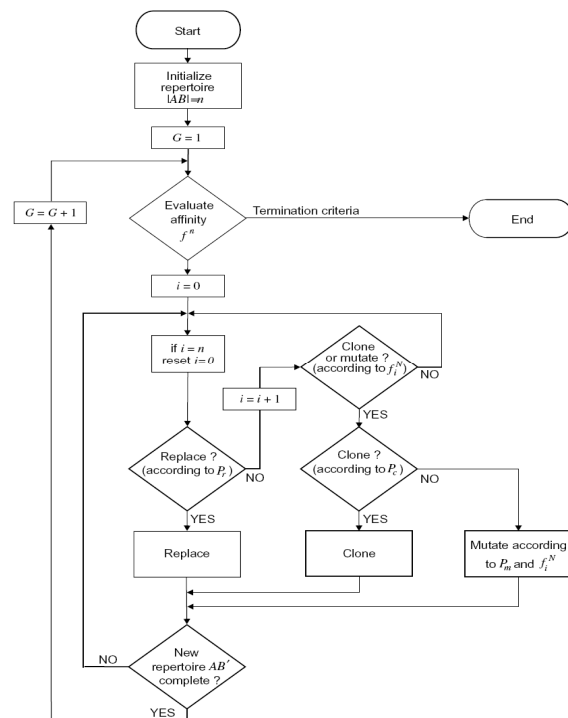
#### 4.1 معرفی شاخص عملکرد (P.I)

به منظور بیان شاخص عملکرد پیشنهادی موارد زیر (که نیاز به کنترل و حداقل سازی آنها وجود دارد) مورد توجه قرار گرفته است.

- کاهش تلفات ناشی از عبور جریان در خطوط  $(P_{loss})$  بر حسب کیلووات.
- محدود کردن ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز  $(ROV, RUV)$  به صورت اعمال قیود طبق رابطه (21).

تغییرات بین 0/01 تا 0/99 بسته به نوع مسئله انتخاب می‌شود.

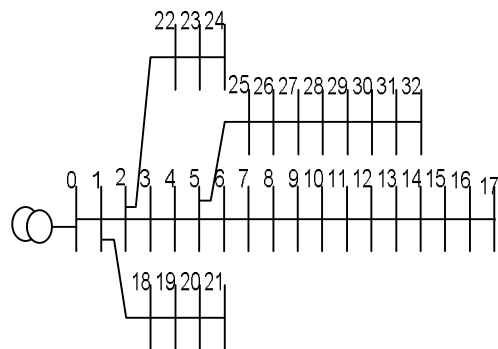
- احتمال ابرجهش  $(P_m)$ : معمولاً حدود 0/1 انتخاب می‌شود تا از تغییرات زیاد پاسخ جلوگیری گردد. در شکل (7) فلوجارت الگوریتم ایمنی که در بالا توضیح آن آورده شده، نمایش داده شده است.



شکل (7): فلوجارت الگوریتم برنامه ایمنی

#### 4. جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM در شبکه توزیع

شبکه توزیع مورد مطالعه شامل شبکه تست نمونه IEEE 33، باسه است [25 و 26] که در شکل (8) نشان داده شده است.



شکل (8): دیاگرام تک خطی سیستم 33 باسه توزیع



$$P.I. = \alpha.T.P_{loss} + \lambda.Cost_{DSTATCOM} \quad (25)$$

$$S.T.: ROV = RUV = ROC = 0$$

$$\alpha = 0.06 \$/kWhr \quad T = 8760 \text{ hr} \quad \lambda = 10^{-3}$$

همچنین برای محدود کردن بازه تغییرات DSTATCOM و نزدیکی بیشتر به واقعیت عملی، ماکزیمم سائز DSTATCOM در محاسبات، تا 10000 kVA در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که محاسبات در مبنای 600kVA و ولتاژ در مبنای 12/66 کیلوولت انجام شده است.

### 5. نتایج شبیه سازی

جایابی با استفاده از دو الگوریتم ایمنی و ژنتیک تحت شرایط بارگذاری چهارگانه A (سبک)، B (متوسط)، C (سنگین) و D (بارگذاری ویژه) صورت پذیرفته (جدول 1) و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شایان ذکر است که در بارگذاری ویژه، تعداد محدودی از باس‌های دارای کمترین سطح ولتاژ جهت بررسی بدترین شرایط مورد بارگذاری قرار گرفته‌اند.

