



توزیع بهینه توان راکتیو برای اصلاح پایداری ولتاژ با استفاده از بهینه سازی مبتنی بر

تدریس - یادگیری

حامد کریمی¹

¹ عضو هیئت علمی موسسه آموزش عالی بنیان شاهین شهر
hamed.karimi35@yahoo.com

چکیده

این مقاله روش بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری (TLBO) را برای بهبود پایداری ولتاژ ارائه می کند. روش پیشنهاد شده بر مبنای مینیمم و ماکزیمم کردن شاخص های L باس های بار می باشد. ولتاژ ژنراتورها، منابع VAR قابل سویچ شدن و تپ چنجر ترانسفورماتور به عنوان متغیرهای بهینه سازی این موضوع استفاده می شوند. الگوریتم پیشنهادی روی سیستم های 30 باسه IEEE تست شده و نتایج موفقیت آمیزی حاصل شده است.

کلمات کلیدی: پایداری ولتاژ، پخش توان راکتیو، بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری

1. مقدمه

با توجه به رشد مداوم تقاضا برای انرژی الکتریکی و گسترش ظرفیت انتقال، ناپایداری ولتاژ یک چالش جدید در طراحی و عملکرد سیستم های قدرت است. حوادث احتمالی از قبیل قطع غیر منتظره خطوط ممکن است باعث ناپایداری ولتاژ شود که می تواند باعث فروپاشی شبکه شود. در دسترس نبودن منابع توان راکتیو به اندازه کافی برای نگهداری پروفایل ولتاژ در حالت نرمال در بارهای سنگین اولین دلیل فروپاشی ولتاژ شبکه است. در مورد درک موضوع در رابطه با ناپایداری ولتاژ و پیشنهاد برای حفاظت سیستم در برابر چنین خطاهایی، دو روش مختلف برای کنترل ناپایداری ولتاژ وجود دارد: کنترل پیشگیرانه و کنترل اصلاحی. کنترل پیشگیرانه شامل واکنش های پیشگیرانه می باشد بصورتی که تضمین شود که نقطه عملکرد به اندازه کافی از نقطه فروپاشی دور است. کنترل اصلاحی هنگامی فعال می شود که تحت یک حادثه پایداری ولتاژ در معرض خطر قرار می گیرد. هدف اصلی این کار برای مطالعه موضوع ناپایداری ولتاژ در چارچوب برنامه ریزی عملکرد کوتاه مدت می باشد، که باید اقدامات اصلاحی بهینه برای بهبود پایداری ولتاژ با توجه به محدودیت های عملیاتی موجود و تجهیزات عملیاتی انجام شود (T, 1991) و (Rajagopalan C, 1992) و (Gao B, 1992) و (Kamalasadan S, 2010). چندین روش در مجلات برای شناسایی بیشترین اثر موثر برای اصلاح پایداری ولتاژ پیشنهاد شده است. در (Tiranuchit A, 1988) مقدار ویژه مینیمم پخش بار ژاکوبین بصورت شاخص پایداری ولتاژ ارائه شده است. حساسیت مقدار ویژه مینیمم تنظیمات توان هر باس برای شناسایی مقدار VAR مورد نیاز برای نگهداری پروفایل ولتاژ هنگامی که افزایش توان عبوری نیاز

