

## درمدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاهها با در نظر گرفتن ادوات FACTS

رفعت صبور\*<sup>۱</sup>، افشین لشکرآرا محمره<sup>۲</sup>

\*۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، rafatsabour@yahoo.com

۲- استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، lashkarara@gmail.com

**چکیده:** در این مقاله در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاهها با در نظر گرفتن ادوات FACTS در سیستمهای قدرت انجام خواهد شد. امنیت در سیستمهای قدرت یکی از مسائل مهم برنامه‌ریزی و بهره‌برداری می‌باشد. همچنین حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاهها (UC) که در آن امنیت شبکه انتقال نیز در نظر گرفته شده باشد تحت عنوان در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاهها (SCUC) نقش مهمی در بهره‌برداری کوتاه مدت سیستمهای قدرت بازی می‌کند. با توجه به اینکه ادوات FACTS موجب افزایش امنیت شبکه‌های انتقال می‌گردد لذا در این مقاله مسئله SCUC با حضور ادوات FACTS حل خواهد شد. ادوات FACTS ترکیبی مبتنی بر جابجاگر فاز (PST) از جمله کنترل‌کننده یکپارچه توان بهینه (OUPFC) از ادوات شاخص جهت کنترل و هدایت توان در مسیرهای معین می‌باشند. در این مقاله مسئله در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاهها (SCUC) با حضور کنترل‌کننده یکپارچه توان بهینه (OUPFC) و به‌منظور بهینه‌سازی چند منظوره توابع هدف شامل هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه و هزینه نصب ادوات FACTS مدل‌سازی خواهد شد. برای تولید جوابهای پارتو، مسأله بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از روش محدودیت  $\epsilon$  حل خواهد شد. یک ابزار تصمیم‌گیری فازی جهت انتخاب بهترین جواب مصالحه‌ای از بین جوابهای پارتو طراحی می‌گردد. مسأله بهینه‌سازی در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی با مشتقات ناپیوسته (DNLP) روی شبکه استاندارد ۱۴ شینه IEEE پیاده‌سازی و با استفاده از نرم افزار GAMS حل خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده قابلیت و توانایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله SCUC و جایابی بهینه چند منظوره ادوات FACTS بصورت همزمان و بهبود عملکرد سیستم قدرت می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** در مدار قرار گرفتن نیروگاهها (UC)، در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاهها (SCUC)، OUPFC.

جایابی بهینه، بهینه‌سازی چندهدفه، روش محدودیت اپسیلون

در مدار قرار گرفتن نیروگاهها (UC) برنامه‌زمانبندی

۱- مقدمه

واحدهای تولیدی را بصورت ساعتی و برای روز بعد تا افق

زمانی یک هفته و بمنظور حداقل سازی هزینه سوخت و راه اندازی/ خاموش کردن واحدهای تولیدی با در نظر گرفتن قیودی از جمله تعادل بار ساعتی و محدودیتهای نرخ افزایش و کاهش تولید واحدها تعیین می‌کند. برای تأمین مطمئن برق، امنیت سیستم باید در بهره برداری کوتاه مدت در نظر گرفته شود. بهره برداری کوتاه مدت بعنوان یک راه کار برای افزایش حفظ امنیت لحظه‌ای مورد توجه می‌باشد. بهره برداری کوتاه مدت یک برنامه زمانبندی تولید ساعتی مبتنی بر امنیت (توسط برنامه در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاه ها (SCUC)) محاسبه و برای تأمین ساعتی بارها آن را توزیع (توسط برنامه پخش بار بهینه مقید به امنیت (SCOPF)) می‌کند. اجزای مدل بهره‌برداری کوتاه مدت برای مدیریت امنیت شامل برنامه‌ریزی تولید بهینه، وابستگی‌های مربوط به تولید و انتقال و ... است. در وابستگی‌های سیستمهای انتقال، ادوات سیستمهای انتقال توان از جمله ترانسفورماتورهای تپ چنجر، فازشیفترها، خازنهای سری قابل کنترل، ادوات FACTS و خطوط قابل کلیدزنی نقش مهمی را در انتقال کم هزینه انرژی الکتریکی از تولیدکنندگان به مصرف کنندگان، کنترل‌های بهینه سیستمهای قدرت و تضمین امنیت سیستم انتقال بازی می‌کنند [۱].

ادوات FACTS ضمن افزایش ظرفیت قابل انتقال، مشخصه‌های مهمی مانند پایداری سیستم، میرایی نوسانات توان و پایداری ولتاژ را نیز بهبود می‌بخشند. یکی از شاخص‌ترین این ادوات جهت کنترل و هدایت توان در

مسیرهای معین، جابجاگر فاز (PST) می‌باشد که از مدتها قبل از لحاظ تئوری مورد بررسی و مطالعه [۲]، و از لحاظ عملکردی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به ضعف عملکرد PST بر روی متغیرهای شبکه و کنترل مناسب توان، می‌توان از جابجاگرهای فاز ترکیبی (HPS) استفاده نمود. جابجاگرهای فاز ترکیبی ساختار جدید مداری نداشته، بلکه ترکیبی از کنترل‌کننده‌های توان موجود می‌باشد. این جابجاگرهای ترکیبی، ترکیب PST با کنترل‌کننده یکپارچه توان (UPFC) می‌باشد که به آن کنترل‌کننده یکپارچه توان بهینه (OUPFC) گفته می‌شود [۴].

مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاهها (UC) در کتابها و مقالات متعدد مورد بررسی قرار گرفته است. در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاه ها (SCUC) و بطور کلی چارچوب امنیت سیستمهای قدرت در مقاله مشهور آقای دکتر شاهیده پور مورد بررسی و جایگاه آن در بهره برداری سیستمهای قدرت تعریف گردیده است [۱]. در [۱۲] یک روش موثر برای مسئله SCUC با در نظر گرفتن قیود ac معرفی و با استفاده از الگوریتم بندرز حل شده است. در [۱۰] مسئله SCUC با استفاده از الگوریتم بندرز حل شده است که در آن مسئله UC بعنوان مسئله اصلی و امنیت بعنوان زیرمسئله در نظر گرفته شده است. در [۱۳] یک پیشامد پیشگیرانه/اصلاحی موثر ac روی یک پریود ۲۴ ساعته مبتنی بر مدل SCUC پیشنهاد شده است. در خصوص در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاه ها (SCUC) و ادوات FACTS تحقیقات بسیار کمی انجام شده است که با طرح تحقیق پیشنهادی متفاوت می‌باشد. در [۱۴] مسئله

سوخت کل ژنراتورها، تلفات اکتیو شبکه و هزینه نصب ادوات FACTS و مقایسه عملکرد آن. لازم بتوضیح است که مسئله جایابی ادوات FACTS در پروسه UC و بخصوص جایابی بهینه عنصر OUPFC در پروسه UC برای اولین بار در این مقاله انجام شده است.