جدول (1): سطوح بارگذاری مختلف در شبکه تحت مطالعه

	سطح بارگذاری	P (kW)	Q (kVAr)
بدون DG	A	4829.5	2300
	B	5201	2300
	C	5572.5	2300
	D	4135	2300

### 1.5. نتایج جایابی DSTATCOM بدون حضور DG

در ابتدا فرض می‌شود هیچ‌گونه منبع تولید پراکنده‌ای در شبکه وجود نداشته باشد. تلفات در حالت پایه در جدول (2)، برای مقایسه نشان داده شده است.

جدول (2): تلفات شبکه تحت سطوح بارگذاری مختلف بدون DG

Loss (pu)	Load Level
0.6652	A
0.7560	B
0.8551	C
0.5939	D

جدول (3) نتایج حاصل از جایابی و تعیین ظرفیت بهینه

انجام گرفته را نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده برتری جایابی در

$$ROV = \sum_{i=1}^n (V_i - 1.1) \quad (\text{if } V_i > 1.1)$$

$$RUV = \sum_{i=1}^n (0.9 - V_i) \quad (\text{if } V_i < 0.9)$$

$$ROV, RUV = 0 \quad (\text{if } 0.9 \leq V_i \leq 1.1)$$
(21)

• محدود کردن جریان عبوری از شاخه‌ها (ROC) در قالب قید به صورت رابطه (22)

$$ROC = \sum_{i=1}^n (I_i - 500) \quad (\text{if } I_i > 500)$$

$$ROC = 0 \quad (\text{if } I_i \leq 500)$$
(22)

• توجیه‌پذیری اقتصادی (Cost<sub>D-STATCOM</sub>)

هزینه سرمایه‌گذاری این ادوات با مشخص بودن ظرفیت آن‌ها با فرض هزینه پایه 50 دلار در هر کیلوولت آمپر راکتیو [27] تعیین می‌شود. مقدار هزینه این ادوات در یک سال با استفاده از رابطه (23) تعیین شده و در شاخص عملکرد لحاظ می‌شود [30\_28]:

$$Cost_{DFACTS\_year} = Cost_{DFACTS} \frac{(1+B)^{n_{DFACTS}} \cdot B}{(1+B)^{n_{DFACTS}} - 1} \quad (23)$$

در این رابطه،  $Cost_{DFACTS\_year}$  هزینه سالیانه تجهیز و  $Cost_{DFACTS}$  هزینه سرمایه‌گذاری این ادوات در سال مکان‌یابی است. همچنین  $n_{DFACTS}$ ، طول عمر آن و  $B$ ، نرخ بازگشت سرمایه است. ادوات D-FACTS دارای طول عمر نسبتاً زیادی هستند [32\_31]. در این مطالعه، طول عمر این ادوات برابر با 15 سال و نرخ بازگشت سرمایه، 10% در نظر گرفته شده است.

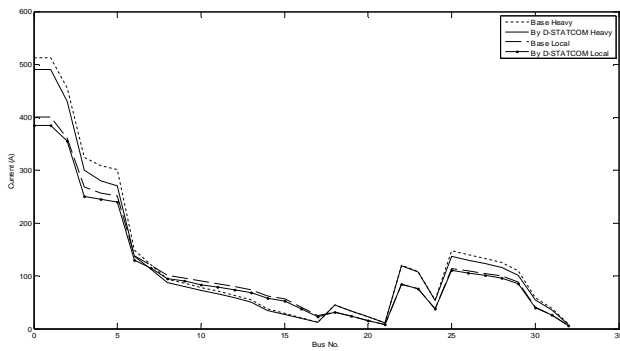
با استفاده از نرخ بهره و به‌کمک رابطه (24)، تمام هزینه‌ها در یک سال معلوم محاسبه و سپس در تابع هدف اعمال می‌شود [29\_28].