است بکار برده می شود. در (Kessel P, 1986) شاخص L برای تخمین پایداری ولتاژ بکار برده شده است. یک برنامه ریزی خطی بر مبنای الگوریتم پخش توان راکتیو برای اصلاح پایداری ولتاژ در (Thukaram D, 1998) پیشنهاد شده است. در مرجع (Nanba M, 1998) دو روش کنترلی برای اصلاح پایداری ولتاژ بر مبنای مفهوم شاخص تقریب ناپایداری ولتاژ (VIPI) پیشنهاد شده است. روش اول مقدار VIPI را با استفاده از روش برنامه ریزی درجه دوم برای پیدا کردن کنترل بهینه در شرایط مختلف سیستم، ماکزیمم می کند. روش دوم کنترل های مورد نیاز برای نگهداری مقدار آستانه مشخص را بر مبنای حساسیت های VIPI را با متغیر های کنترلی تعیین می کند. در (Tare RS, 1998) یک نظارت بر پایداری ولتاژ گزارش شده و الگوریتم بر مبنای زاویه بین بردارهای P و Q در باس بار بهبود داده شده است. در این روش یک تابع هدف درجه دوم ساده با استفاده از حساسیت های شاخص پایداری ولتاژ پیشنهاد شده و مینیمم کردن این تابع هدف منجر به بهبود حد پایداری ولتاژ می شود. الگوریتم LP دوگانه مقدماتی ترتیبی برای اصلاح پایداری ولتاژ استاتیکی بکار برده شده است (Raghunatha R, 1999). اخیراً روش های محاسبات تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و برنامه ریزی تکاملی برای برطرف کردن مشکلات بهینه سازی توان راکتیو بکار برده شده اند (al, 1998). یک الگوریتم تکاملی متفاوت در (Varadarajan M, 2008) برای پخش بهینه برای توان راکتیو و کنترل ولتاژ در مطالعات عملکرد سیستم قدرت پیشنهاد شده است. در این مقاله موضوع بهبود پایداری ولتاژ بصورت یک موضوع بهینه سازی غیر خطی فرمول بندی می شود و روش بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری برای بدست آوردن تنظیمات بهینه تغییرات کنترل توان راکتیو پیشنهاد می شود. روش بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری پیشنهاد شده برای بدست آوردن متغیرهای کنترل بهینه بکار برده می شود. بنابراین بصورتی عمل می کند که سطح پایداری ولتاژ سیستم تحت حالت پایدار و در مقابل شرایط بحرانی قطع برق یک خط مجزا در سیستم اصلاح شود. اثر این الگوریتم از طریق اصلاح پایداری ولتاژ در سیستم آزمایشی 30 باسه IEEE نشان داده شده است.

2. شاخص پایداری ولتاژ

آنالیز پایداری ولتاژ شامل هر دو فاکتور استاتیک و دینامیک می باشد. بصورتی که محاسبات دینامیکی زمان مصرف می باشد، در حالت کلی روش استاتیکی برای تخمین پایداری و کنترل ترجیح داده می شود. این شاخص یک تقریب اندازه گیری از دقت سیستم برای فروپاشی ولتاژ می باشد. روش های مختلفی برای تعیین شاخص های پایداری ولتاژ وجود دارد. یکی از این روش ها شاخص L پیشنهاد شده است. آن بر مبنای تحلیل بار عبوری می باشد. محدوده آن بین صفر (بی باری) و 1 (فروپاشی ولتاژ) می باشد. باس بین بالاترین مقدار شاخص L با ارزش ترین باس در سیستم می باشد. محاسبه شاخص L برای یک سیستم قدرت به اختصار مانند زیر می باشد:

با در نظر گرفتن یک سیستم N باسه و N_g ژنراتور روابط بین جریان و ولتاژ بصورت زیر می باشد:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

که I_G و V_G ولتاژ و جریان ژنراتور و I_L و V_L جریان و ولتاژ بار می باشد. با توجه به معادله بالا داریم:

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در اینجا

$$F_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1}[Y_{LG}] \quad (3)$$

شاخص L در یک گره تونن بصورت زیر تعریف می شود:

$$L_j = |1 - \sum_{i=1}^{N_g} F_{ji} \frac{V_i}{V_j} \angle (\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)| \quad (4)$$

که V_j و V_i اندازه ولتاژ تونن ژنراتور i و j می باشند. θ_{ij} زاویه فاز F_{ji} ، δ_i و δ_j زاویه ولتاژ ژنراتور i و j ، مقادیر F_{ji} از ماتریس F_{LG} بدست می آیند. شاخص های L برای یک شرایط بار مشخص برای تمامی باس بارها محاسبه شده و ماکزیمم اندیس های L (L^{\max}) تقریب فروپاشی ولتاژ سیستم را مشخص می کند. نمایش دهنده L^{\max} یک مقدار برای تخمین فاصله حالت واقعی سیستم برای محدودیت پایداری می باشد.