## ۲- مساله جایابی بهینه عنصر OUPFC در پروسه UC

در این مقاله، با استفاده از مدل‌سازی استاتیکی کنترل‌کننده یکپارچه توان بهینه (OUPFC)، مطالعات در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاه‌ها (SCUC) با حضور این عنصر انجام خواهد شد. در این راستا ابتدا مقیاسهای زمانی تحلیل امنیت سیستم‌های قدرت تشریح شدند و سپس در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاه‌ها (SCUC) مورد بررسی قرار گرفت و در ادامه مروری بر کارهای انجام شده توسط دیگران صورت گرفت و در پایان اهداف مقاله و همچنین روند انجام و تدوین مطالب مقاله ارائه شد.

### ۲-۱- تابع هدف

تابع هدف اصلی شامل دو بخش کلی ۱- هزینه سوخت نیروگاهها و هزینه OUPFC ۲- تلفات اکتیو شبکه است

$$F_1 = F_{11} + F_{12} \quad (1)$$

$$(\$/h) \quad (2)$$

$$F_{11} = \sum_{t=1}^T f_{1t} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NG} (\alpha_i + b_i PG_{i,t} + c_i PG_{i,t}^2 + |e_i \sin(f_i (PG_{i,t}^{\min} - PG_{i,t}))|)$$

SCUC با در نظر گرفتن ادوات FACTS و با استفاده از الگوریتم زنبور مصنوعی (ABC) حل شده است که در آن از پخش بار اقتصادی مقید به امنیت (-Security) (Constrained Economic Dispatch (SCED) استفاده شده است. ادوات FACTS مورد استفاده شامل SVC, TCSC, STATCOM, SSSC, UPFC و IPFC می باشد. در [۱۵] مسئله UC با در نظر گرفتن عنصر UPFC و با استفاده از الگوریتم بندرز حل شده است که در آن از پخش بار اقتصادی (ED) برای کاهش هزینه استفاده شده است.

با توجه به نیازهای مطرح شده برای افزایش امنیت و کنترل توان در بهره برداری کوتاه مدت سیستمهای قدرت، مسئله اصلی مقاله جایابی و تنظیمات بهینه ادوات FACTS در پروسه در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاه ها می باشد. جهت نیل به این منظور،

اهدافی که در این مقاله دنبال می‌شوند عبارتند از:

- ۱) فرمول بندی مسئله در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاه ها با حضور ادوات FACTS.
- ۲) مدل‌سازی استاتیکی OUPFC و به‌دست آوردن نواحی عملکردی آن.
- ۳) طراحی پروسه جایابی بهینه ادوات FACTS در مسئله SCUC.
- ۴) فرمول بندی مسئله بهینه سازی چند هدفه SCUC با حضور ادوات FACTS با روش محدودیت  $\epsilon$  در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی با مشتقات ناپیوسته (DNLP).
- ۵) طراحی و جایابی بهینه OUPFC در سیستم استاندارد ۱۴ شینه IEEE با استفاده از نرم‌افزار GAMS و به‌منظور بهینه‌سازی منحصر به فرد و ترکیبی توابع هدف شامل هزینه

## ۲-۲- تلفات شبکه

برای محاسبه تلفات شبکه از رابطه (۷-۴) استفاده می‌شود:

$$F_{12} = \frac{C_F}{8760 * Y_F} \quad (۳)$$

(۸)

$$C_{PST} = 12 * S_{PST} * 1000 \quad (۴)$$

$$F_2 = \sum_{l=1}^{Nl} P_l = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)$$

$Y_{ij}$ : ادمیتانس شبکه بر حسب pu

$\theta$ : زاویه ادمیتانس شبکه بر حسب رادیان

$\delta$ : زاویه ولتاژ شبکه بر حسب رادیان

$F_{11}$ : قسمت اول از بخش اول تابع هدف مساله

$f_{lt}$ : میزان هزینه ژنراتورها در ساعت t

$\alpha_i, b_i, c_i, e_i, f_i$ : ضرایب تابع هزینه ژنراتور i

$P_{G_{i,t}}$ : توان تولیدی ژنراتور i در ساعت t بر حسب مگاوات

$P_{G_i}^{min}$ : حداقل توان قابل تولید توسط ژنراتور i

$C_F$  هزینه کلی OUPFC و  $Y_F$  عمر مفید آن بر حسب سال

می‌باشد. در این تحقیق عمر مفید برابر ۵ سال در نظر گرفته شده است.

$C_{PST}$ : هزینه سرمایه گذاری برای نصب PST

$S_{PST}$ : ظرفیت PST

(۵)

$$C_{UPFC} = (0.0003S_{UPFC}^2 - 0.2691 * S_{UPFC} + 188.22) * S_{UPFC} * 1000$$

(۶)

$$C_{OUPFC} = [(12 * S_{PST}) + (0.0003S_{UPFC}^2 - 0.2691 * S_{UPFC} + 188.22) * S_{UPFC}] * 1000$$

$C_{UPFC}$ : هزینه سرمایه گذاری برای UPFC

$S_{UPFC}$ : ظرفیت UPFC

در نهایت هزینه OUPFC به صورت زیر بدست می‌آید:

(۷)

$$P_{Gi} - P_{Di} - f_{Pi}(x, u) = 0 \quad (۱۰)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - f_{Qi}(x, u) = 0 \quad (۱۱)$$

$$C_{OUPFC} = [(12 * S_{PST}) + (0.0003S_{UPFC}^2 - 0.2691 * S_{UPFC} + 188.22) * S_{UPFC}] * 1000$$

می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌شوند:

قیود مساوی معادلات پخش بار برای توان‌های اکتیو و راکتیو

## ۲-۴- قیود مساوی

X: متغیرهای مساله

u: ورودی‌های مساله

$$g(x, u) = 0 \quad (۹)$$

$$h(x, u) \leq 0$$

هر مساله بهینه‌سازی دارای قیود تساوی و نامساوی می‌باشد. در این مقاله نیز مساله موردنظر محدودیتهای مختلف تساوی و نامساوی مختلفی دارد. به طور کلی می‌توان محدودیتهای مساله را به صورت زیر بیان کرد:

$UR_i$ : حداکثر نرخ افزایش خروجی در هر ساعت

$DR_i$ : حداکثر نرخ کاهش خروجی در هر ساعت

قیود ادوات FACTS: این قیود شامل محدودیت روی توان و

تنظیمات ادوات FACTS می‌باشد:

$$S_{FACTS} \leq S_{FACTS}^{\max} \quad (17)$$

$$\text{for UDFC} \quad \left. \begin{array}{l} r^{\min} \leq r \leq r^{\max} \\ \gamma^{\min} \leq \gamma \leq \gamma^{\max} \end{array} \right\} \quad (18)$$

$$\text{for OUPFC} \quad \left. \begin{array}{l} r^{\min} \leq r \leq r^{\max} \\ \rho^{\min} \leq \rho \leq \rho^{\max} \\ \sigma^{\min} \leq \sigma \leq \sigma^{\max} \end{array} \right\} \quad (19)$$

### ۳- الگوریتم پیشنهادی

مساله موردنظر یک مساله دینامیکی است که طی آن باید واحدهای موجود در مدار و میزان تولید ژنراتورهای موجود در شبکه در طول ۲۴ ساعت به گونه ای تعیین شود که علاوه بر برقراری محدودیتهای فنی شبکه، هزینه بهره‌برداری از شبکه نیز حداقل باشد. این هزینه می‌توان بر اساس هزینه سوخت ژنراتورها، تلفات شبکه یا ترکیب هر دو تعریف شود.

