

## تعیین مقدار و موقعیت بهینه نصب ادوات FACTS با در نظر گرفتن تابع هدف چندمنظوره و ترکیب آبکاری فولاد با برنامه‌ریزی آرمانی

محسن گیتی‌زاده حقیقی      استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز  
 محسن کلانتر      دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

### چکیده

در این مقاله، روش جدیدی برای تعیین مکان و مقدار بهینه عناصر FACTS در سیستم قدرت به صورت چند هدفه ارائه خواهد شد. ادوات FACTS به کار گرفته شده در این تحقیق TCSC و SVC بوده و اهداف مورد نظر عبارتند از: کاهش تلفات اکتیو، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری جهت خرید ادوات FACTS، مقاوم‌سازی حاشیه امنیتی سیستم در مقابل سقوط ولتاژ، افزایش بارپذیری شبکه و کاهش انحراف ولتاژ در سیستم قدرت الکتریکی. قیود عمل‌کردی و کنترلی به همراه قیود بار از جمله محدودیت‌هایی هستند که برای مکان‌یابی در نظر گرفته خواهند شد. در این مطالعه به منظور جلوگیری از تقریب‌های ناشی از خطی‌سازی‌های مرسوم و نزدیک شدن به جواب بهینه جامع از روش بهینه‌سازی آرمانی مبتنی بر آبکاری فولاد بهره گرفته شده است. نتایج به‌کارگیری این روش برای مکان‌یابی چند هدفه در شبکه IEEE با ۱۴ شین، در انتها مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی ادوات FACTS، بهینه‌سازی چندمنظوره، آبکاری فولاد، برنامه‌ریزی آرمانی.

## Determination of Optimal Size and Location of FACTS Devices Using Multi-Objective Function and Combination of Simulated Annealing with Goal Programming Method

M. Gitizadeh      Faculty of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran  
 M. Kalantar      Faculty of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

### Abstract

In this investigation a novel approach is presented to find optimum locations and capacity of FACTS devices in a power system using multi-objective function. TCSC and SVC are utilized as FACTS devices in this study and the objectives are: active power loss reduction, new FACTS devices cost reduction, robustifying the security margin against voltage collapse, network loadability enhancement, and voltage deviation reduction of the power system. Operational and control constraints as well as load constraints are considered for optimum devices allocation. In this study a goal attainment method based on simulated annealing is used to prevent any approximation due to conventional linearization and also to approach the global optimum. A standard IEEE 14-bus test system is used to validate the performance and effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** FACTS allocation, Multi-objective optimization, simulated annealing, Goal programming.

## ۱- مقدمه

امروزه بیش از هر زمانی طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت با حداکثر بازده و بیشترین میزان قابلیت اعتماد و ایمنی حائز اهمیت است. وجود مشکلاتی از قبیل رعایت حریم و توسعه خطوط انتقال به افزایش بارگذاری خطوط در نزدیکی مقادیر نامی آنها و استفاده از حداکثر ظرفیت انتقال منجر می‌گردد و لذا تامین پایداری ولتاژ تحت شرایط عادی و پیشامدهای احتمالی را مشکل‌تر می‌سازد. این مساله با توجه به این‌که وظیفه اصلی واحدهای تولیدی بر تولید توان اکتیو بنا نهاده می‌شود و جبران‌سازی راکتیو چندانی توسط آن‌ها انجام نمی‌شود، بیشتر به چشم خواهد آمد.

ادوات FACTS به عنوان جبران‌سازهای مدرن توان اکتیو و راکتیو، به دلیل پاسخ سریع در مواجهه با اغتشاش در شرایط اضطراری، عملکرد منعطف در وضعیت عادی سیستم و قابلیت به‌کارگیری در شرایط دینامیکی، بهترین وسیله برای تامین توام قیود امنیت ولتاژ و امکان‌پذیری آن در سیستم قدرت بوده و امکان اعمال شاخص پایداری ولتاژ عام را در بحث جایابی ادوات FACTS به خوبی فراهم می‌آورد.

قابلیت‌های متنوع ادوات FACTS باعث شده است که اهداف متفاوتی جهت تعیین مکان و موقعیت بهینه آنها ملاک عمل قرار گیرد. افزایش پایداری استاتیکی ولتاژ [۱-۵]، افزایش بارپذیری شبکه [۶ و ۷]، کاهش تلفات [۸]، بهبود پروفیل ولتاژ [۶]، کاهش هزینه سوخت نیروگاه‌ها به وسیله پخش بهینه توان [۹] و کاهش تخطی از قیود حرارتی خطوط [۶]، از جمله عمده‌ترین توابع هدف برای جایابی به شمار می‌روند. باید دانست که هر یک از اهداف برشمرده فوق در جایابی به نوبه خود باعث بهبود بهره‌برداری از شبکه شده و تامین آنها ضرورت اصلی شبکه‌های قدرت می‌باشد. طبیعی است که بهره‌برداری بهینه از خطوط، داشتن حداقل تلفات ممکن را طلب می‌نماید. بنابراین آنچه مسلم است، در جایابی ادوات FACTS هیچ کدام از اهداف اخیر را نمی‌توان نادیده گرفت. بدیهی است برخلاف روش به کار رفته در [۶]، استفاده از عناصر FACTS به هر تعداد دلخواه جهت دستیابی به یک یا چند هدف و بدون توجه به هزینه جبران‌سازها و منافع حاصل شده، معقول نمی‌باشد.

استفاده از بهینه‌سازی تک هدفه، عدم وارد کردن هزینه سرمایه‌گذاری به عنوان جزئی از تابع هدف اصلی، جدا فرض کردن مولفه‌های اکتیو و راکتیو در حضور چند هدف و در نتیجه

ساده‌سازی جایابی ادوات FACTS [۹]، به ترتیب باعث عدم استفاده بهینه از همه قابلیت‌های ادوات FACTS، کاربردی نبودن جایابی و حل غیر دقیق مساله خواهد شد. با این وضع واضح است که از جمله ضروریات انجام یک بهینه‌سازی موفق با توجه به ویژگی‌های خاص مساله جایابی ادوات FACTS، استفاده از یک روش هوشمند در روند بهینه‌سازی می‌باشد. در این تحقیق، بهینه‌سازی با استفاده از روش آبکاری فولاد که در حداقل‌های محلی گرفتار نخواهد شد، انجام می‌گردد.

