برنامه‌ریزی توان راکتیو در شبکه‌های قدرت با استفاده از روش مبتنی بر الگوریتم بازپخت تطبیقی فلزات*

رضا قاضی (۱) عبدالرسول احمدی‌بنی (۲)

چکیده در این مقاله برای حل مساله برنامه‌ریزی توان راکتیو شبکه قدرت در حالت کار عادی و شرایط اضطراری آن، از یک شیوه جدید بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بازپخت تطبیقی فلزات استفاده شده است. در حل مساله برنامه‌ریزی توان راکتیو، از مدل واقعی سیستم قدرت که یک سیستم غیرخطی است، استفاده گردیده است. در این روش نیازی به محاسبه مشتقات تابع هدف نیست بلکه مستقیماً از مقدار واقعی تابع هدف در بهینه‌سازی استفاده می‌شود. ملاحظات مربوط به پیشامدهای احتمالی در شبکه قدرت با استفاده از یک دیدگاه تصحیح‌کننده در برنامه‌ریزی توان راکتیو در نظر گرفته شده است. این روش به دو سیستم ۱۴ و ۳۰ باس IEEE اعمال شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از شبکه ۳۰ باس با نتایج یکی از مقالات منتشر شده در این موضوع نشان می‌دهد که نتایج این مقاله بهتر است.

واژه‌های کلیدی برنامه‌ریزی توان راکتیو، الگوریتم بازپخت فلزات، پخش‌بار به روش FDLF، پیشامدهای احتمالی.

Reactive Power Planning in Electric Power Systems Using Adaptive Simulated Annealing

R. Ghazi R. Ahmadi Bani

Abstract *In this paper a new optimization approach based on adaptive simulated annealing (ASA) is used for solving the reactive power planning in electric power system in normal and contingency conditions. For studying the VAr planning problem a real model of power system which is a nonlinear system is considered. In this approach the real value of the objective function is used in optimization process, so there is no need to calculate the derivatives of the objective function. In order to solve the above problem many buses are considered by their weakness from steady state voltage stability viewpoint. The type and optimum size of these sources are determined using an iterative approach. The proposed algorithm is applied to the IEEE 14-bus and 30-bus test systems. In order to show the effectiveness of the proposed method the simulation results are compared with the results of a relevant published paper in this subject.*

Key Words Reactive Power Planning, Simulated Annealing, Fast Decoupled Load Flow, Contingency.

---

* - نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۰/۵/۲۱ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۱/۳/۳۰ به دفتر نشریه رسیده است.

۱ - دانشیار گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲ - گروه برق، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

مساله، برنامه‌ریزی توان راکتیو به تصمیم‌گیری برای تعیین محل، نوع، اندازه و زمانهای نصب منابع توان راکتیو برمی‌گردد که عملکرد رضایت‌بخش یک سیستم و بخصوص سطوح ولتاژ کافی در سرتاسر سیستم را با کمترین هزینه تضمین می‌کند. کاهش تلفات انتقال به همراه ملاحظه امنیت و مناسبت سیستم نیز جوانبی هستند که ممکن است در بیان مساله مورد بحث قرارگیرند. در نهایت با تنظیم منابع توان راکتیو نصب شده جدید به همراه منابع و سایر کنترلرهای موجود در شبکه، اعم از ولتاژ ژنراتورها و تپ ترانسها، چندین هدف پیش‌بینی شده شامل هزینه نصب و خریداری منابع VAr جدید و کاهش تلفات انتقال بعلاوه محدودیتهای بار و نیز، محدودیتهای عملکرد شبکه تحت شرایط طبیعی و همچنین شرایط ناشی از پیشامدهای احتمالی، باید برآورده شوند.

در طول سه دهه گذشته علاقه روبه رشدی در شرکتهای برق برای برنامه‌ریزی توان راکتیو پدید آمده است[1-8]. پژوهشگران مختلف با تعریف مساله و ارائه راه‌حلهایی، به این مساله پیچیده قدرت پرداخته‌اند. بطور کلی روشهایی که برای حل این مساله بکار رفته‌اند را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد. روشهای کلاسیک، روشهای ابتکاری، و روشهای هوشمند که بر پدیده‌های طبیعی مبتنی می‌باشند.

بیشتر روشهای کلاسیک بر مدل خطی سیستم قدرت مبتنی می‌باشند و همه آنها در زمره الگوریتم‌های برنامه‌ریزی خطی قرار دارند که بر استفاده از تقریب‌های خطی در حل مساله بهینه‌سازی مبتنی می‌باشند. از جمله این روشها می‌توان روش آزمون و خطا، روش برنامه‌ریزی خطی، روش برنامه‌ریزی پویا، و روش برنامه‌ریزی با اعداد صحیح را نام برد.

روشهای دیگری نیز برای حل مساله VAr ارائه شده‌اند که برپایه اصول ریاضی استوار نمی‌باشند چراکه برای آنها اثبات ریاضی وجود ندارد. این روشها براساس ابتکاراتی استوارند که پژوهشگر با کمک برخی امکانات سخت‌افزاری یا نرم‌افزاری و نیز، قوانین پیشنهادی برای حل مساله استفاده می‌کند، مانند روشی که هانگ با استفاده از یک سیستم خبره برای حل مساله استفاده کرد[1] و یا روشی که با استفاده از جستجوی باینری توسط گارسیا ارائه شد[7].