با توجه به این مساله، از نرم افزار GAMS برای حل مساله استفاده می‌شود. متغیرهای اصلی مساله در این قسمت ولتاژ، زاویه ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو تولیدی توسط ژنراتورهایی که در مدار قرار دارند و پارامترهای OUPFC می‌باشد. متغیرهای مساله به صورت رابطه زیر تعریف می‌شوند:

$Q_{Gi}$  و  $P_{Gi}$ : توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور  $i$  ام،

$Q_{Di}$  و  $P_{Di}$ : توان‌های اکتیو و راکتیو بار در شین  $i$  ام،

$f_{Qi}$  و  $f_{pi}$ : معادلات پخش بار توان‌های اکتیو و راکتیو در شین  $i$  ام

می‌باشند. بدیهی است که این معادلات می‌توانند با توجه به مدل

تزریق توان شامل ادوات FACTS نیز باشند.

### ۲-۵- قیود نامساوی

قیود نامساوی شامل قیود تولید، امنیت و قیود ادوات FACTS

می‌باشد که در ذیل شرح داده می‌شوند:

قیود تولید: قیود تولید شامل محدودیت روی ولتاژ و توان‌های

اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتورها می‌باشد:

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, \dots, NG \quad (12)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, \dots, NG \quad (13)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \quad i = 1, \dots, NG \quad (14)$$

قیود امنیت: این قیود شامل محدودیت روی ولتاژ شین‌های بار و

بارگذاری خطوط انتقال می‌باشد [۲۶]

$$V_{Li}^{\min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{\max}, \quad i = 1, \dots, Nd \quad (15)$$

$$S_{Li} \leq S_{Li}^{\max}, \quad i = 1, \dots, Nl \quad (16)$$

که  $Nl$  و  $Nd$  به ترتیب تعداد شین‌های بار و خطوط انتقال می‌باشد.

محدودیت نرخ افزایش/کاهش خروجی ژنراتورها: بر اساس این محدودیتها، هر ژنراتور در هر ساعت قادر است حداکثر میزان مشخصی از توان تولیدی خود را کاهش یا افزایش دهد. این قیود که به قیود رمپ ریت معروف هستند با روابط زیر بیان می‌شوند:

در بخش دوم، مساله در حضور OUPFC حل می‌شود. برای سریعتر شدن همگرایی مساله، مقادیر بدست آمده از بخش اول به عنوان نقطه شروع این بخش در نظر گرفته می‌شود. در این بخش مساله در یک حلقه تکراری برای ۴ کاندید نصب OUPFC حل شده و نتایج نهایی در هر قسمت محاسبه و ذخیره می‌شود. در پایان با تحلیل نتایج بدست آمده می‌توان بهترین مکان و پارامترها را برای OUPFC مشخص کرد.

### ۳-۱- استفاده از روش $\epsilon$ -constraint برای حل مساله در حالت ترکیبی تابع هدف

در این مقاله روش محدودیت  $\epsilon$  برای حل مسئله چند هدفه انتخاب شده است. در این روش یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف و سایر توابع هدف به عنوان قید در نظر گرفته می‌شود. روابط زیر یک بهینه سازی چند هدفه با چهار تابع هدف را نشان می‌دهد که توابع هدف  $f_1$ ،  $f_2$  و  $f_4$  جهت حداقل سازی و تابع هدف  $f_3$  بمنظور حداکثر سازی می‌باشد. در اینجا تابع هدف اصلی تابع  $f_1$  می‌باشد [۲۷].

$$\begin{aligned} \min f_{1,k} \\ f_{2,k} &\leq \epsilon_{2,k} \\ f_{3,k} &\geq \epsilon_{3,k} \\ f_{4,k} &\leq \epsilon_{4,k} \\ h(x,u) &= 0 \\ g(x,u) &\leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

که  $k$  شماره خط انتقالی است که عنصر FACTS در آن قرار گرفته است. در معادله فوق، برای توابعی که به قصد مینیمم سازی در قید اضافه می‌شوند از علامت کوچکتر مساوی و توابعی که به قصد ماکزیمم سازی در قید اضافه می‌شوند از علامت بزرگتر

$$X = \begin{bmatrix} V_{i,t} \\ \delta_{i,t} \\ pg_{i,t} \times u_0 \\ qg_{i,t} \times u_0 \\ r \\ \rho \\ \sigma \end{bmatrix} \quad (20)$$

متغیر  $u_0$  متغیر باینری مسئله UC است که نشانگر خاموش (0) یا روشن (1) بودن واحدهای شبکه است. همچنین متغیرهای واسط دیگری برای تکمیل فرآیند حل مساله تعریف شده‌اند که صرفاً جنبه ساده سازی روابط ریاضی را دارند.

برای حل مساله از حل کننده<sup>۱</sup> قدرتمند CONOPT استفاده شده است. با توجه به اینکه ابعاد مساله بزرگ است لذا تنظیمات اولیه مربوط به تعداد تکرار، حافظه تخصیصی، میزان خطا، زمان اجرای برنامه در خود برنامه روی مقادیر نسبتاً بالایی تنظیم شده است.

مساله موردنظر در دو بخش کلی حل می‌شود. در بخش اول حل مساله در حالت اولیه و بدون حضور OUPFC صورت می‌گیرد. در این بخش از مساله همه محدودیتهای مربوط به پخش بار بهینه دینامیکی لحاظ شده است. در پایان این بخش می‌توان مقادیر Fvsi را با استفاده از رابطه ارائه شده در این فصل برای یک ساعت خاص محاسبه کرد. در این مقاله این مقادیر برای ساعت ۲۱ محاسبه شده‌اند. همچنین پارامترهای بدست آمده از این قسمت شامل ولتاژ، زاویه ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورهایی که در مدار قرار دارند به عنوان مقادیر مطالعات اولیه در فصل شبیه سازی آمده است.

<sup>۱</sup>Solver

بهینه پارتو به ازای قرار گیری عنصر FACTS در خط  $k$  ام بدست می‌آید. هر چه مقدار  $q$  بزرگتر باشد نقاط پارتو بیشتری بدست می‌آید اما از طرفی زمان شبیه‌سازی افزایش خواهد یافت. در این تحقیق عدد ۴ برای مقدار  $q$  انتخاب شده است. در این تحقیق مسئله در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاهها توام با جایابی بهینه چند منظوره عنصر OUPFC با استفاده از روش محدودیت اِپسیلون حل خواهد شد. در این روش مراحل زیر طی می‌شود:

ابتدا مساله دو بار حل می‌شود. در بار اول هدف کاهش هزینه و بار دوم کاهش تلفات می‌باشد. در این مرحله ماتریس زیر تشکیل می‌شود.