$$Cost_{n_2} = Cost_{n_1} (1+B)^{(n_2-n_1)} \quad (24)$$

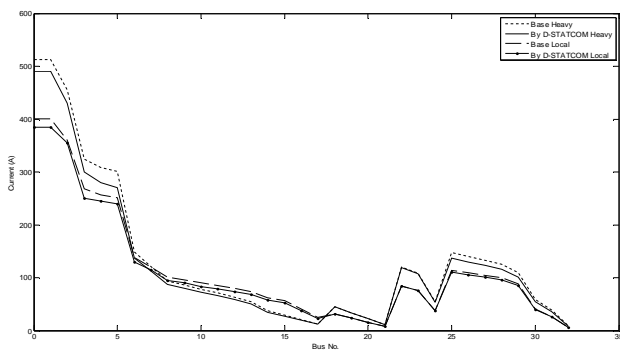
که در آن،  $Cost_{n_1}$  و  $Cost_{n_2}$  به ترتیب، مقدار هزینه‌ها در سال  $n_1$  و  $n_2$ ، و نیز  $B$  مقدار نرخ بهره است (در این مقاله،  $n_1$  در سال 2005 و  $n_2$  در سال 2013 اعمال شده است) [33].

در نهایت، شاخص عملکرد به صورت زیر تعریف و

پیشنهاد می‌شود.



شکل (9): پروفیل ولتاژ قبل و بعد از جایگذاری DSTATCOM در بارگذاری سنگین و ویژه بدون حضور DG (--- بدون جریان‌ساز در سطح بار C، — با جریان‌ساز در سطح بار C، — بدون جریان‌ساز در سطح بار D و --- با جریان‌ساز در سطح بار D)



شکل (10): پروفیل جریان قبل و بعد از جایگذاری DSTATCOM در بارگذاری سنگین و ویژه بدون حضور DG (--- بدون جریان‌ساز در سطح بار C، — با جریان‌ساز در سطح بار C، — بدون جریان‌ساز در سطح بار D و --- با جریان‌ساز در سطح بار D)

همان‌طور که از شکل‌های (9) و (10) مشخص است، با جایگذاری DSTATCOM در شبکه، پروفیل ولتاژ هموارتر شده و محدودیت در نظر گرفته شده برای بازه تغییرات ولتاژ باس‌ها تأمین گردیده است. پروفیل جریان نیز دچار کاهش یافته و جریان کشیده شده از ابتدای فیدر در بازه مورد نظر قرار گرفته است. نتیجه این امر کاهش تلفات نسبت به حالت پایه است. منحنی همگرایی دو روش ارائه شده در سطح بارگذاری C در شکل (11) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، الگوریتم IA سرعت همگرایی مناسب‌تر و نیز نقطه بهینه‌تری را در مقایسه با روش GA ارائه می‌دهد.

روش الگوریتم ایمنی نسبت به الگوریتم ژنتیک و در نتیجه کمتری بودن شاخص عملکرد در این الگوریتم است. با افزایش بارگذاری اندازه DSTATCOM مورد نیاز نیز افزایش می‌یابد. در بارگذاری محلی، بار بر روی باس‌های دارای کمترین دامنه ولتاژ در حالت پایه (باس‌های 16 الی 18) قرار گرفته است تا نمایش دهنده بدترین حالت در بارگذاری محلی باشد. همان‌طور که می‌بینید در این حالت، مکان جبران‌ساز به محل بارگذاری نزدیک‌تر شده است.