بیشتر روشهای کلاسیک موجود در سیستم قدرت از جمله پخش بار بهینه و برنامه‌ریزی بار راکتیو دارای مشکلات زیر هستند: اولاً این روشها در پاسخ بهینه محلی می‌افتند. چون این مساله به لحاظ ریاضی یک مساله محدب (کوژ) نمی‌باشد لذا پاسخ آن به بهینه جامع منجر نمی‌شود. ثانیاً این روشها با متغیرهای گسسته نمی‌توانند براحتی برخورد کنند و این در حالی است که بیشتر متغیرهای کنترلی در این مساله باید مقدار صحیح داشته باشند.

برای رفع دو مشکل یاد شده و بخصوص رفع مشکل اول، از روشهایی که برپایه پدیده‌های طبیعی استوارند استفاده می‌شود. از جمله این روشها می‌توان الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم بازپخت فلزات (SA) را نام برد. الگوریتم ژنتیک یکی از روشهای قدرتمند برای حل مساله بهینه‌سازی است. ایبا در سال ۱۹۹۴ این روش را برای حل برنامه‌ریزی VAr بکار برد [6]. روش SA یکی دیگر از روشهای جستجوی سراسری است که اگر در پیاده‌سازی آن از تصمیمات مناسب استفاده شود براحتی به پاسخ بهینه جامع خواهد رسید. این روش اولین بار در سال ۱۹۹۳ برای حل برنامه‌ریزی VAr بکار گرفته شد[2]. ویژگی متمایز این روش نسبت به دیگر روشهای مرسوم در حل مساله برنامه‌ریزی VAr، استفاده از یک

مدل کاملاً واقعی سیستم قدرت می‌باشد. در سال ۱۹۹۴ این روش برای حل مساله برنامه‌ریزی VAr با چند تابع هدف بکار گرفته شد[5]. افراد دیگری نیز با فرمول‌بندی جدید برای مساله برنامه‌ریزی VAr بوسیله روش SA این مساله را حل کرده‌اند [3,4,8]. اشکالی که به این مقالات وارد است این است که از منابع و جبران‌سازهای توان راکتیو موجود مانند تپ ترانسها و توان راکتیو ژنراتورها در برنامه‌ریزی VAr استفاده نکرده‌اند و فقط از منابع جدید در برنامه‌ریزی بهره برده‌اند در صورتی که لازم است قبل از نصب هر منبع جدید ابتدا از منابع موجود استفاده شود. افزون بر این، مقالات یاد شده از یک طرح مناسب در الگوریتم SA استفاده نکرده‌اند بلکه تمام آنها از الگوریتم ساده SA استفاده نموده‌اند، باید توجه داشت که در این روش کیفیت پاسخ به طرح بکار رفته در الگوریتم بستگی دارد. این مقاله با در نظر گرفتن منابع موجود در شبکه و با استفاده از یک طرح جدید در الگوریتم SA به حل مسأله برنامه‌ریزی VAr پرداخته است.

بهینه‌سازی با روش مبتنی بر الگوریتم بازپخت تطبیقی فلزات (ASA)

در مسائل بهینه‌سازی زمانی که تابع هدف دارای نقاط بهینه زیادی باشد (در توابع غیرخطی، ناپیوسته و تصادفی)، رسیدن به پاسخ بهینه مطلق با روشهای جستجوی آزمند یعنی روشهایی که معیار پذیرش نقاط جدید در فرآیند بهینه‌سازی بهبود تابع هدف می‌باشد مانند روشهای گرادیانی، غیرممکن است. بنابراین در این مواقع و بخصوص زمانی که رسیدن به پاسخ بهینه جامع حالت ایده‌آل می‌باشد، باید از روشهای جستجوی سراسری مانند الگوریتم‌های ژنتیکی (GA) و الگوریتم بازپخت فلزات (SA) استفاده شود. در این مقاله معیار بهینه‌سازی کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه قدرت در مساله برنامه‌ریزی VAr می‌باشد و از یک الگوریتم بهبود یافته جدید برای رسیدن به کمترین هزینه استفاده می‌شود.

الگوریتم SA برگرفته از فرآیند فیزیکی سردکردن تدریجی فلزات به منظور استحکام بخشیدن به ساختار آنهاست. در این روش ابتدا فلز ذوب می‌شود سپس دمای مذاب بتدریج کم می‌شود تا جامد دارای ساختاری با کمترین انرژی گردد. نرخ کاهش دمای مذاب بر ساختار جامد حاصله بسیار اثرگذار است. الگوریتم SA برای خروج از بهینه‌های محلی همیشه به دنبال بهبود تابع هدف نیست بلکه علیرغم روشهای جستجوی محلی گاهی اوقات نقاط یا حالتهایی را که باعث تخریب تابع هدف می‌شود نیز می‌پذیرد. در این الگوریتم با استفاده از حالت (پاسخ) معین i، پاسخ جدید j بطور تصادفی تولید می‌شود. با فرض $\Delta C_{ij}=C(j)-C(i)$ بعنوان تغییر در مقدار تابع هدف، احتمال اینکه ترکیب j از میان دنباله ترکیبهای تولید شده پذیرفته شود، طبق معیار متروپلیس (که معیار پذیرش این الگوریتم است) برابر یک می‌باشد اگر $\Delta C_{ij}\leq 0$ باشد، در غیر این صورت اگر $\exp(\frac{\Delta C_{ij}}{T})>\text{rand}[0,1]$ باشد آنگاه با احتمال یک ترکیب جدید پذیرفته خواهد شد. در رابطه فوق T یک پارامتر کنترلی است که معادل دما در فرآیند سرد کردن فلزات می‌باشد. rand[۰,۱] مقدار تصادفی در بازه [۰,۱] می‌باشد. به همین ترتیب، با تولید تصادفی نقاط جدید در دمای T و آزمایش معیار پذیرش، الگوریتم به سمت پاسخ بهینه نزدیک می‌شود. سپس با کاهش مرحله به مرحلهٔ دمای T و تولید نقاط دیگر در این دما و آزمایش معیار پذیرش، در نهایت، الگوریتم به پاسخ بهینه جامع خواهد رسید.