هدف از این مقاله تعیین مقدار و موقعیت مناسب نصب ادوات FACTS در سیستم قدرت به صورت جامع و بر اساس بهینه‌سازی چند منظوره می‌باشد. بدین معنی که مکان‌یابی با هدف افزایش پایداری استاتیکی ولتاژ، افزایش بارپذیری شبکه، کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ انجام می‌شود. همچنین در تابع هدف کاهش تلفات، هزینه سرمایه‌گذاری ادوات FACTS و توان تولیدی نیروگاه‌ها در ماکزیمم بار نیز اضافه می‌گردد به نحوی که کاهش عوامل اصلی هزینه در جایابی مد نظر قرار گیرد. سپس با استفاده از بهینه‌سازی چندمنظوره، مساله اصلی در تامین همزمان توابع هدف، به یک مساله بهینه‌سازی تک هدفی که مقادیر اهداف مورد نظر طراح در آن وارد می‌شود، تبدیل می‌گردد.

در این مقاله از روش بهینه‌سازی آرمانی [۱۰] که قادر است در ترکیب با روش آبکاری فولاد توافق مناسبی بین اهداف متعارض مساله برقرار سازد، استفاده می‌شود. همچنین عناصر FACTS مورد استفاده عبارت از TCSC و SVC می‌باشند.

در انتها نتایج کاربرد روش فوق الذکر در سیستم نمونه IEEE با ۱۴ شین مورد تحلیل قرار گرفته و مکان و مقدار بهینه ادوات پیشنهادی در تامین اهداف مورد نظر، تعیین خواهند گردید.

## ۲- بیان ریاضی و معرفی توابع هدف

در این قسمت بیان ریاضی مورد نیاز برای مکان‌یابی چند هدفه عناصر FACTS ارائه خواهد شد. این بیان ریاضی سعی دارد تمام اهداف موجود را به‌صورت همزمان حداقل سازد. در این مقاله برای مکان‌یابی سه تابع هدف در نظر گرفته شده است. اولین هدف مربوط به کاهش تلفات، هزینه سرمایه‌گذاری عناصر FACTS مورد نیاز و توان تولیدی نیروگاه‌ها در ماکزیمم بار است. چگونگی نایل شدن به این هدف توسط رابطه (۱) ارائه

که در آن  $A$  هزینه احداث نیروگاه بر حسب  $(\$/kW)$ ،  $B$  نرخ بازگشت سرمایه (درصد)،  $n_{facts}$  و  $n_{plant}$  به ترتیب طول عمر (سال) ادوات FACTS و نیروگاه می‌باشند.  $P_{peak}$  نیز توان تولیدی نیروگاه‌ها در پی‌یک بار سال مطالعه برحسب کیلو وات می‌باشد. تابع هدف بعدی مرتبط با حاشیه امنیتی سیستم است. این هدف وابسته به پایداری استاتیک ولتاژ بوده و بررسی می‌کند که چگونه خطر سقوط ولتاژ، کاهش می‌یابد. سقوط ولتاژ به این معنی است که سیستم قادر نیست تقاضای بار موجود را برآورده کند و این موقعیت یک حالت بحرانی برای سیستم تلقی می‌شود. دانستن این حالت بحرانی باعث ایمن شدن سیستم در مقابل سقوط ولتاژ می‌شود. با به دست آوردن این حالت بحرانی میزان ایمنی سیستم از رابطه (۵) به دست می‌آید [۱۲]:

$$SM = \frac{\sum_{j \in J_L} S_j^{limit} - \sum_{j \in J_L} S_j^{initial}}{\sum_{j \in J_L} S_j^{limit}} \quad (5)$$

که در آن  $S_j^{limit}$  و  $S_j^{initial}$  به ترتیب بار مربوط به باس بار  $j$  برحسب MVA در حالت اولیه و حالت حدی (بحرانی) می‌باشند.  $J_L$  مجموعه‌ای شامل باس‌های بار است. برای سیستمی که در شرایط عمل کرد پایدار کار می‌کند SM باید مقداری بین صفر تا یک داشته باشد. مقدار منفی SM به این معنی است که سیستم قادر به تامین تقاضای بار اولیه نخواهد بود و سیستم حتماً دچار سقوط ولتاژ می‌شود. به منظور افزایش SM و برای اینکه کماکان روند قبلی یعنی مینیمم‌سازی را دنبال کنیم تابع هدف به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$f_2(x, u, w) = 1 - SM = \frac{\sum_{j \in J_L} S_j^{initial}}{\sum_{j \in J_L} S_j^{limit}} \quad (6)$$

لازم به ذکر است که در تعیین SM از روش برنامه‌ریزی مربعی ترتیبی (SQP) استفاده خواهد شد [۱۲]. هدف افزایش بارپذیری سیستم با هدف افزایش SM هم‌راستا بوده و تنها شرط اضافی جدید، افزودن قید توان نامی خطوط به مجموعه روابط بهینه‌سازی مورد نیاز در تعیین SM می‌باشد.

شده است. لازم به ذکر است که در رابطه (۱) تضمینی برای کاهش تک‌تک اهداف هزینه‌بر وجود ندارد. به طوری که پس از بهینه‌سازی کاهش کلی تابع هدف هزینه خواسته می‌شود. دلیل آن است که کاهش هزینه کلی مد نظر بوده است نه هر کدام از عوامل هزینه. به عبارتی خواسته شده است که مکان‌یابی باعث کاهش کلی هزینه عمل‌کرد شبکه شود.

$$f_1(x, u, w) = K_e \sum_i (P_{loss_i}(x, u, w) T_i) + K_i C_{investment}(w) + K_p P_{peak}(x, u, w) \quad (1)$$

در این رابطه  $K_e$  ( $\$/kWh$ ) هزینه انرژی،  $T_i$  مدت زمان مربوط به سطح بار  $i$  ام برحسب ساعت و  $P_{loss_i}(x, u, w)$  تلفات توان حقیقی در سطح بار  $i$  از منحنی بار سالیانه سیستم برحسب kW می‌باشند. در رابطه فوق  $C_{investment}(w)$  خود به صورت زیر است:

$$C_{investment}(w) = \sum_i C_{M var\_SVC_i} S_{SVC_i} + \sum_j C_{M var\_TCSC_j} S_{TCSC_j} \quad (2)$$