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} \\ f_{12} & f_{22} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$f_{11}, f_{12}$ : مقادیر تابع هدف اول (هزینه سوخت و هزینه سرمایه گذاری OUPFC) و دوم (تلفات) در اولین بار حل مساله (با هدف کاهش هزینه سوخت و هزینه سرمایه گذاری OUPFC)

$f_{21}, f_{22}$ : مقادیر تابع هدف اول (هزینه سوخت و هزینه سرمایه گذاری OUPFC) و دوم (مجموع تولید) در دومین بار حل مساله (با هدف کاهش تلفات)

در مرحله بعد مساله موردنظر به صورت زیر ۴ بار دیگر حل می‌شود.

(24)

$$\begin{aligned} & \min F_1(x_t, u_t) \\ & st : F_{2t}(x_t, u_t) \leq e_{2it}, \\ & e_{2it} = \max(F_{2t}) - \left( \frac{\max(F_{2t}) - \min(F_{2t})}{q_2} \right) \times i, i = 0, 1, \dots, q_2 \end{aligned}$$

مساوی استفاده می‌شود. در ادامه باید مقدار  $\epsilon$ ها مشخص شود. بهترین روش برای این منظور استفاده از جدول payoff (نتیجه) می‌باشد. برای تعیین اعداد این جدول ابتدا باید هر یک از توابع، منحصرأً بهینه شود (که با علامت  $*$ ) در جدول مشخص می‌شود) سپس به ازای متغیرهای بدست آمده از این تابع مقدار توابع دیگر مشخص شود. این روند را برای تک تک توابع انجام داده و سپس جدولی به فرم جدول (۱) تشکیل می‌شود.

جدول (۱) payoff بدست آمده توسط بهینه منحصراً به فرد هر تابع

	$f_{1,k}$	$f_{2,k}$	$f_{3,k}$	$f_{4,k}$
$f_{1,k}^*$	$f_{1,k}^*(x_1^*)$	$f_{2,k}(x_1^*)$	$f_{3,k}(x_1^*)$	$f_{4,k}(x_1^*)$
$f_{2,k}^*$	$f_{1,k}(x_2^*)$	$f_{2,k}^*(x_2^*)$	$f_{3,k}(x_2^*)$	$f_{4,k}^*(x_2^*)$
$f_{3,k}^*$	$f_{1,k}(x_3^*)$	$f_{2,k}(x_3^*)$	$f_{3,k}^*(x_3^*)$	$f_{4,k}(x_3^*)$
$f_{4,k}^*$	$f_{1,k}(x_4^*)$	$f_{2,k}(x_4^*)$	$f_{3,k}(x_4^*)$	$f_{4,k}^*(x_4^*)$

( $x_i^*$  به معنای متغیرهای بدست آمده از بهینه کردن تابع  $f_{ik}$ )

حال با توجه به ستون سوم و چهارم جدول payoff و معادلات زیر این حدود بدست آورده می‌شوند [۲۷]:

(22)

$$\begin{aligned} e_{2,i,k} &= \max(F_{2,k}) - \left( \frac{\max(F_{2,k}) - \min(F_{2,k})}{q_2} \right) \times i, \quad i = 0, 1, \dots, q_2 \\ e_{3,j,k} &= \min(F_{3,k}) + \left( \frac{\max(F_{3,k}) - \min(F_{3,k})}{q_3} \right) \times j, \quad j = 0, 1, \dots, q_3 \\ e_{4,l,k} &= \max(F_{4,k}) - \left( \frac{\max(F_{4,k}) - \min(F_{4,k})}{q_4} \right) \times l, \quad l = 0, 1, \dots, q_4 \end{aligned}$$

برای بدست آوردن مقدار  $\epsilon$ ها محدوده هر تابع هدف (فاصله بین ماکزیمم و مینیمم هر تابع) به  $q$  فاصله مساوی تقسیم می‌شود. به این ترتیب مسئله بهینه‌سازی به  $(q_2+1) \times (q_3+1) \times (q_4+1)$  زیرمسئله تبدیل می‌شود که به همین تعداد نقاط

$$\mu_{opt} = \max \left( \frac{\sum_{i=1}^p w_i \cdot \mu_i^n}{\sum_{n=1}^M \sum_{i=1}^p w_i \cdot \mu_i^n} \right) \quad (28)$$

where

$$0 \leq w_i \leq 1, \sum_i w_i = 1$$

هر اندازه مقدار  $w_i$  بزرگتر باشد نشان می‌دهد که اهمیت آن تابع نسبت به توابع دیگر برای تصمیم گیرنده بیشتر است.  $w_i$  میتواند بوسیله بهره بردار سیستم قدرت بر اساس اهمیت صنعتی و اقتصادی هر تابع انتخاب شود. در پایان مقدار توابع، موقعیت و تنظیمات بهینه عنصر FACTS بر اساس فاکتور وزن توسط الگوریتم پیشنهادی مشخص می‌شود.

### ۳-۲- انتخاب مکان‌های بهینه برای نصب OUPFC

شاخص‌های مختلفی برای تعیین خطوط بحرانی یک شبکه در مقالات مختلف ارائه شده است. یکی از این شاخص‌ها استفاده از شاخص سریع پایداری ولتاژ<sup>۲</sup> است.

در سالهای اخیر شاخص‌های مختلفی برای پایداری ولتاژ ارائه شده است. شاخص پایداری ولتاژ سریع (FVSI)، شاخصی است که با استفاده از آن می‌توان خطوطی را که از نظر پایداری وضعیت مناسبی ندارند مشخص کرد. این شاخص با استفاده از فرمول ۲۹ و شکل (۱) بدست می‌آید که در این رابطه  $Q$  اندازه توان تزریقی به شین موردنظر است [۲۸]. بر این اساس هر خط از شبکه که مقدار FVSI بیشتری داشته باشد از نظر وضعیت ولتاژ شین‌های متصل به آن بحرانی تلقی شده و می‌توان با نصب OUPFC

هر بار مقدار  $i$  تغییر می‌کند. در این شبیه‌سازی مقدار  $i$  از ۱ تا ۴ در نظر گرفته شده است. در این رابطه مقادیر  $\max()$  و  $\min()$  برای  $f_2$  از ماتریس بدست آمده در مرحله قبل محاسبه می‌شود. در پایان این مرحله ماتریس زیر تشکیل می‌شود. هر ردیف مقادیر تابع هدف اول و دوم را به ازای هر  $i$  نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} f_1^1 & f_2^1 \\ f_1^2 & f_2^2 \\ f_1^3 & f_2^3 \\ f_1^4 & f_2^4 \end{bmatrix} \quad (25)$$