3. فرمول بندی مسئله

نگهداری سطح پایداری ولتاژ مشخص در شرایط نرمال و حوادث احتمالی یک موضوع مهم در عملکرد سیستم قدرت است. ایده اصلی طرح بهبود پایداری ولتاژ پیشنهاد شده برای به حداقل رساندن مقدار L^{\max} سیستم از طریق تغییر زمانبندی متغیرهای کنترل توان راکتیو است در حالتی که محدودیت های سیستم رضایت بخش باشد. معادله بالانس توان حقیقی:

$$P_i - V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j [G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}] = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, N_{B-1} \quad (5)$$

معادله بالانس توان راکتیو:

$$Q_i - V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j [G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}] = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ} \quad (6)$$

محدودیت تولید توان اکتیو باس مرجع

$$P_s^{\min} \leq P_s \leq P_s^{\max} \quad (7)$$

محدودیت تولید توان راکتیو ژنراتور:

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad i \in N_{PV} \quad (8)$$

محدودیت ولتاژ باس ژنراتور:

$$V_{gi}^{\min} \leq V_{gi} \leq V_{gi}^{\max} \quad i \in N_B \quad (9)$$

محدودیت تولید توان راکتیو بانک خازنی:

$$Q_{ci}^{\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{\max} \quad i \in N_c \quad (10)$$

محدودیت تنظیم تپ ترانس :

$$t_k^{\min} \leq t_k \leq t_k^{\max} \quad i \in N_T \quad (11)$$

محدودیت عبور از خط:

$$S_l \leq S_l^{\max} \quad l \in N_l \quad (12)$$

از فرمول های بالا فهمیده می شود که موضوع بهبود پایداری ولتاژ یک موضوع بهینه سازی ترکیبی غیر خطی است. متغیرهای گسسته بوجود آمده به شکل تنظیم تپ ترانس، تنظیم توان راکتیو بانک خازنی، روش های بهینه سازی قراردادی،

برای برطرف کردن مشکل پیچیدگی بهینه سازی کافی نمی باشند. قسمت بعد جزئیات روش بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری را برای برطرف کردن مشکل پیچیدگی بهینه سازی ارائه می کند.

4. بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری

بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری (TLBO) یک روش بهینه سازی جدید ارائه شده توسط راتو و همکاران است. این روش در اثر تاثیر یک معلم روی دانش آموزان کار می کند. مانند سایر الگوریتم های الهام گرفته از طبیعت، TLBO نیز یک روش مبتنی بر جمعیت است و از یک جمعیت از راه حل ها برای دستیابی به جواب کلی استفاده می نماید. جمعیت به عنوان گروهی از یادگیران یا دانش آموزان یک کلاس در نظر گرفته می شود. یک مدرس تلاش می کند تا با آموزش به یادگیران، سطح دانش کلاس را افزایش دهد و دانش آموز به نمره یا رتبه خوبی مطابق با توانایی خودش دست یابد. در حقیقت یک مدرس خوب کسی هست که دانش آموز خود را به سطح دانش خودش برساند. مدرس یک شخص با دانش بالا در جامعه بوده که علم خود را با دانش آموزان خود تقسیم می کند به طوری که، بهترین جواب (بهترین عضو جمعیت) در همان تکرار به عنوان مدرس عمل می کند. فرآیند TLBO به دو فاز تقسیم بندی می شود، فاز اول فاز مدرس، که شامل فراگیری از مدرس می باشد و فاز دوم فاز یادگیرنده، که شاگردان از تراکنش متقابل همدیگر آموزش می بینند بعد از تولید جمعیت اولیه و ارزیابی تابع هدف برای هر عضو از جمعیت فاز مدرس و یادگیرنده به صورت زیر بیان می شود (V.J. Savsani, 2011) و (Savsani, 2012).