که در آن:  $S_{SVC_i}$  و  $S_{TCSC_j}$  قدرت SVC و TCSC مورد نیاز برحسب مگاوار،  $C_{M var\_SVC_i}$  و  $C_{M var\_TCSC_j}$  هزینه هر مگاوار از عناصر مذکور می‌باشند که از روابط زیر تعیین می‌گردند [۱۱]:

$$\begin{aligned} C_{M var\_TCSC} &= 1.5 S_{TCSC}^2 - 713 S_{TCSC} \\ &\quad + 153750 (\$/MVAr) \\ C_{M var\_SVC} &= 0.3 S_{SVC}^2 - 305 S_{SVC} \\ &\quad + 127380 (\$/MVAr) \end{aligned} \quad (3)$$

باید توجه داشت که مقایسه هزینه کاهش تلفات و هزینه کاهش سرمایه‌گذاری ادوات جدید باید در همان سالی صورت گیرد که مطالعات مکان‌یابی در آن انجام می‌شود، لذا پس از محاسبه هزینه تلفات با توجه به منحنی بار سال مذکور، سایر هزینه‌ها مانند سرمایه‌گذاری لازم برای ادوات جدید و منافع حاصل از کاهش توان تولیدی در ماکزیمم بار باید بر اساس نرخ بهره، طول عمر ادوات جدید و نیروگاه به هزینه معادل همان سال جهت امکان تجمیع آنها در یک تابع هدف، تبدیل شود. این کار با استفاده از دو ضریب  $K_i$  و  $K_p$  انجام شده است:

$$K_i = \frac{(1+B)^{n_{facts}} B}{(1+B)^{n_{facts}} - 1}, \quad K_p = A \frac{(1+B)^{n_{plant}} B}{(1+B)^{n_{plant}} - 1} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \min_{u,w \in \mathcal{X}} f_1(x,u,w) \\ \min_{u,w \in \mathcal{X}} f_2(x,u,w) \\ \min_{u,w \in \mathcal{X}} f_3(x,u,w) \end{aligned} \quad (9)$$

در این رابطه،  $\mathcal{X}$  ناحیه جوابهای ممکن می باشد.

#### ۴- مدل TCSC، SVC و تغییرات لازم در معادلات امنیت ولتاژ

TCSC دارای دو مشخصه ممکن خازنی و سلفی به منظور کاهش یا افزایش راکتانس خط انتقال است. استفاده از این عنصر می تواند باعث افزایش ظرفیت توان انتقالی از خط، افزایش حد پایداری استاتیکی ولتاژ، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات (تسهیم توان بین خطوط موازی) گردد. SVC نیز دارای دو مشخصه خازنی و سلفی بوده و عمدتاً جهت بهبود و ترمیم ولتاژ در شرایط استاتیک و دینامیک، کاهش تلفات راکتیو شبکه و افزایش حد پایداری استاتیکی ولتاژ کاربرد دارد.

به منظور استفاده از TCSC و SVC جهت تامین اهداف مکان یابی در قسمت دو، به ترتیب مدل توان تزریقی و سوسپتانس متغیر که در شکل های (۱) و (۲) ارائه شده اند، استفاده شده است. در شکل (۱) مدل فشرده خط جبران شده  $k$  که بین شین های  $t$  و  $f$  قرار دارد، آورده شده است. در این صورت توان های تزریقی اکتیو و راکتیو به شین های مذکور عبارتند از [۱۳]:

$$P_{inj}^{TCSC} = G_{ff}'' V_f^2 + (G_{ft}'' \cos \delta_{ft} + B_{ft}'' \sin \delta_{ft}) V_f V_t \quad (10)$$

$$Q_{inj}^{TCSC} = -B_{ff}'' V_f^2 + (G_{ft}'' \sin \delta_{ft} - B_{ft}'' \cos \delta_{ft}) V_f V_t \quad (11)$$

$$P_{inj}^{TCSC} = G_{tt}'' V_t^2 + (G_{tf}'' \cos \delta_{tf} + B_{tf}'' \sin \delta_{tf}) V_f V_t \quad (12)$$

$$Q_{inj}^{TCSC} = -B_{tt}'' V_t^2 + (G_{tf}'' \sin \delta_{tf} - B_{tf}'' \cos \delta_{tf}) V_f V_t \quad (13)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} G_{ft}'' &= \frac{X_c R(2X + X_c)}{(R^2 + X^2)(R^2 + (X + X_c)^2)} \quad \text{and} \\ B_{ft}'' &= \frac{X_c(R^2 - X(X + X_c))}{(R^2 + X^2)(R^2 + (X + X_c)^2)} \end{aligned} \quad (14)$$

سومین تابع هدف مربوط به انحراف ولتاژ سیستم می باشد. انحراف ولتاژ برای هر باس بار از رابطه (۷) به دست می آید [۱۰]:

$$VD_i = \frac{\Phi(|V_i - V_i^{ideal}| - dv_i)}{v_i}$$

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ x & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$v_i$  اندازه ولتاژ در باس بار  $i$  و  $V_i^{ideal}$  ولتاژ ایده آل باس بار  $i$  (معمولاً برابر 1 p.u.) و  $dv_i$  تلورانس ماکزیمم انحراف در ولتاژ می باشد. سومین تابع هدف با استفاده از رابطه (۸) تعیین می گردد:

$$f_3(x,u,w) = \sum_{i \in J_L} VD_i = \sum_{i \in J_L} \frac{\Phi(|V_i - V_i^{ideal}| - dv_i)}{v_i} \quad (8)$$

مینیم کردن این تابع هدف به منزله فرستادن ولتاژ به طرف محدوده تعیین شده برای آن می باشد.

در تمامی روابط فوق  $x, u, w$  به ترتیب بردار متغیرهای کنترلی و بردار متغیرهای حالت می باشند. بردار  $w$  مبین اندازه و نوع عنصر FACTS مورد نیاز می باشد.

در این مینیم سازی چند هدفه، محدودیت هایی شامل برقراری توازن توان اکتیو و راکتیو در باس های بار، محدوده مجاز توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط ژنراتورها، محدوده مجاز تپ در ترانسفورماتورها، محدودیت عبور توان از خطوط و محدوده مجاز تغییرات مقادیر عناصر FACTS، در حل مساله مد نظر می باشند.

در ادامه، استراتژی به کار گرفته شده برای حل مساله مکان یابی ادوات FACTS به صورت چند هدفه که دارای قیدهای متعدد غیرخطی می باشد ارائه خواهد شد.