در پایان برای محاسبه بهترین حالت از بین ۴ حالت بدست آمده، از روش فازی استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا با استفاده از رابطه زیر مقادیر تابع عضویت برای هر یک از پاسخهای بدست آمده محاسبه می‌شود.

$$\mu_{i=1,2}^n = \begin{cases} 1 & F_i^n \leq \min(F_i) \\ \frac{\max(F_i) - F_i^n}{\max(F_i) - \min(F_i)} & \min(F_i) \leq F_i^n \leq \max(F_i) \\ 0 & F_i^n \geq \max(F_i) \end{cases} \quad (26)$$

در این مرحله ماتریس زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \mu_1^1 & \mu_2^1 \\ \mu_1^2 & \mu_2^2 \\ \mu_1^3 & \mu_2^3 \\ \mu_1^4 & \mu_2^4 \end{bmatrix} \quad (27)$$

در آخرین مرحله با استفاده از رابطه زیر بهترین پاسخ از بین پاسخهای مدل‌سازی شده بدست می‌آید:

<sup>2</sup>Fast Voltage Stability Index (FVSI)

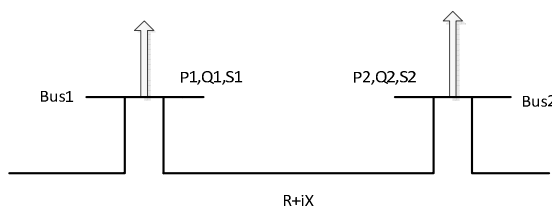


وضعیت آنرا بهبود بخشید.

پایاده‌سازی و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. مکان بهینه عنصر OUPFC و تنظیمات آن به منظور بهینه‌سازی توابع هدف هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه و هزینه نصب ادوات FACTS تعیین می‌گردد. مسأله بهینه‌سازی در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی با مشتقات ناپیوسته (DNLP) می‌باشد. در این مقاله مسئله بهینه‌سازی DNLP با استفاده از حل‌کننده CONOPT حل می‌گردد.

$$f_{vsi} = \frac{4Z^2 Q_j}{V_i^2 X} \quad (29)$$

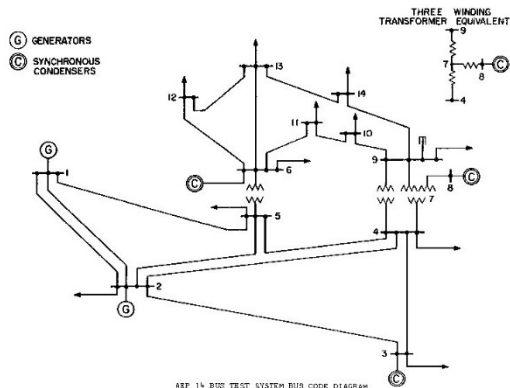
$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$



شکل (۱) نمایی از یک خط با دو شین ابتدا و انتها جهت محاسبه شاخص FVSI

شکل (۲) شبکه استاندارد ۱۴ شینه IEEE را نشان می‌دهد که دارای ۲۰ خط انتقال و ۵ ژنراتور روی شینه‌های ۱، ۲، ۳، ۶ و ۸ می‌باشد [۳۰]. مشخصات فنی و هزینه‌های واحدهای تولیدی شبکه در جدول (۱) و اطلاعات بارهای اکتیو و راکتیو ۲۴ ساعته برای ۱۴ شین بترتیب در جدولهای (۲) و (۳) آورده شده است. لازم بتوضیح است که بار پیک و پایه مربوط به ساعت ۲۱ می‌باشد.

در شبیه‌سازی ابتدا با استفاده از نتایج بدست آمده از حل مساله در حالت اولیه، مقادیر FVSI محاسبه می‌شود. سپس در بخش بعد با استفاده از مقادیر بدست آمده، خطوط شبکه اولویت‌بندی شده و به ترتیب اولویت مساله پخش بار دینامیکی در حضور OUPFC برای آن حل می‌شود. در این تحقیق مساله تنها برای ۴ کاندید اول حل شده و از بین این ۴ خط، بهترین پاسخ تعیین می‌شود.



#### ۴- شبیه‌سازی کامپیوتری

الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۱۴ شینه IEEE

شکل ۲- شبکه استاندارد ۱۴ شینه IEEE [۳۰]

جدول ۱- مشخصات فنی و هزینه‌های واحدهای تولیدی شبکه

	Pmin	Pmax	RU	RD	a	b	c	ei	fi	P0	Qmin	Qmax
1	0	332.4	100	100	0	20	0.043029	30	0.05	232.4	0	10

2	0	140	50	50	0	20	0.25	30	0.05	40	-40	50
3	0	100	30	30	0	40	0.1	30	0.05	0	0	40
6	0	100	30	30	0	40	0.1	30	0.05	0	-6	24
8	0	100	30	30	0	40	0.1	30	0.05	0	-6	24

نقطه شروع مطالعه در جدول (۱) به عنوان P0 مشخص شده است که میزان تولید هر ژنراتور را در نقطه شروع نشان می‌دهد. داشتن اطلاعات نقطه شروع برای چک کردن قیود مربوط به نرخ افزایش/کاهش خروجی ژنراتورها ضروری است.

جدول ۲- اطلاعات بار اکتیو ساعتی روی شینها برحسب مگاوات (MW)