جدول (3): جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM

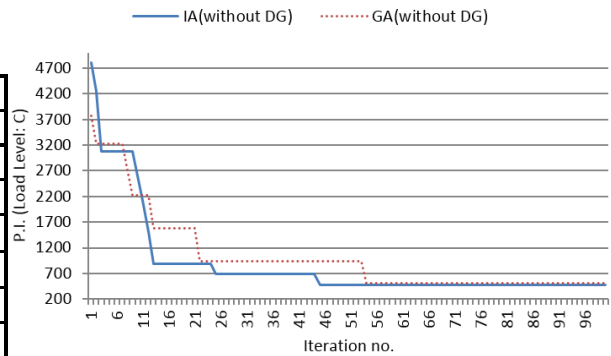
بدون حضور DG

LOAD LEVEL	VARIABLE	Without DSTATCOM	With DSTATCOM	
			GA Method	IA Method
A	Vmin (pu)	0.901	0.953	<b>0.960</b>
	Vmax (pu)	0.999	0.999	<b>1</b>
	Ploss (pu)	0.6652	0.6238	<b>0.5776</b>
	Location	-	26	<b>6</b>
	Size (kVAr)	-	8928.5	<b>7344.087</b>
	P.I.	-	453.6833	<b>407.0742</b>
B	Vmin (pu)	0.891	0.951	<b>0.952</b>
	Vmax (pu)	0.999	0.999	<b>0.999</b>
	Ploss (pu)	0.7560	0.7137	<b>0.6430</b>
	Location	-	26	<b>6</b>
	Size (kVAr)	-	8381.4	<b>7852.9614</b>
	P.I.	-	493.2254	<b>448.6191</b>
C	Vmin (pu)	0.878	0.948	<b>0.951</b>
	Vmax (pu)	0.999	0.999	<b>0.999</b>
	Ploss (pu)	0.8551	0.7332	<b>0.6758</b>
	Location	-	6	<b>6</b>
	Size (kVAr)	-	8374.7033	<b>8374.6607</b>
	P.I.	-	503.3803	<b>473.2102</b>
D	Vmin (pu)	0.880	0.9395	<b>0.941</b>
	Vmax (pu)	0.989	0.992	<b>0.997</b>
	Ploss (pu)	0.5939	0.5197	<b>0.4818</b>
	Location	-	9	<b>10</b>
	Size (kVAr)	-	4178.7	<b>3944.2</b>
	P.I.	-	332.0376	<b>308.8129</b>

در شکل‌های (9) و (10)، پروفیل ولتاژ و جریان خطوط شبکه مورد مطالعه، قبل و بعد از جایابی در بارگذاری سنگین و ویژه نشان داده شده است. شایان ذکر است که شکل‌های مذکور از نتایج حاصل از الگوریتم ایمنی آورده شده است.

جدول (5): جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DSTATCOM با حضور

LOAD LEVEL	VARIABLE	DG		
		Without DSTATCOM	With DSTATCOM	
			GA Method	IA Method
A	Vmin (pu)	0.899	0.948	<b>0.950</b>
	Vmax (pu)	1.092	1.095	<b>1.097</b>
	Ploss (pu)	0.5346	0.4468	<b>0.4437</b>
	Location	-	6	<b>7</b>
	Size (kVAr)	-	2011.5	<b>1381.9764</b>
	P.I.	-	263.1827	<b>252.6825</b>
B	Vmin (pu)	0.889	0.941	<b>0.945</b>
	Vmax (pu)	1.081	1.089	<b>1.091</b>
	Ploss (pu)	0.6638	0.5113	<b>0.5026</b>
	Location	-	6	<b>7</b>
	Size (kVAr)	-	2071.6	<b>1415.8014</b>
	P.I.	-	297.9308	<b>284.1170</b>
C	Vmin (pu)	0.878	0.930	<b>0.932</b>
	Vmax (pu)	1.076	1.077	<b>1.078</b>
	Ploss (pu)	2.9048	2.7603	<b>2.0887</b>
	Location	-	6	<b>8</b>
	Size (kVAr)	-	4284.02	<b>2210.7</b>
	P.I.	-	1511.2	<b>1129</b>
D	Vmin (pu)	0.883	0.948	<b>0.945</b>
	Vmax (pu)	0.995	0.999	<b>0.999</b>
	Ploss (pu)	0.5278	0.5084	<b>0.4836</b>
	Location	-	10	<b>10</b>
	Size (kVAr)	-	2421.01	<b>2359.6</b>
	P.I.	-	301.3302	<b>287.43</b>



شکل (11): منحنی همگرایی روش IA و GA در سطح بارگذاری C و بدون حضور منبع تولید پراکنده

## 2.5. نتایج جایابی DSTATCOM با حضور DG

در این بخش، برای بررسی جامع‌تر، توان تزریقی ناشی از حضور منبع تولید پراکنده مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، به منظور در نظر گرفتن حضور بهینه یک منبع تولید پراکنده، مکان و اندازه این منبع در شبکه با استفاده از الگوریتم‌های معرفی شده مورد محاسبه قرار گرفته و یک منبع تولید پراکنده در باس 13 و با قدرت تزریق توان اکتیو kW 2493/9 به دست آمده است. در جدول (4)، تلفات حالت پایه در شبکه مذکور در حضور منبع تولید پراکنده، برای مقایسه با نتایج جایابی نشان داده شده است.