#### ۳- تشکیل مساله

به طور خلاصه، هدف مساله، یافتن ساختار بهینه  $\chi^*$  در بین تمام قالب های ممکن  $\chi$  از طریق نصب یا عدم نصب ادوات جدید است به طوری که تمام اهداف، بهینه شده و قیود عمل کردی، بار و کنترلی برآورده شوند. رابطه (۹) بیان ریاضی برای این مساله را ارائه کرده است:

$$h_f = Q_{0f} V_f^{q_f} + Q_{injf} + \sum_{j=1}^n V_f V_j Y_{ff} \sin(\delta_f - \delta_j - \varphi_{ff}) = 0 \quad (19)$$

$$h_t = Q_{0t} V_t^{q_t} + Q_{injt} + \sum_{j=1}^n V_t V_j Y_{tt} \sin(\delta_t - \delta_j - \varphi_{tt}) = 0$$

$$[t, f] \in J_L \quad (20)$$

این قیود مربوط به توازن توان در شین‌هایی است که متعلق به شین‌های بار بوده و توان تزریقی در آنها وجود داشته باشد.  $P_0 V^p$  و  $Q_0 V^q$  نیز مربوط به مدل بار در محل‌های مذکور است و  $p, q \in \{0, 1, 2\}$ . علاوه بر آن قیود حداکثر و حداقل مقادیر TCSC و SVC باید در تعیین حاشیه امنیتی و بارپذیری شبکه به مسأله اعمال شده و در مکانیزم اغتشاش (قسمت شش) مد نظر قرار گیرد:

$$X_{TCSC\ i}^{\min} \leq X_{TCSC\ i} \leq X_{TCSC\ i}^{\max} \quad i = 1, \dots, n_{TCSC} \quad (21)$$

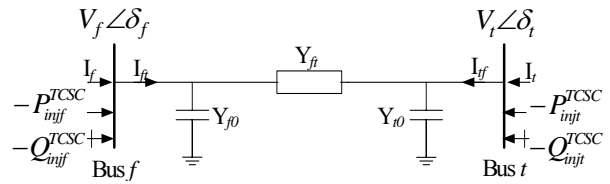
$$B_{SVC\ j}^{\min} \leq B_{SVC\ j} \leq B_{SVC\ j}^{\max} \quad j = 1, \dots, n_{SVC} \quad (22)$$

لازم به ذکر است که مدل TCSC و SVC ارایه شده هنگام محاسبه توابع هدف و تصحیح معادلات پخش بار در حضور ادوات مذکور کاربرد دارند. به خصوص هنگام محاسبه حاشیه امنیتی که روابط آمده در مرجع [۱۲] بر اساس روابط (۱۷) تا (۲۲) و مدل ارایه شده باید اصلاح شوند.

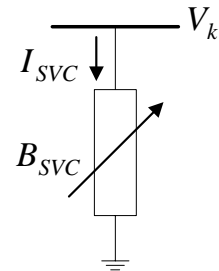
#### ۵- روش برنامه‌ریزی آرمانی

روش برنامه‌ریزی آرمانی [۱۰] یک ابزار قدرتمند برای یافتن بهترین مصالحه در مسایل بهینه‌سازی چند هدفه بوده و وابسته به محدودیت‌های تحدد نیست. در این شیوه یک بردار وزنی  $w$  وابسته به مسیر حرکت به سمت اهداف از پیش تعیین شده به همراه بردار هدف  $y$ ، به منظور بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. برای یافتن بهترین مصالحه بین اهداف متعارض موجود باید مساله ارایه شده در رابطه (۲۳) حل شود:

در این رابطه نیز  $R+jX$  امپدانس خط انتقال،  $X_c$  اندازه  $X_{TCSC}$ ،  $Y_{ff}'' = Y_{tt}'' = G_{ff}'' + jB_{ff}'' = -Y_{ft}''$  و  $\delta_{ff} = \delta_t - \delta_f = -\delta_{ft}$  می‌باشند.



شکل ۱- مدل توان تزریقی TCSC



شکل ۲- مدل سوسپتانس متغیر SVC

با توجه به شکل (۲) جریان کشیده شده توسط SVC عبارت است از:

$$I_{SVC} = jB_{SVC} V_k \quad (15)$$

توان راکتیو کشیده شده توسط SVC و یا همان توان تزریقی به شین  $k$  عبارت است از:

$$Q_{SVC} = Q_k = -B_{SVC} V_k^2 \quad (16)$$

همچنین هنگام استفاده از [۱۲] در تعیین حاشیه امنیتی (قسمت دو)، قیود اضافی ذیل باید رعایت گردند:

$$g_f = P_{0f} V_f^{p_f} + P_{injf} + \sum_{j=1}^n V_f V_j Y_{ff} \cos(\delta_f - \delta_j - \varphi_{ff}) = 0 \quad (17)$$

$$g_t = P_{0t} V_t^{p_t} + P_{injt} + \sum_{j=1}^n V_t V_j Y_{tt} \cos(\delta_t - \delta_j - \varphi_{tt}) = 0 \quad (18)$$

۶- روش بهینه‌سازی

جواب بهینه که بهترین مصالحه بین اهداف متعارض می‌باشد از طریق روش بهینه‌سازی آرمانی متکی به آبکاری فولاد قابل حصول است. روش آبکاری فولاد [۱۴] تکنیکی قدرتمند برای حل مسأله بهینه‌سازی تجربی است. این روش یک الگوریتم تصادفی داشته و قادر است به طور خودکار با احتمال یک به جواب بهینه جامع نزدیک شود. این تکنیک با الگو برداری از روش خنک‌سازی فلز ذوب شده به منظور رسیدن به یک ساختار منظم، شکل گرفته است. شکل (۵) چگونگی عمل‌کرد روش آبکاری فولاد را نشان می‌دهد.

در این فرآیند دما طبق الگوی  $T = \beta * T$  پایین آورده می‌شود. در این الگو  $\beta$  ثابتی کوچکتر ولی نزدیک یک است. مقادیر نامی بین ۰/۸ تا ۰/۹۹ می‌باشد. هنگامی که به دلیل متوقف شدن الگوریتم در مینیمم محلی، میزان پذیرفتن ساختار جدید پایین می‌آید، به منظور عبور از مینیمم محلی برای  $\beta$  مقداری بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود. در غیر این صورت می‌توان  $\beta$  را نزدیک ۰/۸۵ در نظر گرفت. همچنین مقدار دمای اولیه و تعداد حرکت در هر دما را برای سریع‌تر شدن همگرایی می‌توان پایین‌تر انتخاب نمود.