پیاده‌سازی الگوریتم SA براحتی انجام می‌گیرد ولی باید تصمیمات مناسبی برای اجرای الگوریتم اتخاذ نمود.

یکی از این تصمیمات طرح کاهش دما در الگوریتم است. مقالاتی که از الگوریتم SA استاندارد در برنامه‌ریزی VAr بهره گرفته‌اند، از یک طرح ساده برای کاهش دما استفاده کرده‌اند [2,3,4,5,8]. در این مقاله از یک طرح تطبیقی برای کاهش پارامتر کنترل T استفاده شده است [10,12]. برنامه بازپخت (کاهش دما) در الگوریتم بازپخت تطبیقی فلزات (ASA) به‌صورت زیر است :

$$T_i(k) = T_{\circ i} \exp(-c_i k^{1/D}) \qquad (۱)$$

که در آن اندیس i معرف متغیر i ام و k معرف مرحله کاهش دما در طول الگوریتم است، $T_i(k)$ دما در مرحله kام الگوریتم است، $T_{\circ i}$ دمای اولیه می‌باشد و D بعد فضای حالت مساله است. می‌توان c_i را طوری کنترل کرد که وقتی در آخرین مرحله یعنی k_f (=exp(n_i)) باشد آنگاه:

$$T_{fi} = T_{\circ i} \exp(-m_i)$$

$$c_i = m_i \exp(-n_i/D) \qquad (۲)$$

که m_i و n_i پارامترهای دلخواهی هستند. این ویژگی m_i و n_i باعث می‌شود که بتوان الگوریتم را برای مسائل مشخص تنظیم کرد.

بازپخت مجدد . الگوریتم پیشنهادی در طول فرآیند جستجو حساسیت به تغییر متغیرهای مختلف x^i را بررسی می‌نماید و در هر زمان بازپخت معین k محدوده‌ای که در آن پارامترهای نسبتاً غیرحساس جستجو می‌شوند نسبت به محدوده‌ای که پارامترهای حساستر جستجو می‌شوند، بزرگتر انتخاب می‌شود. این کار با مقیاس‌بندی مجدد زمان بازپخت k نتیجه‌بخش می‌باشد و بطور پریودیک در هر صد نتیجه پذیرش یا بیشتر، بر حسب حساسیتهای s_i که در بیشترین مقدار کمینه فعلی تابع هدف، L، محاسبه می‌شوند، انجام می‌گیرد. یعنی :

$$s_i = \partial L/\partial x^i \qquad (۳)$$

به این کار اصطلاحاً بازپخت مجدد گفته می‌شود. برحسب بزرگترین مقدار حساسیتها، s^i، بازپخت مجدد با استفاده از یک مقیاس‌بندی خطی جدید برای هر i_i نتیجه‌بخش می‌باشد. یعنی

$$k_i \rightarrow k'_i ,$$

$$T_{ik} = T_{ik}(s_{max}/s_i) ,$$

$$k'_i \left(\ln(T_{i\circ}/T_{ik})/c_i \right)^D \qquad (۴)$$

$T_{i\circ}$ در شروع جستجو نزدیک مقدار واحد است.

مزایای الگوریتم ASA نسبت به روشهای کلاسیک عبارتند از: مقاوم بودن روش نسبت به نقطه اولیه، قابل استفاده بودن الگوریتم در بازه وسیعی از مسائل شامل مسائل غیرخطی، ناپیوسته، غیرمحدب و همچنین، مسائلی که دارای شرایط مرزی و قیود کاملاً اختیاری هستند، الگوریتم به محاسبات پیچیده ریاضی برای تعیین مشتقات تابع هدف نیاز ندارد، در حل مسائل ترکیبی شامل متغیرهای پیوسته و گسسته بسیار توانمند است. در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های SA دارای سرعت بیشتری است و مطمئناً به پاسخ بهینه جامع خواهد رسید.