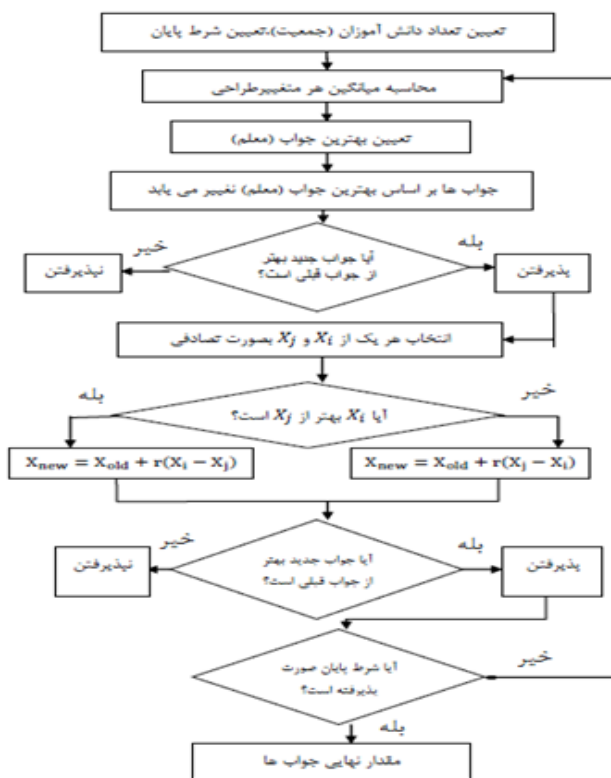
فاز مدرس: مدرس برای تغییر میانگین امتیاز کلاس (جمعیت) به سوی موقعیت خودش تلاش می کند، این فاز با یک فرآیند تصادفی مطابق رابطه (13) برای تولید یک عضو یا موقعیت جدید در جمعیت ادامه می یابد.

$$X_{new,D} = X_{old,D} + r(X_{teacher,D} - T_F M_D) \quad (13)$$

اندیس D بیان گر تعداد موضوعات یا دروس (متغیر مساله)، $X_{old,D}$ عضو قدیمی، که هنوز برای افزایش سطح دانش مجبور است از مدرس بیاموزد و شامل یک بردار $1 \times D$ بوده که نتیجه مربوط به هر موضوع یا درس خاص را در بر می گیرد، r یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ است، $X_{teacher,D}$ بهترین عضو جمعیت در این تکرار است که برای تغییر میانگین کلاس (جمعیت) به سمت موقعیت خودش تلاش می کند، T_F فاکتور تدریس، و M_D یک بردار $1 \times D$ می باشد که شامل مقادیر میانگین نتایج کلاس برای هر موضوع می باشد. مقدار T_F می تواند 1 یا 2 باشد که یک گام ابتکاری بوده و به صورت تصادفی با احتمال مساوی در نظر گرفته می شود. عضو جدید $X_{new,D}$ در صورتی که بهتر از عضو قدیمی باشد پذیرفته می شود. فاز یادگیرنده: یادگیرندگان با دو روش مختلف یکی از طریق مدرس و دیگری از طریق تعامل میان خودشان دانش خودشان را افزایش می دهند. یک یادگیرنده به طور تصادفی با دیگر یادگیرندگان با کمک بحث های گروهی، ارائه و غیره تعامل می کند. یک یادگیرنده چیزهای جدیدی از سایر دانش آموزان یاد خواهد گرفت به شرط آن که سایرین دانش بالایی نسبت به او داشته باشند.

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_i(X_j - X_k) \quad (14)$$

اندیس i از یک تا تعداد کل اعضاء تغییر می کند، $X_{old,i}$ عضو قدیمی است که تاکنون از تراکنش متقابل با سایر دانش آموزان چیزی یاد نگرفته است، r_i یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ است و X_j و X_k دو دانش آموز هستند که به صورت تصادفی با شرط $j \neq k$ و شرط بهتر بودن تابع هدف X_j نسبت به X_k انتخاب شده اند. عضو جدید $X_{new,i}$ در صورتی که بهتر از عضو قدیمی $X_{old,i}$ باشد پذیرفته می شود. به این ترتیب فلوچارت الگوریتم TLBO بصورت شکل 1 است. توضیحات بیشتر در زمینه الگوریتم TLBO در مراجع (V.J. Savsani, 2011) و (Savsani, 2012) آمده است.



شکل 1- فلوجارت الگوریتم TLBO

5. پیاده سازی الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری

برای برطرف کردن مشکل پخش توان راکتیو نیاز است متغیرهای زیر بوسیله الگوریتم بهینه سازی تعیین شوند:

ولتاژهای باس ژنراتور (V_{gi}) ، تولید توان راکتیو بانک خازنی (Q_{ci}) ، و تنظیمات تپ ترانس (t_k).