روش حل مسأله بر این اساس است که ابتدا با استفاده از بهینه‌سازی آرمانی، مسأله چند هدفه به یک مسأله بهینه‌سازی تک هدفه تبدیل شده و سپس با به‌کارگیری روش آبکاری فولاد تا نزدیک شدن به جواب بهینه جامع مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در ابتدا به کمک رابطه (۲۳) و به شیوه زیر بیشترین  $\alpha$  تعیین می‌گردد:

$$\alpha = \max_i \frac{f_i(z) - y_i}{w_i} \text{ for all } w_i \neq 0 \quad (25)$$

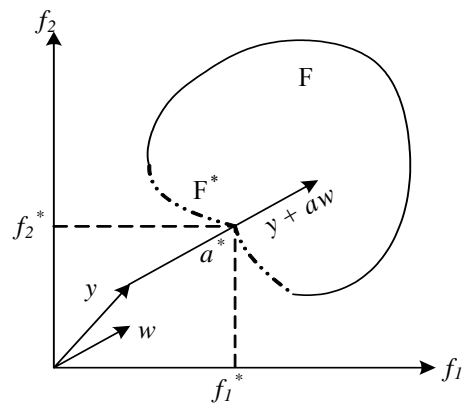
سپس، بیشترین  $\alpha$  حاصله در هر تکرار با انجام تعداد کافی حرکت در هر دما به منظور رسیدن به تعادل، حداقل خواهد شد. با محاسبه  $\Delta\alpha$  که حاصل تفاضل حداکثر  $\alpha$  در مرحله فعلی و ناشی از ساختار جدید بعد از اعمال مکانیزم اغتشاش، با مقدار آن در مرحله قبل می‌باشد، اگر  $\exp\left(\frac{-\Delta\alpha}{T}\right) > P$  عدد تصادفی تولید شده بین صفر و یک) و یا  $\Delta\alpha$  منفی باشد، ساختار فعلی پذیرفته خواهد شد. الگوریتم حل آن قدر ادامه می‌یابد تا زمانی که تغییر چندانی در  $\alpha$  مشاهده نشود.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \alpha \\ & \text{Subject to} \\ & y + \alpha w \geq f(z) \quad w \in \Lambda_\varepsilon, z \in \chi \end{aligned} \quad (23)$$

که در آن  $\alpha$  متغیر اسکالر بدون محدودیت در علامت و  $\chi$  ناحیه جواب‌های ممکن است، همچنین:

$$\Lambda_\varepsilon = \left\{ w \in R^m \text{ s.t. } w_i \geq \varepsilon, \sum_{i=1}^m w_i = 1, \varepsilon \geq 0 \right\} \quad (24)$$

مکانیزی که روش بهینه‌سازی آرمانی بر اساس آن کار می‌کند برای یک حالت دو هدفه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- روش برنامه‌ریزی آرمانی در یک حالت دو هدفه

بردار هدف  $y$  و جهت بردار  $w$  از مقداری که طراح در تصمیم‌گیری خود به آن اختصاص می‌دهد، به دست می‌آیند. با به دست آمدن بردار  $y$  و  $w$  جهت  $y + \alpha w$  قابل حصول است. در این صورت رابطه (۲۳) معادل پیدا کردن نقطه قابل قبول روی این بردار در فضای هدف است به گونه‌ای که نزدیک‌ترین نقطه به مبدأ باشد. بدیهی است که جواب بهینه رابطه (۲۳) نقطه‌ای خواهد بود که در آن بردار  $y + \alpha w$  ناحیه پاسخ  $F^*$  در فضای هدف  $F$  را قطع می‌کند. به عبارت دیگر، بیشترین انحراف از مقادیر هدف مورد نظر طراح با میزان اهمیتی که هر هدف دارد (و در بردار  $w$  در نظر گرفته می‌شود) محاسبه شده و به متغیر  $\alpha$  تخصیص داده می‌شود. سپس این متغیر با تعیین ساختار بهینه نصب TCSC و SVC توسط یک روش بهینه‌سازی هوشمند (آبکاری فولاد) حداقل می‌گردد. شکل (۴) چگونگی استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی را نشان می‌دهد.

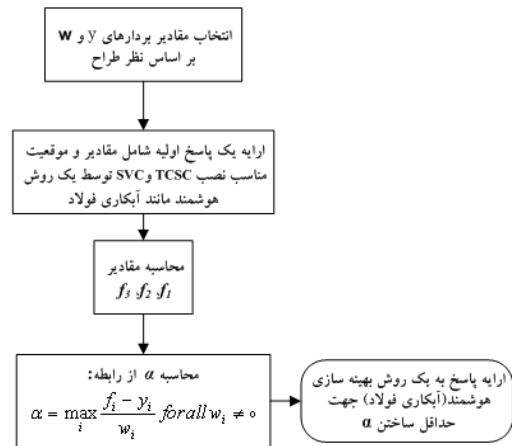
مورد نیاز به صورت  $y = [0.9, 0.9, 0]$  و بردار  $w$  به صورت  $w = [0.3, 0.3, 0.4]$  برای مکان‌یابی در نظر گرفته می‌شوند. نتایج مکان‌یابی در جداول (۲) و (۳) ملاحظه می‌شوند. شکل‌های (۷) الی (۱۰) به ترتیب مسیر همگرایی  $\alpha$  و توابع هدف را با کاهش دما نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسیر همگرایی زیگزاگ مبین این حقیقت است که روش آبکاری فولاد قابلیت گریز از مینیمم‌های محلی به سمت مینیمم مطلق را خواهد داشت.

از شکل (۹) مشخص است که به رغم وجود جواب بهتر برای تابع هدف بارپذیری و حاشیه امنیتی شبکه، فرآیند بهینه‌سازی برای دستیابی به کاهش همزمان تمامی اهداف چنین جوابی را نپذیرفته است.