شین/ساعت	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
t0	15.18	65.90	33.44	5.32	7.84	20.64	6.30	2.45	4.27	9.44	10.42
t1	15.18	65.90	33.44	5.32	7.84	20.64	6.30	2.45	4.27	9.44	10.42
t2	14.32	62.18	31.55	5.02	7.39	19.47	5.94	2.31	4.03	8.91	9.84
t3	12.61	54.74	27.77	4.42	6.51	17.14	5.23	2.03	3.54	7.84	8.66
t4	8.68	37.66	19.11	3.04	4.48	11.79	3.60	1.40	2.44	5.40	5.96
t5	10.84	47.07	23.89	3.80	5.60	14.74	4.50	1.75	3.05	6.75	7.45
t6	13.01	56.49	28.66	4.56	6.72	17.69	5.40	2.10	3.66	8.10	8.93
t7	15.18	65.90	33.44	5.32	7.84	20.64	6.30	2.45	4.27	9.44	10.42
t8	16.92	73.46	37.27	5.93	8.73	23.00	7.02	2.73	4.76	10.53	11.62
t9	17.79	77.23	39.19	6.23	9.18	24.19	7.38	2.87	5.00	11.07	12.22
t10	19.09	82.87	42.05	6.69	9.85	25.95	7.92	3.08	5.37	11.88	13.11
t11	19.30	83.80	42.52	6.76	9.96	26.24	8.01	3.11	5.43	12.01	13.26
t12	18.22	79.09	40.13	6.38	9.40	24.77	7.56	2.94	5.12	11.34	12.51
t13	17.35	75.32	38.22	6.08	8.95	23.59	7.20	2.80	4.88	10.79	11.91
t14	16.49	71.59	36.33	5.78	8.51	22.42	6.84	2.66	4.64	10.26	11.32
t15	19.09	82.87	42.05	6.69	9.85	25.95	7.92	3.08	5.37	11.88	13.11
t16	19.52	84.73	42.99	6.84	10.07	26.53	8.10	3.15	5.49	12.14	13.40
t17	18.45	80.08	40.63	6.46	9.52	25.08	7.65	2.98	5.19	11.48	12.67
t18	19.30	83.80	42.52	6.76	9.96	26.24	8.01	3.11	5.43	12.01	13.26
t19	20.39	88.51	44.91	7.14	10.52	27.72	8.46	3.29	5.73	12.68	14.00
t20	21.26	92.28	46.83	7.45	10.97	28.90	8.82	3.43	5.98	13.23	14.60
t21	21.70	94.20	47.80	7.60	11.20	29.50	9.00	3.50	6.10	13.50	14.90
t22	19.52	84.73	42.99	6.84	10.07	26.53	8.10	3.15	5.49	12.14	13.40
t23	18.88	81.94	41.58	6.61	9.74	25.66	7.83	3.04	5.31	11.74	12.96
t24	17.79	77.23	39.19	6.23	9.18	24.19	7.38	2.87	5.00	11.07	12.22

جدول ۳- اطلاعات بار راکتیو ساعتی روی شینها برحسب مگاوار (MVAR)

شین/ساعت	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
t0	8.88	13.29	-2.73	1.12	5.25	11.61	4.06	1.26	1.12	4.06	3.50
t1	8.88	13.29	-2.73	1.12	5.25	11.61	4.06	1.26	1.12	4.06	3.50
t2	8.38	12.54	-2.57	1.06	4.95	10.96	3.83	1.19	1.06	3.83	3.30
t3	7.38	11.04	-2.27	0.93	4.36	9.65	3.37	1.05	0.93	3.37	2.91
t4	5.08	7.60	-1.56	0.64	3.00	6.64	2.32	0.72	0.64	2.32	2.00
t5	6.35	9.49	-1.95	0.80	3.75	8.30	2.90	0.90	0.80	2.90	2.50
t6	7.62	11.39	-2.34	0.96	4.50	9.95	3.48	1.08	0.96	3.48	3.00
t7	8.88	13.29	-2.73	1.12	5.25	11.61	4.06	1.26	1.12	4.06	3.50
t8	9.90	14.82	-3.04	1.25	5.85	12.94	4.52	1.40	1.25	4.52	3.90
t9	10.41	15.58	-3.20	1.31	6.15	13.61	4.76	1.48	1.31	4.76	4.10
t10	11.17	16.71	-3.43	1.41	6.60	14.60	5.10	1.58	1.41	5.10	4.40
t11	11.30	16.90	-3.47	1.42	6.67	14.77	5.16	1.60	1.42	5.16	4.45
t12	10.66	15.95	-3.27	1.34	6.30	13.94	4.87	1.51	1.34	4.87	4.20
t13	10.15	15.19	-3.12	1.28	6.00	13.27	4.64	1.44	1.28	4.64	4.00
t14	9.65	14.44	-2.96	1.22	5.70	12.62	4.41	1.37	1.22	4.41	3.80
t15	11.17	16.71	-3.43	1.41	6.60	14.60	5.10	1.58	1.41	5.10	4.40
t16	11.42	17.09	-3.51	1.44	6.75	14.93	5.22	1.62	1.44	5.22	4.50
t17	10.80	16.15	-3.32	1.36	6.38	14.11	4.93	1.53	1.36	4.93	4.25
t18	11.30	16.90	-3.47	1.42	6.67	14.77	5.16	1.60	1.42	5.16	4.45
t19	11.93	17.85	-3.66	1.50	7.05	15.60	5.45	1.69	1.50	5.45	4.70
t20	12.44	18.61	-3.82	1.57	7.35	16.26	5.68	1.76	1.57	5.68	4.90
t21	12.70	19.00	-3.90	1.60	7.50	16.60	5.80	1.80	1.60	5.80	5.00
t22	11.42	17.09	-3.51	1.44	6.75	14.93	5.22	1.62	1.44	5.22	4.50
t23	11.05	16.53	-3.39	1.39	6.52	14.44	5.05	1.57	1.39	5.05	4.35
t24	10.41	15.58	-3.20	1.31	6.15	13.61	4.76	1.48	1.31	4.76	4.10

در شین‌های اطراف محل نصب دارد. پارامترهای مورد نیاز برای حل مساله از جمله محدودیت‌های OUPFC در جدول (۴) آمده است.

در این مقاله حل مسئله در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاه‌ها (SCUC) و جایابی بهینه عنصر OUPFC توأم با هم در دو حالت با تابع هدف تکی و ترکیبی انجام می‌گیرد. انتظار می‌رود نتایج این مطالعات بیانگر بهبود وضعیت بهره‌برداری از شبکه پس از نصب OUPFC در شبکه باشد. همچنین انتظار می‌رود روش پیشنهادی در حالت تابع هدف ترکیبی، هم بتواند هزینه بهره‌برداری و هم تلفات شبکه را کاهش دهد. ضمن اینکه استفاده از OUPFC تاثیر زیادی در بهبود وضعیت ولتاژ شبکه

جدول ۴- محدودیت‌های عنصر OUPFC و سایر پارامترها

t	24
q	4
Y	5
$\rho^{\min}$	-180°
$\rho^{\max}$	180°
$r^{\min}$	0
$r^{\max}$	0.15
$\sigma^{\min}$	-20°
$\sigma^{\max}$	20°

در ابتدا UC بدون حضور OUPFC و بمنظور کاهش هزینه انجام شده است که در آن قیود امنیت شبکه نیز لحاظ شده است یعنی شامل حل مساله پخش بار دینامیکی برای شبکه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین هزینه راه اندازی نیز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل برای شاخص‌های شبکه در جدول (۶) و نتایج UC در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵- نتایج UC قبل از نصب OUPFC (1: روشن، 0: خاموش)

شین ژنراتوری/ساعت	1	2	3	6	8
t0	1	1	1	1	1
t1	1	1	1	1	1
t2	1	1	1	0	1
t3	1	1	1	0	0
t4	1	1	1	0	0
t5	1	1	1	0	0
t6	1	1	1	0	0
t7	1	1	1	0	1
t8	1	1	1	0	1
t9	1	1	1	0	1
t10	1	1	1	0	1
t11	1	1	1	0	1
t12	1	1	1	0	0
t13	1	1	1	0	0
t14	1	1	1	0	0
t15	1	1	1	0	0
t16	1	1	1	0	1
t17	1	1	1	1	1
t18	1	1	1	1	1
t19	1	1	1	1	1
t20	1	1	1	1	1
t21	1	1	1	1	1
t22	1	1	1	1	1
t23	1	1	1	0	1
t24	1	1	0	0	0