فرمولبندی مساله

هدف از این مقاله اعمال روش جدید بهینه‌سازی (ASA) به مساله برنامه‌ریزی VAr می‌باشد. همچنین، ملاحظه منابع و جبرانسازهای موجود توان راکتیو شبکه در مساله برنامه‌ریزی بوسیله این روش مدنظر مقاله می‌باشد. بنابراین، از تابع هدف مرسومی که در بیشتر مقالات استفاده می‌شود در این مقاله افتفاده خواهد شد. تابع هدف شامل دو بخش است. بخش اول عبارت است از هزینه جاگذاری منابع جدیدی شامل هزینه خریداری و هزینه ثابت نصب منابع که به‌صورت زیر است :

$$C_v = \sum_{i \in \Omega_c} (d_i + s_{ci} q_{ci} + s_{ri} q_{ri} \qquad (۵)$$

Ω_c مجموع تمام باسهای نامزد برای نصب منابع VAr است، q_{ci} و q_{ri}، به‌ترتیب، منابع خازنی و سلفی نصب شده در باس i می‌باشند. s_{ci} و s_{ri} هزینه‌های واحد منبع خازنی و سلفی هستند.

بخش دوم تابع هدف مساله شامل هزینه تلفات انرژی شبکه می‌باشد که به‌صورت زیر است :

$$K_e = \sum_{j=1}^{n_t} T_j P_{loss,j} \qquad (۶)$$

در این رابطه K_e هزینه به ازای واحد انرژی، T_j دوره زمانی سطح بار j، n_t تعداد سطوح بار مختلف و $P_{loss,j}$ تلفات توان متناظر با سطح بار j است.

در یک عبارت کلی تابع هدف مساله به‌صورت زیر است :

$$F = C_v + K_e \sum_{j=1}^{n_t} T_j P_{loss,j} \qquad (۷)$$

این تابع هدف یک تابع کاملاً واقعی و غیرخطی است و بخاطر مدلی که برای هزینه نصب منابع بکار رفته است تابعی ناپیوسته می‌باشد.

متغیرهای کنترلی مساله عبارتند از :

۱- توان راکتیو ژنراتورها (Q_g) یا اندازه ولتاژ آنها (V_g) که تغییرات پیوسته دارند و از متغیرهای پیوسته مساله هستند.

۲- تپ ترانسفورمرهای مجهز به تغییردهنده انشعاب زیر بار (TCUL) : تغییرات آنها پله‌ای می‌باشد و جزء متغیرهای گسسته یا صحیح مساله هستند. در این مقاله مطابق [6] تغییرات تپ ترانس با پله‌های ۰/۰۱PU در نظر گرفته شده است.

۳- توان اکتیو ژنراتورها (P_g) در تمام باسها بجز باس اسلک؛ این توانها در طول فرآیند بهینه‌سازی ثابت می‌باشند.

۴- منابع توان راکتیو موجود در شبکه بطور معمول؛ از نوع استاتیک می‌باشند.

۵- منابع جدید توان راکتیو که وارد شبکه قدرت می‌شوند. این متغیرها نیز از نوع متغیرهای گسسته مساله می‌باشند.

با توجه به متغیرهای یادشده مساله برنامه‌ریزی یک مساله بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد که روش ASA قادر است این گونه مسائل را براحتی حل کند.

متغیرهای وابسته مساله عبارتند از : اندازه ولتاژ باسهای PQ، اندازه زاویه ولتاژ تمام باسهای شبکه بجز باس اسلک و توان راکتیو تولیدی باس اسلک.

در مساله برنامه‌ریزی VAr سه دسته قید وجود دارد که عبارتند از :

۱- معادلات پخش بار که این قیود بوسیله پخش بار نیوتن - رافسون مبتنی بر جداسازی اثرات توان اکتیو و راکتیو (FDLF) آزمایش می‌شوند.

۲- قیود بهره‌برداری که به ظرفیت فیزیکی تجهیزات مربوط می‌گردد، شامل: محدودیت تولید توان راکتیو ژنراتورها، محدوده تغییرات اندازه ولتاژ باسها، محدوده تغییرات تپ ترانسها و محدودیت انتقال توان از خطوط انتقال.

۳- قیود مربوط به محدوده مجاز نصب منابع جدید VAr در یک باس.

الگوریتم حل مساله

در این بخش مراحل مختلف الگوریتم حل مساله برنامه‌ریزی VAr به منظور جایابی مناسب منابع جدیدی راکتیو، تعیین نوع و اندازه این منابع و تنظیم کنترل کننده‌های موجود توان راکتیو در شبکه ارائه خواهد شد. در ادامه مراحل الگوریتم در دو بخش بیان می‌شود.

بخش اول. مرحله ۱- دریافت اطلاعات مربوط به باسها و خطوط انتقال شبکه مورد مطالعه؛ مرحله ۲- تعیین باسهای نامزد برای نصب منابع جدید راکتیو

بخش دوم. مرحله ۱- دریافت اطلاعات و پارامترهای کنترلی؛ این اطلاعات شامل اطلاعات مربوط به پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی ASA می‌باشد که شامل دمای اولیه، عدد تصادفی اولیه، برنامه کاهش دما و ... است. اندازه پله‌های تغییرات پارامترهای کنترلی گسسته مثل تپ ترانسها و منابع جدید VAr و اطلاعات شبکه نیز باید در این مرحله مشخص گردد.

مرحله ۲- تعیین حالت (ترکیب) اولیه قابل قبول.

الف- تولید یک حالت جدید با استفاده از مکانیزم اغتشاش.