لازم به ذکر است که تعداد ادوات به صورت بهینه و توسط روش بهینه‌سازی ارایه شده تعیین می‌گردد. جدول (۲) تعداد بهینه عناصر مورد نیاز را ۷ عدد TCSC و ۴ عدد SVC تعیین کرده است. حداقل‌سازی مستقل تابع هدف  $f_1$  که هزینه سرمایه‌گذاری ادوات را شامل شده است (طی یک بهینه‌سازی چند هدفی) باعث می‌شود تعداد بهینه به گونه‌ای تعیین گردد که علاوه بر جلوگیری از ازدیاد هزینه سرمایه‌گذاری (با کاهش درصد جبران‌ساز مورد نیاز و تعداد جبران‌ساز مورد نیاز)، هزینه عمل‌کرد سیستم نیز کاهش یابد.

در اینجا باید تاکید شود که روش آبکاری فولاد روشی وقت‌گیر می‌باشد اما به دلیل این که در تعیین مکان بهینه ادوات FACTS برای آینده سیستم، یافتن جواب بهینه و کاهش مناسب اهداف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، این مسأله مشکل‌ساز نخواهد بود. از جدول (۳) مشخص است که پس از مکان‌یابی و استفاده از ادوات FACTS، هزینه خرید ادوات از محل کاهش هزینه عمل‌کرد سیستم (۱۴/۵۱) کاهش تلفات و ۱/۷۴ کاهش توان نیروگاه‌ها در ماکزیمم بار، برگشت داده شده و علاوه بر آن ۵/۶۵ درصد نیز صرفه‌جویی اضافی در هزینه عمل‌کرد سیستم ایجاد شده است. این در حالی است که بارپذیری و پروفیل ولتاژ سیستم نیز بهبود یافته‌اند.

مقایسه نتایج حاصل شده با آنچه در [۲، ۳، ۵ و ۶] به دست آمده مشخص می‌کند که اولاً به منظور انجام مطالعات جامع‌تر مکان‌یابی ادوات FACTS، تامین همزمان اهداف بیشتر، میسر است. ثانیاً جایابی هر تعداد ممکن از ادوات FACTS برای دستیابی به حداکثر بهبود در بارپذیری شبکه [۶] کاربردی نبوده و امکان محدود کردن تعداد ادوات بر اساس ملاحظات اقتصادی وجود دارد.



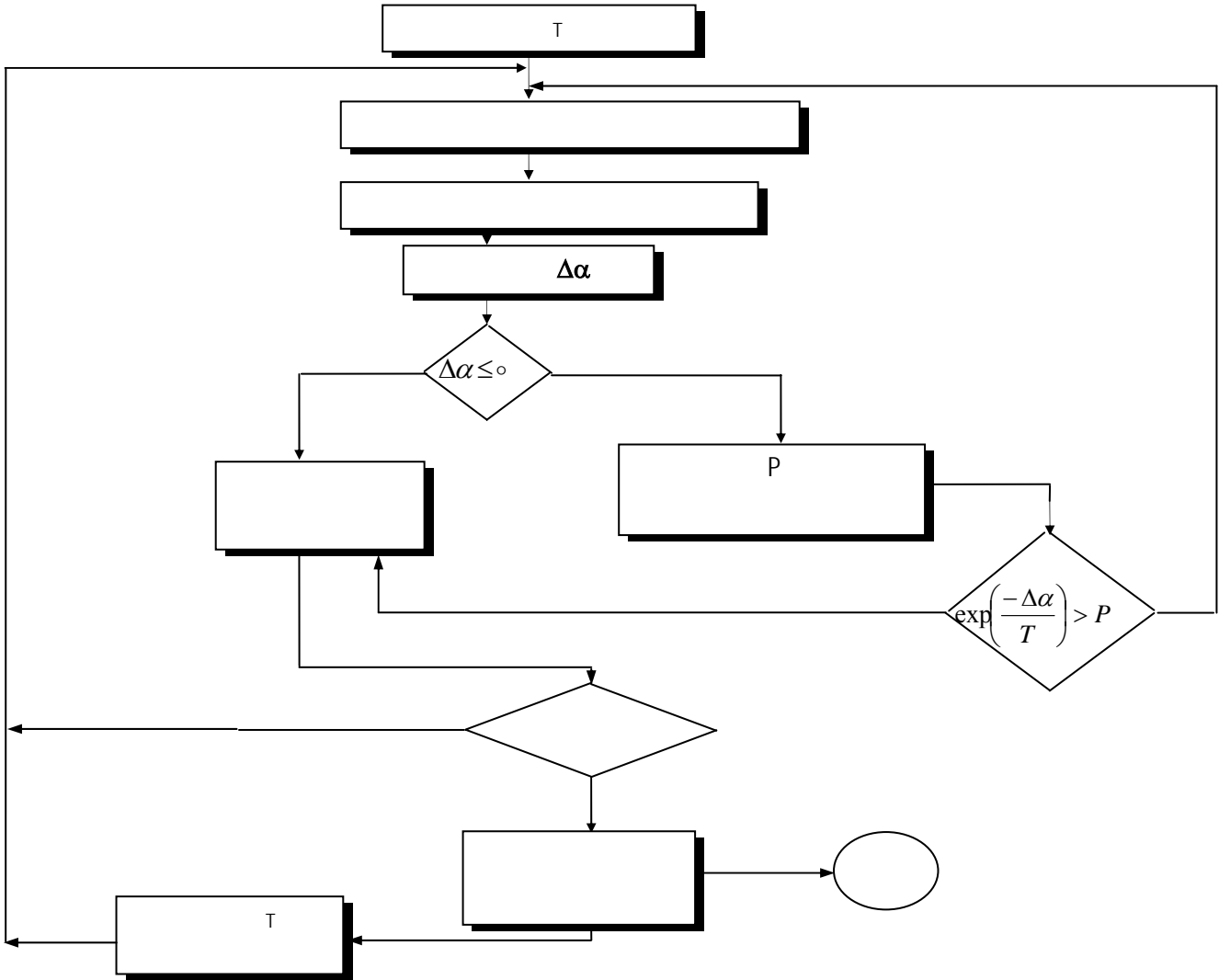
شکل ۴- چگونگی استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی

## ۷- بررسی نتایج

به منظور بررسی عمل‌کرد الگوریتم ترکیبی، شبیه‌سازی بر روی شبکه IEEE با ۱۴ شین انجام و نتایج مطلوب حاصل شده است. در شکل (۶) دیاگرام تک خطی سیستم ارایه گردیده است. اطلاعات خطوط و ترانسفورماتورها، ژنراتور و کندانسورهای سنکرون، بار ماکزیمم شبکه و جبران‌سازهای اولیه در [۱۵] آمده است. جدول (۱) اطلاعات مورد نیاز جهت مطالعات اقتصادی را در اختیار قرار می‌دهد.