برای مسئله بهینه سازی توان راکتیو، ولتاژ ترمینال ژنراتور، توان راکتیو بانک خازنی و وضعیت تپ ترانس ها که متغیرهای تصادفی بهینه هستند در نظر گرفته می شوند. ولتاژهای باس ژنراتور بصورت تعداد نقاط متغیر بیان می شوند. در حالی که وضعیت تپ ترانس و تولید توان راکتیو بانک خازنی بصورت صحیح معرفی می شوند. در مسئله بهینه سازی توان راکتیو در نظر گرفته شده، هدف به حداقل رساندن L^{\max} سیستم با توجه به محدودیت ها (5-12) است. محدودیت ها با اضافه کردن یک تابع پنالتی درجه دوم به تابع هدف گرفته شده اند. با استفاده از تابع پنالتی تابع هدف جدید می شود:

$$\text{Min} = L^{\max} + SP + \sum_{j=1}^{N_{PQ}} VP_j + \sum_{j=1}^{N_g} QP_j + \sum_{j=1}^{N_1} LP_j \quad (15)$$

در اینجا SP و VP_j و QP_j و LP_j اصطلاحات پنالتی برای میزان محدودیت توان اکتیو ژنراتور باس مرجع، میزان محدودیت ولتاژ باس بار ، میزان محدودیت تولید توان راکتیو و محدودیت بار عبوری می باشد. این مقادیر بوسیله روابط زیر تعیین می شوند:

$$SP = \begin{cases} K_s(P_s - P_s^{\max})^2 & \text{if } P > P_s^{\max} \\ K_s(P_s - P_s^{\min})^2 & \text{if } P < P_s^{\min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$VP_j = \begin{cases} K_v(V_j - V_j^{\max})^2 & \text{if } V_j > V_j^{\max} \\ K_v(V_j - V_j^{\min})^2 & \text{if } V_j < V_j^{\min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

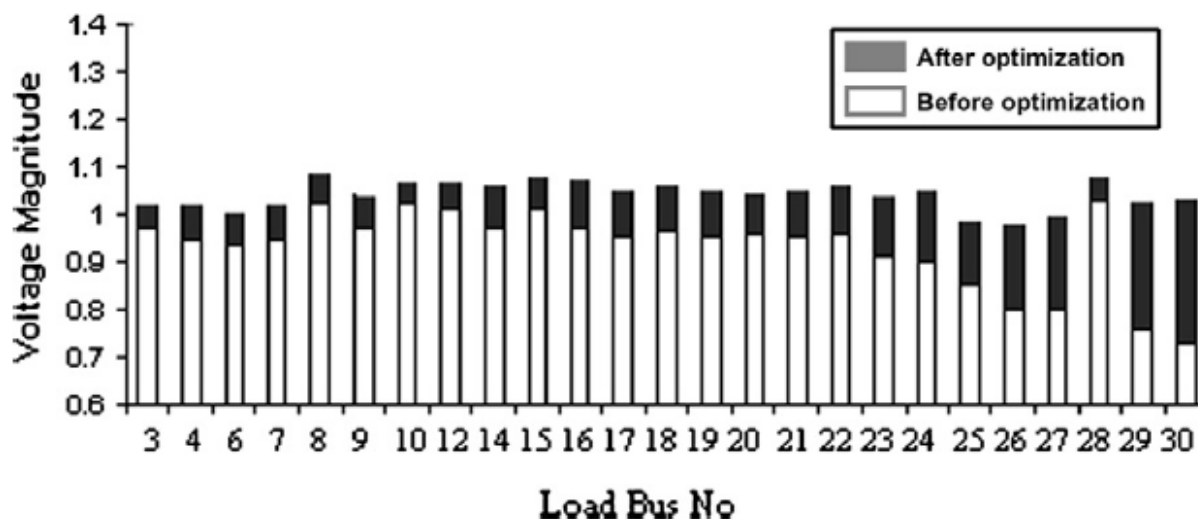
$$VP_j = \begin{cases} K_q(Q_j - Q_j^{\max})^2 & \text{if } Q_j > Q_j^{\max} \\ K_q(Q_j - Q_j^{\min})^2 & \text{if } Q_j < Q_j^{\min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

$$LP_j = \begin{cases} K_l(L_j - L_j^{\max})^2 & \text{if } L_j > L_j^{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

که در آن K_s و K_v و K_q و K_i ضرایب پنالتی می باشند. موفقیت روش تابع پنالتی در انتخاب مناسب پارامترها می باشد. با استفاده از روش تابع پنالتی بالا، برای فهمیدن یک ترکیب صحیح از پارامترهای پنالتی K_s و K_v و K_q و K_i یکی باید آزمایش شود.