جدول ۶- شاخص‌های شبکه بدون حضور OUPFC

با هدف حداقل سازی هزینه	نوع تابع هدف
149648.95	هزینه (\$)
188.09	تلفات (MW)
1.154 (خط ۱-۵)	حداکثر مقدار fvs <sub>i</sub>

هدف تلفات شبکه بصورت تک هدفه بهینه خواهد شد. در سناریوی سوم، با استفاده از روش محدودیت اپسیلون مسئله SCUC و بمنظور کاهش هزینه و تلفات بصورت چند هدفه تحلیل خواهد شد. برای حالت چند هدفه ۴ اپسیلون در نظر گرفته شده است و مقادیر چند هدفه محاسبه شده و با استفاده از روش فازی بهترین پاسخ از بین ۴ حالت بررسی شده بدست می آید. ضرایب  $w_1$  و  $w_2$  برابر  $0/5$  در نظر گرفته شده است. مقادیر شاخص های شبکه برای هر سه سناریو در جدول (۷) نشان داده شده است.

با توجه به اینکه در هر ساعت مقدار FVSI متفاوت است، لذا این مقدار برای ساعت ۲۱ یعنی اوج بار محاسبه شده است. لذا با نصب OUPFC روی خط (۵-۱) از شبکه که بیشترین مقدار FVSI را دارد می توان وضعیت ولتاژ شینهای شبکه بخصوص شینهای بحرانی ۱ و ۵ را بهبود بخشید. در این مقاله، مسئله در مدار قرار گرفتن مقید به امنیت نیروگاهها (SCUC) با حضور عنصر OUPFC در سه سناریو مختلف حل شده و مورد بررسی قرار گرفته است. سناریوی اول بصورت تک هدفه و بمنظور کاهش هزینه می باشد و در سناریوی دوم تابع

جدول ۷- شاخصهای شبکه در سناریوهای مختلف و با حضور OUPFC

چند هدفه				تک هدفه		نوع تابع هدف
i4	i3	i2	i1	با هدف حداقل سازی تلفات kw	با هدف حداقل سازی هزینه \$/h	
155887.38	153676.32	148268.06	146307.72	242275.57	144082.18	سناریو ۱: هزینه
142.55	178.76	214.96	251.17	142.55	287.38	سناریو ۲: تلفات
0.424	0.121	0.188	0.268	-	-	سناریو ۳: چندهدفه (مقادیر اپسیلون)
1.059 (خط ۱-۵)	0.880 (خط ۱-۵)	0.595 (خط ۱-۵)	0.251 (خط ۱-۵)	0.601 (خط ۱-۵)	0.492 (خط ۱-۵)	حداکثر مقدار fvsi

همانطور که از جدول (۷) مشاهده می گردد، حالت i4 به عنوان بهینه ترین حالت انتخاب شده است.

نتایج UC در بهینه سازی چند هدفه و حالت i4 و با حضور OUPFC در جدول (۸) آورده شده است

جدول ۸- نتایج UC با حضور OUPFC و در بهینه سازی

چندهدفه (۱: روشن، ۰: خاموش)

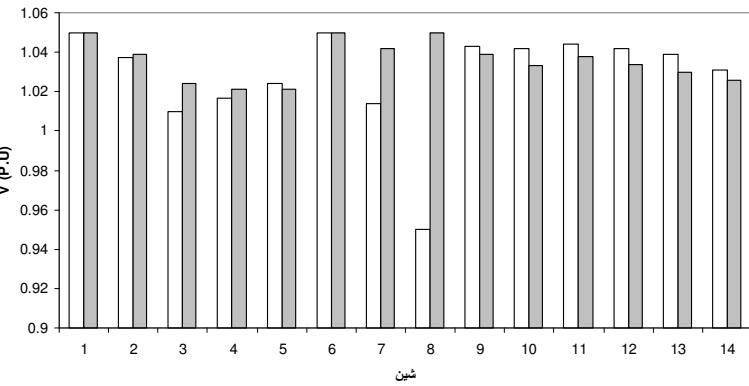
جدول ۸- نتایج UC با حضور OUPFC و در بهینه سازی

چندهدفه (1: روشن، 0: خاموش)

شین ژنراتوری/ساعت	1	2	3	6	8
t0	1	1	1	1	1
t1	1	1	1	1	1
t2	1	1	1	1	1
t3	1	1	1	1	1
t4	1	1	1	1	1
t5	1	1	1	1	1
t6	1	1	1	1	1
t7	1	1	1	1	1
t8	1	1	1	1	1
t9	1	1	1	1	1
t10	1	1	1	1	1
t11	1	1	1	1	1
t12	1	1	1	1	1
t13	1	1	1	1	1
t14	1	1	1	1	1
t15	1	1	1	1	1
t16	1	1	1	1	1
t17	1	1	1	1	1
t18	1	1	1	1	1
t19	1	1	1	1	1
t20	1	1	1	1	1
t21	1	1	1	1	1
t22	1	1	1	1	1
t23	1	1	1	1	1
t24	1	1	1	1	1

جهت نشان دادن بهبود وضعیت ولتاژ شینها، نتایج حاصل بدون حضور OUPFC با نتایج حاصل با حضور OUPFC در بهینه سازی چند هدفه و حالت i4 مقایسه شده نتایج حاصل نشان دهنده مسطح تر شدن پروفیل ولتاژ با حضور عنصر OUPFC می باشد.

با OUPFC بدون OUPFC



شکل ۲- مقایسه پروفیل ولتاژ با و بدون حضور OUPFC

### نتیجه گیری

در این مقاله شاخص‌های بهره‌برداری شامل هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه و هزینه نصب عنصر OUPFC به‌عنوان توابع هدف مسأله SCUC مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای تعیین مکان بهینه عنصر OUPFC ابتدا مسئله UC مبتنی بر پخش بار بهینه (OPF) بمنظور تعیین خطوطی که دارای بیشترین مقدار FVSI هستند انجام می‌شود. مسئله UC بصورت ۲۴ ساعته بوده و با توجه به اینکه در هر ساعت مقدار FVSI متفاوت بدست می‌آید، لذا این مقدار برای ساعت ۲۱ یعنی اوج بار محاسبه شده است و بدین ترتیب مکانهای کاندید نصب عنصر OUPFC بدست می‌آید.

الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۱۴ شینه IEEE پیاده‌سازی و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که OUPFC قادر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش تلفات شبکه و بهبود شاخص FVSI می‌باشد. در این مقاله مسأله بهینه‌سازی در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی با مشتقات ناپیوسته (DNLP) بوده و

*systems*”, Elect Power Syst Res, Vol 69, pp 227-248.

با استفاده از حل کننده CONOPT نرم افزار GAMS حل شده است.