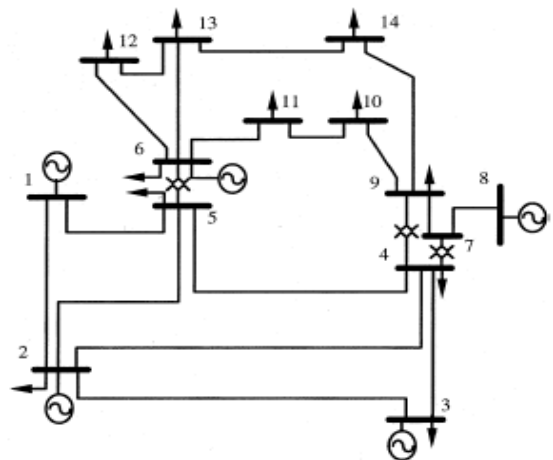
در این جدول جهت کاربردی‌تر شدن مطالعات، سه سطح بار و مدت آن‌ها جهت محاسبات تلفات و انحراف ولتاژ در سال مورد نظر برای مکان‌یابی، در نظر گرفته شده است. محدودیت تپ تمامی ترانس‌ها بین ۰/۹ تا ۱/۱ در نظر گرفته می‌شود تا در هر مرحله از محاسبات حاشیه امنیتی، بیشترین مقدار ممکن آن با تغییر تپ و سایر قیود (از جمله توان نامی خطوط) به عنوان حداکثر حاشیه امنیتی تعیین گردد و هر بهبودی بیش از آن با ادوات FACTS صورت پذیرد. توان نامی خطوط در شبکه مورد مطالعه از [۱۶] اخذ شده‌اند.

در این مطالعه، کلیه خطوط (غیر از ترانسفورماتورها) به عنوان کاندیدای نصب TCSC و کلیه شین‌های بار (غیر از شین ۷) به‌عنوان کاندیدای نصب SVC در نظر گرفته شده‌اند. محدودیت راکتانس TCSC بر اساس هفتاد درصد جبران راکتانس خط محل نصب در مود خازنی تا بیست درصد افزایش آن در مود سلفی در نظر گرفته شده است. همچنین با احتساب ولتاژ محل نصب یک پروینیت برای SVC، سوسپتانس آن بین منفی یک تا یک پروینیت بر اساس قدرت پایه ۱۰۰MVA در نظر گرفته شده است. به عنوان مقادیر اولیه، اهداف



شکل ۵- الگوریتم روش آبکاری فولاد

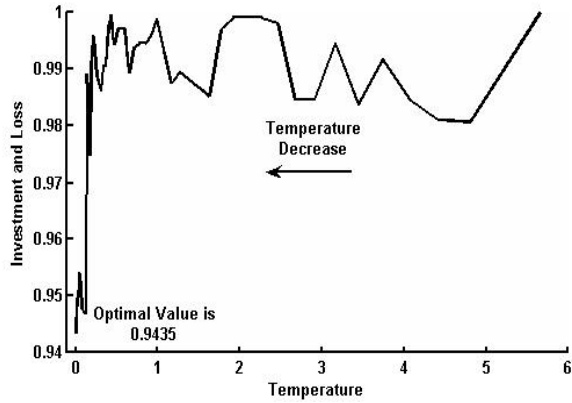
۰/۸۱ ، ۲۱۳۶ ساعت	ضریب و مدت سطح بار ۱
۱ ، ۲۸۳۲ ساعت	ضریب و مدت سطح بار ۲
۰/۹ ، ۴۳۹۲ ساعت	ضریب و مدت سطح بار ۳
٪۱۵	نرخ بهره
۰/۱	Ke (\$/kWh)
۱۵۰	هزینه احداث نیروگاه (\$/kW)
۳۰ سال	طول عمر ادوات FACTS و نیروگاه



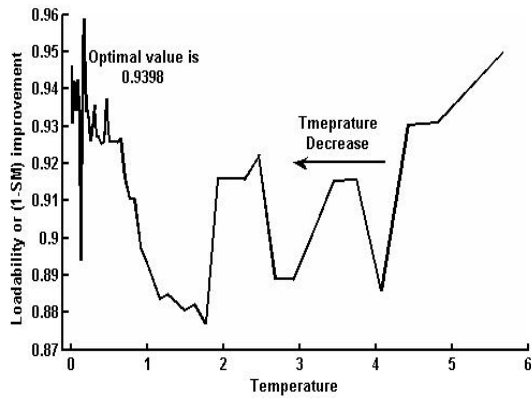
شکل ۶- شبکه ۱۴ شینه IEEE

جدول ۱- اطلاعات مورد نیاز جهت مطالعات اقتصادی

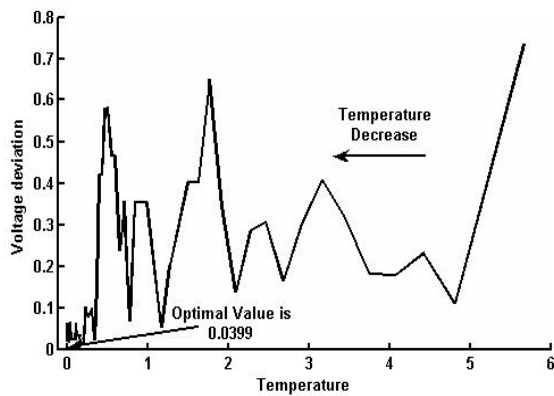




شکل ۸- مسیر همگرایی تابع هدف هزینه



شکل ۹- مسیر همگرایی تابع هدف حاشیه امنیتی و بار پذیری



شکل ۱۰- مسیر همگرایی تابع هدف ولتاژ

### ۸- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای تعیین مقدار و موقعیت بهینه TCSC و SVC بر اساس تابع هدف چند منظوره، ارائه شد. در این روش با ماهیت مسأله مکان‌یابی آن چنان که هست رفتار