در شکل (12) و (13)، پروفیل ولتاژ و جریان شبکه تحت

بارگذاری سنگین و محلی با حالت پایه با حضور DG مقایسه شده است. پروفیل ولتاژ و جریان به دلیل وجود منبع تولید پراکنده در شبکه در محدوده جایگذاری دارای پیک هستند. همچنین با جایگذاری جبران‌ساز، فروافتادگی ولتاژ مرتفع شده و پروفیل جریان ابتدای فیدر و شاخه‌های اصلی دچار کاهش گردیده است و در نتیجه تلفات کاهش یافته است. شایان ذکر است حضور منبع تولید پراکنده در شبکه، باعث کاهش اندازه جبران‌ساز DSTATCOM شده و در نتیجه، توجیه‌پذیری اقتصادی جایگذاری را بیشتر می‌کند.

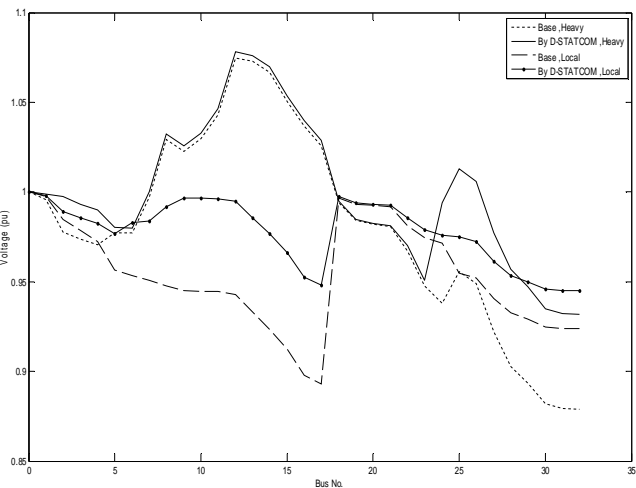
جدول (4): تلفات شبکه تحت سطوح بارگذاری مختلف با حضور DG

Loss (pu)	Load Level
0.5346	A
0.6638	B
2.9048	C
0.5278	D

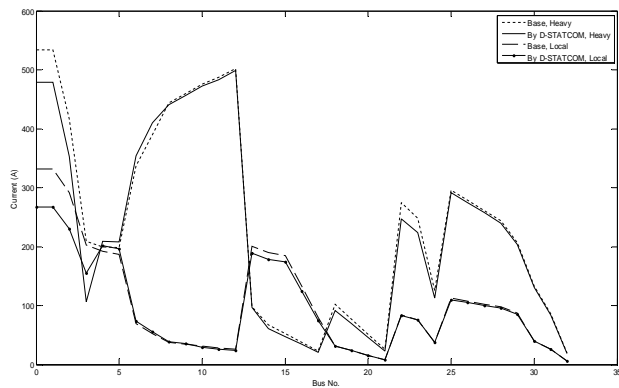
در این حالت نیز نتایج جدول (5) نشان‌دهنده برتری جایابی در روش الگوریتم ایمنی نسبت به الگوریتم ژنتیک و در نتیجه کم‌تر بودن شاخص عملکرد در این الگوریتم است. همچنین با افزایش بارگذاری، میزان توان راکتیو مورد نیاز تولیدی توسط DSTATCOM نیز افزایش می‌یابد.