ب - برای حالت جدیدتولیدشده محاسبات پخش بار انجام می‌شود و قیود مساله برنامه‌ریزی آزمایش می‌شوند، اگر قیدی برآورده نشود یا پخش بار همگرا نگردد گام الف تکرار می‌گردد و در غیر این‌صورت گام ج انجام می‌شود.

پ - تعیین هزینه کل شبکه قدرت.

مرحله ۳- طرح یک برنامه کاهش دمای تطبیقی جامع براساس الگوریتم ASA

در هر دمای T_k به تعداد n_{max} حرکت انجام می‌شود (به عبارتی تعداد حالتهای تولید شده در هر دنباله متناظر با T_k برابر n_{max} می‌باشد) مراحل ۴ تا ۷ به تعداد n_{max} بار تکرار می‌شود.

مرحله ۴- تولید یک حالت جدید قابل قبول

الف- با استفاده از مکانیزم اغتشاش یک حالت جدیدی تولید می‌شود.

ب - آزمایش عملی بودن حالت جدید به کمک برنامه پخش بار، در امتحان قیود مساله اگر قیدی برآورده نشود گام الف تکرار می‌گردد و در غیر این‌صورت گام ج انجام می‌شود.

پ - محاسبه هزینه کل سیستم.

مرحله ۵- تجدید حالت سیستم؛ بسته به معیار پذیرش روش ASA یا حالت جدید جایگزین حالت قبل می‌شود و یا همان حالت قبل پذیرفته می‌شود.

مرحله ۶- آزمایش معیار توقف الگوریتم؛ در صورتی که معیار توقف برآورده نشود سیستم معادل هنوز سرد نشده است و با تکرار مرحله ۳ الگوریتم ادامه می‌یابد. در غیر این‌صورت مرحله ۷ انجام می‌شود.

مرحله ۷- انتخاب آخرین حالت قابل قبول به عنوان پاسخ بهینه جامع.

در این مقاله ابتدا باسهایی از شبکه بعنوان باس نامزد برای نصب منابع جدید تعیین می‌شوند و در طول فرآیند بهینه‌سازی، الگوریتم بهترین مکان و اندازه منبع راکه باید در آن نصب شود تعیین می‌کند. برای تعیین باسهای نامزد از روش چن که مبتنی بر بردار تکین سمت راست متناظر با مقدار تکین کمینه از ماتریس ژاکوبین پخش بار می‌باشد استفاده شده است. این روش به شبکه ۱۴ باسه IEEE اعمال شده است و باسهای نامزد انتخاب گردیده‌اند. جزئیات مربوط به نحوه اعمال روش چون در مرجع [۹] آمده است.

نتایج شبیه‌سازی

روش ASA به دو شبکه ۱۴ و ۳۰ باسه IEEE اعمال شده است که در این قسمت نتایج شبیه‌سازی آورده می‌شوند. شبکه ۱۴ باسه در حالت استاندارد دارای پروفایل ولتاژی در محدوده مجاز می‌باشد. برای مشاهده اثرات برنامه‌ریزی VAr برروی این سیستم باید شبکه را از حالت استاندارد اصلاح نمود تا پروفایل ولتاژ از حدود مجاز خود تخطی نماید.

نتایج شبیه‌سازی شبکه ۱۴ باسه IEEE. پارامترهایی که در مطالعه شبکه ۱۴ باسه از مرجع [8] بکار رفته‌اند عبارتند از : هزینه پریونیت انرژی K_e=۲/۳NT$Kwh، هزینه منابع جدید توان راکتیو خازنی وسلفی NT $/bank s_{ci}=۲۲۷۵ و s_{ri} = ۳۲۸۰ NT $bank، هزینه نصب منابع d_i = ۸۴۰۰۰ NT $/Location، حداکثر مقدار منبع VAr در هر مکان q_{ci}^{max} , q_{ri}^{max}=۱۵۰ban.

دوره زمانی برنامه‌ریزی برای مدت ۱۰ سال در نظر گرفته شده است که هر سال ۶ ماه روزانه ۸ ساعت با الگوی بار مصرفی شبکه اصلاح شده از آن بهره‌برداری می‌شود. به عبارت دیگر زمان بهره‌برداری از شبکه اصلاح شده برابر است با : D=۱۴۶۰۰h .

شبیه‌سازی برنامه‌ریزی توان راکتیو شبکه ۱۴ باسه با توجه به پارامترهای معرفی شده و باسهای نامزد برای نصب منابع جدید، شامل باسهای ۴، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ در دو حالت انجام شده است. در حالت اول متغیرهای کنترلی (مستقل) مساله فقط اندازه منابع VAr جدید می‌باشد و از منابع موجود شبکه و نیز تجهیزات کنترل کننده ولتاژ (توان راکتیو) شبکه (مثل تپ ترانسها و ولتاژ ژنراتورها) برای بهینه‌سازی مساله استفاده نشده است. در این صورت چون متغیرهای کنترلی مساله همان بانکهای راکتیو می‌باشند و این بانک‌ها مقادیر صحیح دارند مساله، یک مساله برنامه‌ریزی با اعداد صحیح می‌باشد.

در جدول (۱) اندازه و نوع منابع راکتیو نصب شده در باسهای نامزد برای نصب منبع آورده شده است. در جدول (۲) تلفات شبکه به همراه هزینه‌های مربوط به تلفات برای قبل و بعد از برنامه‌ریزی و همچنین، هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری برای نصب منابع آورده شده است.