6. نتایج و بحث

روش TLBO پیشنهاد شده در سیستم آزمایشی 30 باسه IEEE برای اصلاح پایداری ولتاژ در شرایط عادی و حوادث احتمالی بکار برده شد. بارهای راکتیو و حقیقی مطابق با ضرایب وزن دار از قبل تعیین شده برای تحلیل سیستم تحت شرایط تنش بکار می روند. اندیس های L برای یک شرایط بار مشخص برای تمامی باس بارها استفاده می شود و ماکزیمم اندیس L تقریب فروپاشی ولتاژ شبکه را می دهد. تحریک ژنراتور، جبران کننده های VAR سویچ شدنی و تنظیمات تپ ترانسفورماتور به عنوان متغیرهای کنترل برای اصلاح پایداری ولتاژ استفاده می شود. برنامه در MATLAB نوشته شده و نتایج شبیه سازی به شکل زیر می باشد.



شکل 2. مشخصات ولتاژ تحت قطع خط 27-28

جدول 1: تنظیمات کنترل کننده برای سیستم 30 باسه IEEE

شماره	متغیرهای کنترل	تنظیمات اولیه	تنظیمات بهینه
1	V_1	1.0300	0091.0
2	V_2	1.0200	1.0456
3	V_3	1.0100	1.0063
4	V_4	1.0100	0.9895
5	V_5	1.0700	1.0584
6	V_6	1.0700	1.0806
7	t_1	0.9780	1.0500
8	t_2	0.9690	0.9100
9	t_3	0.9620	0.9650

0.9500	0.9680	t_4	10
5	0	Q_{30}	11
5	0	Q_{29}	12
5	0	Q_{26}	13
1	0	Q_{25}	14
3	0	Q_{24}	15
10.55	10.76	-	P_{Loss}
0.1807	0.1978	-	L_{max}

جدول 2: نتایج بهینه سازی تحت حالت احتمالی برای سیستم 30 باسه IEEE

قطع خط 27-30 (حالت 125٪ بار گذاری)		قطع خط 27-28 (حالت 125٪ بار گذاری)		
بعد از بهینه سازی	قبل از بهینه سازی	بعد از بهینه سازی	قبل از بهینه سازی	
0.2031	0.4435	0.04700	0.6807	L^{max}
0.9639	0.9614	0.9314	0.7068	V^{min}
14.2595	13.3840	11.7018	15.1240	P_{Loss}

سیستم 30 باسه IEEE.

سیستم 30 باسه IEEE، 6 ژنراتور، 24 باس بار، 41 خط انتقال و 4 انشعاب از تپ چنجر ترانس (9-6) و (10-6) و (12-4) و (27-28) دارد. تنظیم اولیه متغیر کنترل سیستم تحت بار از مرجع (Alsac O, 1974) گرفته شده است. محدودیت های ولتاژ بالا و پایین در تمامی باس بارها به غیر از اسلک بصورت 1.1 و 0.95 می باشد. ولتاژ باس اسلک در مقدار مشخص 1.6 پریونیت به منظور تحلیل سیستم در شرایط تنش ثابت می شود. توان های اکتیو و راکتیو هر باس در 1.25 متناظر با تنظیمات ضرب می شوند. شاخص های L در تمام باس بارها محاسبه می شوند. از این محاسبات فهمیده می شود که $L^{max}=0.1978$ و پنج باس ضعیف تر 25 تا 30 برای تزریق توان راکتیو انتخاب می شوند. الگوریتم بهبود پایداری ولتاژ که پیشنهاد شد با اندازه ولتاژ باس ژنراتور بکار برده شد. تولید توان راکتیو از بانک خازنی و موقعیت OLTC به عنوان متغیرهای کنترل تولید توان اکتیو ژنراتور را برای باس اسلک ثابت نگه می دارد. اندازه ولتاژ ژنراتور به عنوان متغیر پیوسته در حالی که تنظیمات تپ ترانسفورماتور و بانک خازنی شنت به عنوان متغیرهای گسسته به ترتیب با 9 سطح و 6 سطح به دست می آیند. الگوریتم TLBO با پارامترهای مختلفی تست شد و بهترین نتایج با اندازه جمعیت 30 بدست می آید. مقادیر بهینه از متغیرهای کنترل از الگوریتم در جدول 1 همراه با تنظیم متغیر کنترل اولیه مشخص شده است. از نتایج الگوریتم بهینه سازی مشخص می شود که ماکزیمم مقدار شاخص L از مقدار اولیه 1807-0.1978 در 40.02 s افزایش می یابد. در تحلیل حوادث احتمالی مشخص شد که خروجی های خط 27-28 و 30-27 خیلی بیشتر از حالت مقادیر L^{max} از 0.6807 و 0.4435 می باشد. الگوریتم TLBO برای بهبود پایداری ولتاژ تحت شرایط حوادث احتمالی بکار می رود. تنظیم متغیر کنترل بهینه بعد از کاربرد الگوریتم پیشنهادی در جدول 1 نشان داده شده است. کارایی سیستم قبل و بعد از کاربرد الگوریتم برای دو حادثه احتمالی در جدول 2 آورده شده است. از این جدول مشخص می شود که مقدار L^{max} افزایش می یابد و پایداری ولتاژ بعد از کاربرد الگوریتم بهبود می یابد. پروفیل ولتاژ قبل و بعد از استفاده از الگوریتم تحت شرایط قطع خط 27-28 در شکل 2 نشان داده شده است. اصلاح در پروفیل ولتاژ سیستم بعد از کاربرد الگوریتم در این شکل نشان داده شده است.