- [10] N. Laothumyingyong, P. Damrongkulkamjorn, 2010, “*Security-Constrained Unit Commitment using Mixed-Integer Programming with Benders Decomposition*”, Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology, pp. 19-21.
- [11] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Gerald B. Sheblé, 2014, “*Power Generation, Operation, and Control*” Published by John Wiley & Sons, Third edition.
- [12] Y. Fu, M. Shahidehpour, Z. Li, 2005, “*Security-constrained unit commitment with ac constraints*”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 1538-1550.
- [13] Y. Fu, M. Shahidehpour, Z. Li, 2006, “*AC contingency dispatch based on security constrained unit commitment*”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 897-908.
- [14] S. Sreejith, S.P. Simon, M.P. Selvan, 2015, “*Analysis of FACTS devices on Security Constrained Unit Commitment problem*”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 66, pp. 280-293.
- [15] A. Kazemi, M. Najafi, 2004, “*Cost Reduction and Transmission Security Augment in in Unit Commitment Using UPFC*”, 19<sup>th</sup> International Power System Conference (PSC).
- [16] M. Haili, M. SHahidepour, 1999, “*Unit commitment with transmission security And Voltage Constraints*”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp.757-764
- [17] S. Vemmuri, L. Lemonidis, 1992, “*Fuel Constrained Unit Commitment*”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp.410-416
- [18] A. Ahmadi-Khatir, M. Bozorg, 2013, “*Probabilistic Spinning Reserve Provision Model in Multi Control Zone Power System*”, IEEE Transaction on Power Systems, vol.28, No 3 ,pp2819-2827
- [19] E. Mashhoor, S.M. Moghadas-Tafreshi, 2011, “*Bidding Strategy Of Virtual Power Plant for Participating in Energy And Spinning reserve Market Problem Formulation*”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 26, No. 2, pp949-956.
- [20] N.P. Padhy, 2004, “*unit commitment-A bibliographical survey*”, IEEE Transaction on

## منابع

- [1] M. Shahidehpour, W.F. Tinney, Y. Fu, 2005, “*Impact of Security on Power Systems Operation*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 11.
- [2] W. J. Lyman, 1930, “*Controlling Power Flow with Phase-Shifting Equipment*”, AIEE Trans. Vol. 49, pp. 825-831.
- [3] A. Nabavi Niaki, R. Iravani, and M. Noroozian, 2008, “*Power-flow model and steady-state analysis of the hybrid flow controller*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp. 2330-2338.
- [4] A. Lashkar Ara, A. Kazemi, and S.A. Nabavi Niaki, 2011, “*Modelling of Optimal Unified Power Flow Controller (OUPFC) for Optimal Steady-State Performance of Power Systems*”, Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 2, pp. 1325-1333.
- [5] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, 2000, “*Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*”, Wiley-IEEE Press.
- [6] M.R. Iravani, D. Maratukulam, 1994, “*Review of Semiconductor-Controlled (Static) Phase Shifters for Power System Applications*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4.
- [7] Brian K. Johnson, Giri Venkataramanan, 1998, “*A Hybrid Solid State Phase Shifter Using PWM AC Converters*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4.
- [8] C. Rehtanz, 2007, “*Dynamic power flow controllers for transmission corridors*”, iREP Symposium- Bulk Power System Dynamics and Control – VII, Revitalizing Operational Reliability, pp. 1-9.
- [9] H.Y. Yamin, 2004, “*Review on methods of generation scheduling in electric power*

Programming, Washington, DC 20433, USA, Vol.31, pp. 153-191.

- [30] Power Systems Test Case, The University of Washington Archive <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>, [Accessed 15/7/2008].

## رزومه

رفعت صبورسال (۱۳۵۸) در دزفول متولد شد. تحصیلات

دانشگاهی خود را در مقطع

کارشناسی مهندسی برق -

الکترونیک در سال (۱۳۸۴)، از

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول،

اخذ نمود و در حال حاضر دانشجوی



کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت در دانشگاه آزاد

اسلامی واحد دزفول می باشد. فعالیت پژوهشی و علاقه -

مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت و ادوات

فکس می باشد.

افشین لشکرآرا در تهران متولد شده

است (۱۳۵۲). تحصیلات دانشگاهی خود را

در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و

دکترای خود را در سالهای (۱۳۷۴)،

(۱۳۸۰) و (۱۳۸۹) بترتیب از دانشگاه



مازندران و دانشگاه علم و صنعت ایران در رشته مهندسی

برق - قدرت اخذ نموده است. ایشان هم اکنون عضو ارشد

انجمن مهندسی برق و الکترونیک امریکا ( IEEE Senior Member ) و از سال (۱۳۸۰) تاکنون عضو هیأت علمی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول می‌باشند. زمینه تحقیقاتی

ایشان شبکه های هوشمند، بهینه سازی سیستمهای قدرت،

مطالعات استاتیکی و دینامیکی سیستمهای قدرت، پایداری

و کنترل و ادوات FACTS می‌باشد.

Power Systems, Vol.19, No. 2, PP 1196-1205.

- [21] D. Han, J. Jian, L. Yang, 2014, "Outer Approximation and Outer inner Approximation Approaches For Unit Commitment Problem", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 29, No. 2, pp. 505-513.

- [22] S.An, Condren, J. and T. W. Gedra, 2007, "An Ideal Transformer UPFC Model, OPF First-Order Sensitivities, and Application to Screening for Optimal UPFC Locations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 68-75.

- [23] A.Lashkar Ara, A. Kazemi, S. A. Nabavi Niaki, 2009, "Improvement of Phase Shifting Transformer Operation by Hybrid Arrangement with UPFC", Intenational Review of Electrical Engineering (IREE), Vol. 4, No. 5, pp. 1102-1109.

- [24] A. Lashkar Ara, A. H. Rahmani, E. Parham, M. Behshad, 2012, "Multi-objective dynamic optimal power flow through the  $\epsilon$ -constraint method with non-smooth and non-convex fuel cost functions", Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research Vol. 29, No.2, pp. 1003-1014.

- [25] A. Lashkar Ara, A. Kazemi, M. Behshad, 2013, "Improving power systems operation through multiobjective optimal location of optimal uni ed power ow controller" Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 21, pp. 1893 - 1908.

- [26] M.A. Abido, 2002, "Optimal power flow using particle swarm optimization", Electr Power Energy Syst, Vol. 24, No. 7, pp. 563-571.

- [27] G. Mavrotas, 2009, "Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems", [Applied Mathematics and Computation](#), Vol. 213, No. 2, pp. 455-465.

- [28] R. Avinash, G.K. Savyasachi, N. Gowtham, P. Rakshith, 2015, "Optimal Location of STATCOMS using FVSI", International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology Vol. 2, No. 6.

- [29] A. Drud, 1985, "CONOPT: A GRG Coed for Large Sparse Dynamic Nonlinear Optimization Problems", Development Research Department, Mathematical