برای ارزیابی میزان بهبود پروفایل ولتاژ بعد از برنامه‌ریزی VAr نسبت به حالت اولیه از شاخص انحراف ولتاژ از مقدار ایده‌آل در جدول (۲) استفاده شده است که از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$\sum_{i\in\Omega_c} \frac{|V_i - V^{ideal}|}{V^{ideal}} \qquad (۸)$$

در اینجا V^{ideal} برابر IPU می‌باشد.

جدول ۱ اندازه، نوع و محل نصب منبع AVr در مطالعه حالت اول

شماره باس	۴	۱۲	۱۳	۱۴
تعداد بانکهای راکتیو	+۸۰	+۱۳	+۱۸	+۱۲

- هر بانک معادل ۱ مگاوار می‌باشد، علامت مثبت بیانگر منبع خازنی می‌باشد.
- کل توان راکتیو نصب شده برابر ۱۲۳ مگاوار می‌باشد.

جدول ۲ تلفات و هزینه‌های شبکه به همراه شاخص پروفایل ولتاژ در مطالعه حالت اول

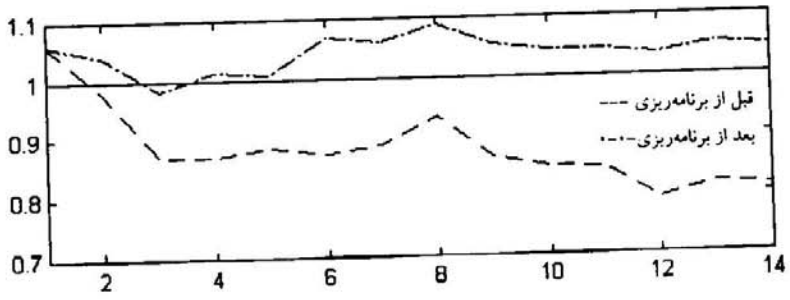
	قبل از برنامه‌ریزی	بعد از برنامه‌ریزی	درصد کاهش
تلفات توان (MVAr)	۳۸/۸۹۳۲	۲۸/۶۰۸۱	۲۶/۲۶
هزینه تلفات توان (NT$)	۱۳۰۶۰۳۴۶۹۵	۹۶۳۰۷۷۷۵۸	۲۶/۲۶
هزینه نصب منابع جدید (NT$)	—	۶۱۵۸۲۵	—
هزینه کل شبکه	۱۳۰۶۰۳۴۶۹۵	۹۶۳۶۹۳۵۸۳	۲۶/۲۱
میزان انحراف ولتاژ باسهای مصرفی	۱/۵۰۳۱	۰/۳۷۴۶	۷۴/۹۶

شکل (۱) بهبود پروفایل سیستم بعد از برنامه‌ریزی نسبت به حالت اولیه را بطور دقیقتر نشان می‌دهد.

در جدول (۳) مقدار منابع جدید راکتیو و نوع آنها در باسهای نامزد برای نصب آمده است.

در جدول (۴) هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری برای شبکه ۱۴ باس در حالت دوم آمده است.

جدول (۵) نتایج برنامه‌ریزی توان راکتیو برای شبکه ۱۴ باس در دو حالت مختلف مقایسه شده‌اند.



شکل ۱ پروفایل ولتاژ سیستم قبل و بعد از برنامه‌ریزی

جدول ۳ اندازه، نوع و محل نصب منبع AVr در مطالعه حالت دوم

شماره باس	۴	۱۲	۱۳	۱۴
تعداد بانکهای راکتیو	+۷۰	+۱۵	+۲۰	+۱۱

- کل توان راکتیو نصب شده برابر ۱۱۶ مگاوار می‌باشد.

جدول ۴ تلفات و هزینه‌های شبکه به همراه شاخص پروفایل ولتاژ در مطالعه حالت دوم

	قبل از برنامه‌ریزی	بعد از برنامه‌ریزی	درصد کاهش
تلفات توان (MVAr)	۳۸/۸۹۳۲	۲۸/۵۳۰۰	۲۶/۶۴
هزینه تلفات توان (NT$)	۱۳۰۶۰۳۴۶۹۵	۹۵۸۰۳۸۴۷۴	۲۶/۶۴
هزینه نصب منابع جدید (NT$)	—	۵۹۹۹۰۰	—
هزینه کل شبکه	۱۳۰۶۰۳۴۶۹۵	۹۵۸۶۳۸۳۷۴	۲۶/۵۹
میزان انحراف ولتاژ باسهای مصرفی	۱/۵۰۳۱	۰/۳۴۴۳	۷۷/۰۹

همانطور که از جدول پیداست در حالتی که از منابع و امکانات موجود در شبکه برای بهینه‌سازی توزیع توان راکتیو استفاده می‌شود منابع جدید کمتری در شبکه نصب شده‌اند که منجر به هزینه کمتری نیز گشته است. هرچند میزان کاهش هزینه در این حالت نسبت به حالتی که از امکانات موجود استفاده نمی‌شود برای شبکه ۱۴ باس خلیل زیاد نیست ولی برای یک شبکه واقعی که دارای تعداد باسی بمراتب بیشتر از این مقدار است و منابع موجود VAr در آن خیلی بیشتر است، مقدار کاهش هزینه می‌تواند خیلی بیشتر گردد.

نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۰ باسه IEEE. در حالت استاندارد شبکه ۳۰ باسه IEEE دارای پروفایل ولتاژ مناسب و در حد مجاز می‌باشد. با اصلاح این سیستم و افزایش توان راکتیو مصرفی بارها تا دو برابر مقدار اصلی پروفایل ولتاژ سیستم کاهش می‌یابد و از حد مجاز خود کمتر می‌گردد. هدف این شبیه‌سازی مقایسه نتایج حاصل از برنامه‌ریزی با الگوریتم ASA و نتایج حاصل از الگوریتم SA استاندارد که در مقاله [2] انجام شده است، می‌باشد. در این مرجع از روش خاصی برای تعیین باسهای نامزد استفاده نشده است. باسهایی که مقاله برای نصب VAr انتخاب کرده است عبارتند از باس ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۴ و ۳۰ که در مقاله حاضر نیز از همین باسها بعنوان باس نامزد استفاده می‌شود. پارامترهایی که برای برنامه‌ریزی راکتیو شبکه ۳۰ باسه بکار رفته به‌صورت زیر است:

هزینه انرژی. K_e=۰/۰۶$/KWh؛ هزینه منابع جدید توان راکتیو: منابع به‌صورت بانکهای خازنی می‌باشند که هر بانک معادل ۳۰۰KVAr توان راکتیو می‌باشد و هزینه هر بانک برابر S_{ci} = ۹۰۰$/bank؛ هزینه نصب منابع d_i=۱۰۰۰$/location:VAr؛ حدود منابع VAr جدید : d_{ci}^{max} = ۱۰۰bank؛ دوره زمانی برنامه‌ریزی : D=۶۷۶۰h.

جدول (۶) اندازه و مکان نصب منابع جدید VAr پس از برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. جدول (۵) هزینه تلفات، منابع جدید و هزینه کل شبکه را نشان می‌دهد.

جدول ۵ مقایسه نتایج دو حالت

	تلفات توان (MVAr)	هزینه تلفات (NT$)	هزینه نصب منابع جدید (NT$)	هزینه کل شبکه (NT$)	کل توان راکتیو نصب شده
حالت اول	۲۸/۶۸۰۱	۹۶۳۰۷۷۷۵۸	۶۱۵۸۲۵	۹۶۳۶۹۳۵۸۳	۱۲۳
حالت دوم	۲۸/۵۳۰۰	۹۵۸۰۳۸۴۷۴	۵۹۹۹۰۰	۹۵۸۶۳۸۳۷۴	۱۱۶

جدول ۶ اندازه، نوع و محل نصب منبع VAr

شماره باس	۱۷	۱۸	۲۱	۲۴	۳۰
تعداد بانکهای راکتیو	۶۸	۴۹	۸۸	۶۸	۳۶

- هربانک معادل ۳۰۰KVAr توان راکتیو است.

جدول ۷ تلفات و هزینه‌های شبکه به همراه شاخص پروفایل ولتاژ

	قبل از برنامه‌ریزی	بعد از برنامه‌ریزی	درصد کاهش
تلفات توان (MVAr)	۲۹/۹۹۰۳	۱۹/۰۶۰۱	۳۶/۴۴
هزینه تلفات توان (NT$)	۱۲۱۶۴۰۹۷	۷۷۳۰۷۹۳	۳۶/۴۴
هزینه نصب منابع جدید (NT$)	—	۲۸۳۱۰۰	—
هزینه کل شبکه	۱۲۱۶۴۰۹۷	۸۰۱۳۸۹۳	۳۴/۱۱
میزان انحراف ولتاژ باسهای مصرفی	۴/۲۸۶۳	۰/۹۱۴۷	۷۸/۶۶

جدول (۸) مقایسه نتایج نهایی مقاله حاضر و مقاله [2] روی شبکه ۳۰ باسه IEEE را نشان می‌دهد.

جدول ۸ مقایسه نتایج نهایی مقاله حاضر و مقاله [2]

	درصدکاهش تلفات	درصد کاهش هزینه کل
نتیجه‌مقاله‌حاضر	۳۶/۴۴	۳۴/۱۱
نتیجه مقاله [2]	۳۶	۳۱/۳۰

بررسی پیشامدهای احتمالی در برنامه‌ریزی VAr. در این مقاله از یک مد تصحیح‌کننده در بررسی شرایط اضطراری سیستم ۳۰ باسه استفاده شده است. در مد تصحیح کننده پس از وقوع حادثه در شبکه اگر تجهیزات کنترل کننده AVr و منابع موجود سیستم قادر نباشند سیستم را تحت شرایط بهره‌برداری قابل قبول حفظ کنند باید با نصب منابع جدید VAr، سیستم را به یک نقطه کار قابل قبول رساند و این خود یک مساله برنامه‌ریزی VAr خواهد بود.