DSTATCOM با قابلیت تزریق جریان راکتیو، باعث تغییر پروفیل جریان به دلیل تأمین جریان مورد نیاز شبکه در طول فیدرهای شعاعی شده که این موضوع موجب کاهش جریان کشیده شده از ابتدای فیدر می‌شود. در نتیجه این موضوع تلفات کاهش یافته و پروفیل ولتاژ نیز اصلاح می‌شود. موقعیت و اندازه DSTATCOM به شدت در میزان تأثیرگذاری آن بر روی تلفات و نیز پروفیل ولتاژ مؤثر است. حضور منبع تولید پراکنده با قابلیت تزریق توان اکتیو، هرچند تا حدی موجب تقویت پروفیل ولتاژ می‌شود، حضور DSTATCOM این موضوع را بیشتر تقویت می‌کند. ضمناً حضور منابع تولید پراکنده نیز باعث کاهش اندازه DSTATCOM و تا حدودی تغییر موقعیت آن خواهد شد. در همه نتایج به دست آمده پس از جایابی، دامنه ولتاژ تمامی باس‌ها در محدوده تعریف شده قرار گرفته و جریان خطوط نیز از حد تعریف شده خود فراتر نمی‌رود. شایان ذکر است افزایش بی‌رویه اندازه DSTATCOM در شبکه، باعث تزریق جریان راکتیو به باس بی‌نهایت شده و این موضوع موجب افزایش پروفیل جریان در شبکه و در نتیجه باعث افزایش تلفات می‌شود.

الگوریتم ایمنی ارائه شده نیز توانایی خود را در مقایسه با الگوریتم ژنتیک نشان داده و در نتیجه، مقدار شاخص عملکرد بهینه‌تری را ارائه می‌دهد. هرچند از نظر مقایسه زمان اجرای برنامه‌ها، الگوریتم ایمنی زمان بیشتری را می‌طلبد، تقبل این زمان برای رسیدن به پاسخی بهینه و مناسب‌تر و نیز off-line بودن این مطالعه توجیه‌پذیر است.



شکل (12): پروفیل ولتاژ قبل و بعد از جایگذاری DSTATCOM با حضور DG  
(--- بدون جریان‌ساز در سطح بار C، --- با جریان‌ساز در سطح بار C، --- بدون جریان‌ساز در سطح بار D و --- با جریان‌ساز در سطح بار D)



شکل (13): پروفیل جریان قبل و بعد از جایگذاری DSTATCOM با حضور DG  
در سطح بار D و --- با جریان‌ساز در سطح بار D

## 6. نتیجه گیری

با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد که حضور

## مراجع

- [1] M. Hosseini, H.A. Shayanfar, and M. Fotuhi, "Modeling of D-STATCOM in Distribution Systems Load Flow", Journal of Zhejiang University Sci. A, Vol. 8, No. 10, pp. 1532-1542, 2007.

[2] ا. کهنسال، م. جزایری و س. اباذری، «جایابی ادوات FACTS به منظور رفع تراکم خطوط انتقال با استفاده از الگوریتم هوشمند و پیاده‌سازی در شبکه خوزستان».

- بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق PSC،  
2008.
- [3] T.L. Lee, S.H. Hu and Y.H. Chan, "D-STATCOM With Positive-Sequence Admittance and Negative-Sequence Conductance to Mitigate Voltage Fluctuations in High-Level Penetration of Distributed-Generation Systems", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 4, pp. 1417-1428, 2013.
- [4] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef and H. Zayandehroodi, "Optimum D-STATCOM Placement Using Firefly Algorithm for Power Quality Enhancement", Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), pp. 98-102, June 2013.
- [5] D.J. Gohotam and G.T. Heydt., "Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems with FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 60-65, 1998.
- [6] Terzija, V. V., "Adaptive Under Frequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 3, pp. 1260-1266, 2006.
- [7] K. Somsai, and T. Kulworawanichpong, "Modeling, Simulation and Control of D-STATCOM using ATP/EMTP", 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 1-4, 2008.
- [8] P. W. Lehn, "A Benchmark System for Simulation of the D-STATCOM", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 1, pp. 496-498, 2002.
- [9] E. Acha, C.R. Fuertter-Esquivel, H. Ambriz-Perez and C. Angeles-Camacho, *FACTS Modeling and Simulation in Power Network*, John Wiley & Sons, 2004.
- [10] R.J. Nelson et al., "Requirements for Dynamic Voltage Restoration to Relieve Distribution System Voltage Sags", American Power Conference, pp. 1530-1534, April 1995.
- [11] H. Masdi, N. Mariun, S. Mahmud, A. Mohamed and S. Yusuf, "Design of a Prototype D-STATCOM for Voltage Sag Mitigation", Power and Energy Conf., PECon, pp. 61-66, Nov. 2004.
- [12] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, and T.J.E. Miller, *Power Electronic Control in Electrical Systems*, Newnes, 2002.
- [13] P. Kumar, N. Kumar and A.K. Akella, "Modeling and Simulation of Different System Topologies for DSTATCOM", AASRI Procedia, Vol. 5, pp. 249-261, 2013.
- [14] M.A. Mahmud, H.R. Pota and M.J. Hossain, "Nonlinear DSTATCOM Controller Design for Distribution Network with Distributed Generation to Enhance Voltage Stability", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 53, pp. 974-979, 2013.
- [15] M.A. Eldery, E.F. El-Saadany and M.M.A. Salama, "Effect of Distributed Generator on the Allocation D-STATCOM in Distribution Network", Power Engineering Society General Meeting, Vol. 3, pp. 2360-2364, June 2005.
- [16] A. Adya, B. Singh, J.R.P. Gupta and A.P. Mittal, "Application of D-STATCOM for Isolated Systems", TENCON IEEE Conference, Vol. 3, pp. 351-354, Nov. 2004.
- [17] M. Hosseini, H.A. Shayanfar, and M. Fotuhi, "Modeling of Series and Shunt Distribution FACTS Devices in Distribution Systems Load Flow", Journal of Electrical Systems, Vol. 4, No. 4, pp. 1-12, 2008.
- [18] K.K. Sen, "STATCOM-STATIC Synchronous COMPensator: Theory, Modeling, and Applications", IEEE Power Engineering Society, Vol. 2, pp. 1177-1183, 1999.
- [19] P. Musilek, A. Lau, M. Reformat and L. Wyard-Scott, "Immune Programming", Information Sciences, Vol. 176, No. 8, pp. 972-1002, 2006.
- [20] L.N. De Castro and J.I. Timmis, "Artificial Immune Systems as a Novel Soft Computing Paradigm", Journal of Soft Computing, Vol. 7, No. 8, pp. 526-544, 2003.
- [21] S.A. Taher and M.K. Amooshahi, "Optimal Placement of UPFC in Power Systems Using Immune Algorithm", Journal of Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, No. 5, pp. 1399-1412, 2011.
- [22] M. Junjie, W. Yulong and L. Yang, "Size and Location of Distributed Generation in Distribution System Based on Immune Algorithm", Systems Engineering Procedia, Vol. 4, pp. 124-132, 2012.
- [23] A. Diabat, D. Kannan, M. Kaliyan and D. Svetinovic, "An Optimization Model for Product Returns Using Genetic Algorithms and Artificial Immune System", Journal of Resources, Conservation and Recycling, Vol. 74, pp. 156-169, 2013.

- [24] A.S. Perelson and G.F. Oster, "Theoretical Studies of Clonal Selection: Minimal Antibody Repertoire Size and Reliability of Self-non-self Discrimination", Journal of Theoretical Biology Vol. 81, No. 4, pp. 645-670, 1979.
- [25] M.E. Baran and F.F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, 1989.
- [26] Y.C. Huang, H.T. Yang, and C.L. Huang, "Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1868-1873, 1996.
- [27] N. Mithulananthan, A. Sode-yome and N. Acharya, "Application of FACTS Controllers in Thailand Power Systems", FACTS project, Chulangkorn University, Final Report, 2005.
- [28] محمد مهدی اسکونزاد، اقتصاد مهندسی یا ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پاییز 1383.
- [29] E. Lakervi, and E. J. Holmes, "Electricity Distribution Network Design", Institution of Engineering & Technology, May 1996.
- [30] علی خواجه کازرونی، جایابی بهینه خازن‌های ثابت و کلیدزنی در شبکه‌های توزیع، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، زمستان 1380.
- [31] A.T. Johns, and U. H. Song, "Flexible AC Transmissions System (FACTS)", IEE Power and Energy, London, T.J International Ltd, 1999.
- [32] K. Vijayakumar, and R. P. Kumudinidevi, "A New Method for Optimal Location of FACTS Controllers Using Genetic Algorithm", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 1-6, 2007.
- [33] S.A. Taher and S.A. Afsari, "Optimal Location and Sizing of UPQC in Distribution Networks Using Differential Evolution Algorithm", International Journal of Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2012, pp. 1-20, 2012.