7. نتیجه گیری

در این مقاله مشکل بهبود امنیتی به صورت یک مشکل بهینه سازی با مینیمم کردن، ماکزیمم شاخص L به عنوان تابع هدف فرمول بندی شده است. باس های ضعیف در این سیستم برای تزریق توان راکتیو انتخاب شدند. الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر تدریس- یادگیری برای شناسایی تنظیم متغیر کنترل بهینه تحت شرایط عادی و حوادث احتمالی پیشنهاد شد. شبیه سازی در سیستم 30 باسه IEEE نشان می دهد که الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر تدریس- یادگیری برای اصلاح پایداری ولتاژ در شرایط عادی و حوادث احتمالی موثر است.

8. مراجع

1. al, M. e. (1998). Evolutionary computation in power systems. Int J Electr Power Energy Syst, 89-98.
2. Alsac O, S. B. (1974). Optimal load flow with steady-state security. IEEE Trans Power Apparatus Syst, 745-751.
3. Gao B, M. G. (1992). Voltage stability evaluation using modal analysis. IEEE Trans Power Syst, 1529-1542.
4. Kamalasadani S, T. D. (2010). A new intelligent algorithm for online voltage stability assessment and monitoring. Int J Electr Power Energy Syst, 100-110.
5. Kessel P, G. H. (1986). Estimating the voltage stability of power systems. IEEE Trans Power Syst, 346-354.
6. Nanba M, H. Y. (1998). Studies on VIPI based control methods for improving voltage stability. Int J Electr Power Energy Syst, 141-146.
7. Raghunatha R, R. R. (1999). Optimal static voltage stability improvement using a numerically stable SLP algorithm for real time applications. Int J Electr Power Energy Syst, 289-297.
8. Rajagopalan C, L. B. (1992). Dynamic aspects of voltage/ power characteristics. IEEE Trans Power Syst, 990-1000.
9. Savsani, V. (2012). Teaching-Learning-Based Optimization: An optimization method for continuous non-linear large scale problems. Information Sciences, 1-15.
10. T, V. C. (1991). A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse. IEEE Trans Power Syst, 145-156.
11. Tare RS, B. P. (1998). A new index for voltage stability monitoring and enhancement. Int J Electr Power Energy Syst, 345-351.
12. Thukaram D, P. K. (1998). Voltage stability improvement: case studies of Indian power networks. Electr Power Syst Res, 35-44.
13. Tiranuchit A, T. R. (1988). A posturing strategy against voltage instability in electric power systems. IEEE Trans Power Syst, 87-93.

14. V.J. Savsani, D. V. (2011). Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 303–315.
15. Varadarajan M, S. K. (2008). Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch. *Int J Electr Power Energy Syst*, 435-441.