در برنامه‌ریزی توان راکتیو با ملاحظه پیشامدهای احتمالی هدف این است که با کمترین هزینه بتوان سیستم را در یک نقطه کار قابل قبول حفظ کرد. با توجه به اینکه مدت زمان وقوع یک پیشامد نسبت به دوره زمانی برنامه‌ریزی VAr در شرایط کار نرمال سیستم بسیار کم است و حفظ عملکرد قابل قبول سیستم تحت شرایط اضطراری مهمترین هدف اپراتور سیستم می‌باشد بنابراین، کاهش تلفات در برنامه‌ریزی توان راکتیو با ملاحظه شرایط اضطراری از اهمیت کمتری برخوردار است. در این حالت هدف رسیدن به کمترین هزینه ناشی از نصب منابع جدید VAr برای حفظ سیستم در نقطه کار قبول است بنابراین، تابع هدف مساله در این صورت کاهش هزینه‌های نصب منابع جدید VAr می‌باشد به عبارتی علیرغم حالت کار عادی سیستم که کل هزینه‌های سیستم شامل هزینه تلفات انرژی و هزینه نصب منابع جدید بود، در این حالت هزینه کل فقط هزینه نصب منابع جدید می‌باشد. قیود مساله در این حالت محدودیتهای عملکردی و سرمایه‌گذاری سیستم تحت شرایط اضطراری می‌باشد.

برای شبیه‌سازی برنامه‌ریزی VAr با وجود حادثه در شبکه ۳۰ باسه خروج همزمان دو خط از شبکه بررسی خواهد شد؛ این دو خط عبارتند از خط انتقال بین باسهای ۱۰ و ۲۲ و خط انتقال بین باسهای ۲۷ و ۳۰ باید توجه کرد که در مد تصحیح کننده در مطالعه پیشامدهای احتمالی در برنامه‌ریزی توان راکتیو فرض بر این است که برای حالت نرمال سیستم، برنامه‌ریزی توان راکتیو انجام شده است و سیستم در حال حاضر در بهترین شرایط بهره‌برداری که شامل کمترین هزینه‌های بهره‌برداری است، به‌سر می‌برد و در این حالت است که دو خط از مدار خارج می‌گردد. اکنون با برنامه‌ریزی VAr

باید سیستم، در صورتی که از ادامه کار به دلیل نقض برخی قیود و محدودیتهای عملکردی سیستم ناتوان باشد، با کمترین هزینه به یک عملکرد قابل قبول برسد.

پس از انجام برنامه‌ریزی نتیجه این شد که هیچ منبع جدیدی وارد شبکه نگردد و علت آن این است که هدف مساله رسیدن به کمترین هزینه نصب منابع VAr است تا بتوان به عملکرد قابل قبول سیستم رسید. عملکرد قابل قبول سیستم این است که با وجود حادثه در سیستم قیود شبکه برآورده گردد. از طرفی چون با وقوع این حادثه محدودیتهای سیستم نقض نگردید از این رو، الگوریتم نیاری به تخصیص منبع VAr جهت ارضای قیود ندید، چرا که تخصیص منبع مستلزم هزینه است و هدف الگوریتم این است که به کمترین هزینه برسد. بنابراین مقدار متغیرهای وابسته بعد از برنامه‌ریزی و قبل از آن یکسان است و مقدار متغیرهای مستقل بعد از برنامه‌ریزی صفر می‌باشد. نتایج مربوط به این مرحله در [۹] به طور کامل آمده است.

نتیجه گیری

در این مقاله از یک شیوه جدید برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی که مبتنی بر الگوریتم ASA می‌باشد، در حل مساله برنامه‌ریزی بهینه توان راکتیو در سیستم قدرت استفاده شده است. این روش از مدل کاملاً واقعی سیستم قدرت استفاده می‌کند و نیازی به خطی‌سازی آن ندارد. برای حل این مساله سیستم قدرت ابتدا مکانهایی از شبکه برطبق شاخصی که معرف پایداری حالت ماندگار ولتاژ است بدست می‌آید. این کار باعث می‌شود که جستجوی کارآمدی روی فضای پاسخها انجام گیرد و از حجم محاسبات کاسته شود. با تعیین این مکانها و متغیرهای کنترلی دیگر الگوریتم با تولید دنباله‌ای از پاسخها برای هر دما (پارامتر کنترل فرآیند جستجو) به جستجوی پاسخ بهینه می‌پردازد. در مراحل متوالی با کاهش دما و تولید ترکیبهای جدید و مطابق معیار پذیرشی که در این روش استفاده می‌شود، الگوریتم به یک پاسخ بسیار خوب همگرا می‌شود. در هر تکرار الگوریتم باید قیود و محدودیتهای مساله به ازای پاسخهای تولید شده امتحان گردد. برای این منظور از یک برنامه پخش بار سریع که مبتنی بر جداسازی اثرات توان اکتیو و راکتیو بر همدیگر می‌باشد (FELF) استفاده می‌شود.

مراجع

1. Hong, Y. Y., et al. "A heuristic and algorithmic approach to VAr planning", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 505-512, May (1992).
2. Hsiao, Y. Y., et al. "A new approach for optimal VAr source planning in large scale electric power systems", *IEEE Transactions, Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 988-996, (1993).
3. Chen, Y. L., et al. "Multiobjective VAr planning using the goal-attainment method", *IEE proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 141, No. 3, pp. 227-232, (1994).
4. Chen. Y. L., et al. "Interactive fuzzy satisfying method for optimal multi-objective VAr planning in power systems". *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 1241, No. 6,pp. 554-560, (1994).