جدول ۲- مقدار و موقعیت TCSC و SVC

سوسپتانس SVC بر حسب pu	درصد جبران خط توسط TCSC	مکان SVC	مکان TCSC	
		شماره شین	شین انتها	شین ابتدا
۰/۰۴۶۹	-۲۵/۴	۴	۵	۱
۰/۱۴۰۶	-۳/۴۲	۱۰	۵	۴
۰/۰۹۳۶	۳/۴۴	۱۳	۱۱	۶
۰/۰۴۶۹	-۴۳/۵۲	۱۴	۱۲	۶
-	۲/۹	-	۱۰	۹
-	۲/۴۴	-	۱۳	۱۲
-	۵/۰۵	-	۱۴	۱۳

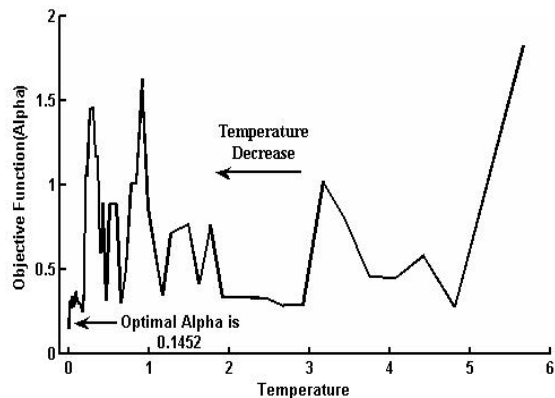
TCSC: منفی - خازنی، منفی - سلفی

SVC: مثبت - سلفی مثبت - خازنی

جدول ۳- نتیجه استفاده از TCSC و SVC در شبکه نمونه IEEE بر اساس مقدار و موقعیت بهینه ارائه شده در جدول (۲)

درصد کاهش	بعد از استفاده	مقادیر هدف	قبل از استفاده
۱۴/۵۱	۰/۶۹۱۲	—	۰/۸۰۸۶
۱/۷۴	۳/۷۵۴۸	—	۳/۸۲۱۲
۵/۶۵	۰/۹۴۳۵	۰/۹	۱
۱/۰۴	۰/۹۳۹۸	۰/۹	۰/۹۴۹۷
۹۴/۵۶	۰/۰۳۹۹	۰	۰/۷۳۳۶
—	۰/۱۴۵۲	—	۱/۸۳۴

$w = [0.3, 0.3, 0.4]$  \* مینا ۱۰۰ MVA، \*\* مینا ۳۲/۱۶۷ میلیون دلار



شکل ۷- مسیر همگرایی  $\alpha$

- [6] S. Gerbex and R. Cherkaoui, "Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms," IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, pp. 537 – 544, 2001.
- [7] J. Rodriguez, "Optimal location of SVC based on systems loadability and contingency analysis," IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Barcelona, pp. 1193 – 1199, 1999.
- [8] S. N. Singh and A. K. David, "Congestion management by optimal FACTS device location," IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, London, pp. 23 – 28, 2000.
- [9] W. Ongsakul and P. Bhasaputra, "Optimal power flow with FACTS devices by hybrid TS/SA approach," Electrical Power and Energy Systems, vol. 24, pp. 851-857, 2002.
- [10] Y. L. Chen and C. C. Liu, "Multi-objective var planning using the goal-attainment method," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 141, pp. 227–232, 1994.
- [11] L. J. Cai and I. Erlich, "Optimal choice and allocation of FACTS devices in deregulated electricity market using genetic algorithms," IEEE Power Systems Conference and Exposition, New York, pp. 201 – 207, 2004.
- [12] O. O. Obadina and G. J. Berg, "Determination of voltage stability limit in multimachine power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, pp. 1545 – 1554, 1988.
- [13] P. P. Narayana and M. A. Abdel Moamen, "Power flow control and solutions with multiple and multi-type FACTS devices," Electric Power Systems Research, vol. 74, pp. 341-351, 2005.
- [14] P. J. M. Van Laarhoven and E. H. L. Aart., "Simulated Annealing: Theory and Applications," Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [15] L. L. Ferris and A. M. Sasson, "Investigation of the load flow problem," Proc. IEE, vol. 115, 1968.
- [16] R. S. Fang and A. K. David, "Optimal dispatch under transmission contracts," IEEE. Trans. Power Syst., vol. 14, pp. 732 – 737, 1999.

می‌شود و بر خلاف روش‌های قبلی، تابع هدف هزینه در کنار سایر اهداف به منظور رسیدن به پاسخی دقیق‌تر، در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن با استفاده از روش بهینه‌سازی آرمانی، در صورتی که فضای اهداف غیر محدب باشد، کماکان امکان برقراری بهترین مصالحه بین اهداف وجود دارد. بر اساس نتایج حاصل شده، استفاده از ترکیب روش آبکاری فولاد با روش بهینه‌سازی آرمانی باعث تامین همزمان اهداف مکان‌یابی یعنی: کاهش تلفات سیستم و هزینه سرمایه‌گذاری ادوات جدید FACTS، افزایش حاشیه امنیتی سیستم، افزایش بارپذیری شبکه و کاهش انحراف ولتاژ، شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هزینه خرید ادوات جدید در سال مورد مطالعه برگشت داده شده و ۵/۶۵ درصد نیز صرفه‌جویی مازاد وجود داشته است. علاوه بر آن کاهش هزینه توان پیک در این مطالعه به منزله به تعویق انداختن توسعه واحدهای نیروگاهی موجود برای تامین بار شبکه می‌باشد.

به‌کارگیری روش آبکاری فولاد در این مقاله باعث شده است که فرآیند بهینه‌سازی با شروع از یک دمای اولیه و طی مسیر همگرایی زیگزاگ، از مینیمم‌های محلی عبور کرده و به پاسخ بهینه جامع نزدیک شود.

#### مراجع

- [1] Y. Lu and A. Abur, "Static security enhancement via optimal utilization of Thyristor Controlled Series Capacitors," IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, pp. 324 – 329, 2002.
- [2] N. K. Sharma, "A novel placement strategy for FACTS controllers," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, pp. 982 - 987, 2003.
- [3] N. Yorino and E. E. EL-Araby, "A new formulation for FACTS allocation for security enhancement against voltage collapse," IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, pp. 3-10, 2003.
- [4] C. S. Chang and J. S. Huang, "Optimal multi-objective SVC planning for voltage stability enhancement," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 145, pp. 203 – 209, 1998.
- [5] S. H. Song, "Installation and operation of FACTS devices for enhancing steady-state security," Electric Power Systems Research, vol. 70, pp. 7-15, 2004.