

قیمت گذاری توان راکتیو در بازارهای برق با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه

روح الله فلاحت کار

بهنام میرزائیان محمدحسن فلاحت کار

شرکت مدیریت تولید برق شهید منتظر قائم

چکیده

با توجه به لزوم تجدید ساختار سیستم قدرت و رقابتی شدن بازار برق، بحث قیمت‌دهی توان راکتیو در بازار برق مطرح می‌شود. که در این بررسی روش‌های قیمت‌دهی توان راکتیو مطرح و دو روش مهم در این مطالعه یعنی روش هزینه‌ی فرصت و مثلث توان تغییر یافته مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه ارائه‌ی این روش‌ها نیاز به داشتن درک صحیحی از منحنی قابلیت عملکرد ژنراتورها می‌باشد، در مورد این منحنی نیز توضیح داده شده است. شبیه‌سازی بر روی سیستم ۱۴ شینه‌ی استاندارد IEEE انجام شده و با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه (ACO) بهینه‌سازی در سیستم قدرت به منظور حداقل سازی هزینه‌ی توان‌های اکتیو و راکتیو انجام شده است. به منظور بررسی، نتایج الگوریتم کلونی مورچه با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک نیز مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی توان اکتیو و راکتیو، الگوریتم کلونی مورچه، بازار برق

۱- مقدمه

خیلی صدمه‌آور و پرهزینه باشد. کنترل توان راکتیو یک ابزار اساسی در حفظ کیفیت تغذیه می‌باشد، بخصوص برای جلوگیری از اغتشاشات ولتاژ که از عمومی‌ترین نوع اغتشاش می‌باشد انواع معین از بارهای صنعتی از آن جمله کوره‌های الکتریکی، دستگاه‌های حفاری و دستگاه‌های جوشکاری با دریافت توان اکتیو و راکتیو از سیستم تغذیه تغییرات سریع و وسیعی را بر آن تحمیل می‌نمایند و اغلب لازم است که با به کار گرفتن وسایل تثبیت‌کننده ولتاژ، نظیر جبران‌کننده‌های توان راکتیو استاتیکی این تغییرات را کاهش داد. از جمله‌ی این مطالعات در مرجع [۱] از روش برنامه‌ریزی خطی به منظور حداقل سازی هزینه‌ی توان اکتیو پرداخته شده است، در این بررسی تابع هزینه‌ی تولیدی نیروگاه‌ها و مقدار آلاینده‌ی تولیدی واحدها به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است در این بررسی تنها توان اکتیو تولیدی واحدها به عنوان متغیر کنترلی در نظر گرفته شده است. قراردادهای اقتصادی میان شرکت‌ها و تجارت انرژی و توان از ژنراتورها به شرکت‌های

با افزایش بار در شبکه‌های سیستم قدرت مسئله‌ی تلفات و پایداری سیستم قدرت یکی از مسائل اساسی در برنامه‌ریزی و عملکرد سیستم‌های قدرت تبدیل شده است. وابستگی پروفایل ولتاژ در سیستم قدرت به توزیع توان راکتیو در واقع عامل مهمی است که لزوم بهینه‌سازی توان راکتیو را توجیه می‌کند. همچنین همان‌طور که مشخص است تلفات در سیستم توزیع رابطه‌ای مستقیم با توزیع توان راکتیو در سیستم قدرت دارد. بنابراین برای طراحی بهینه سیستم قدرت و برای استفاده‌ی بهینه از سیستم‌های قدرت موجود و پرهیز از ساخت خطوط جدید و هزینه‌بر ناگزیر به بهینه‌سازی توان راکتیو در سیستم قدرت هستیم. به واسطه مصرف روزافزون وسایل الکترونیک و همچنین رشد پیوسته صنایع، نیاز به داشتن تغذیه باکیفیت بالا افزایش یافته است. کاهش ولتاژ و فرکانس اثرات نامطلوبی را بر روی چنین بارهایی اعمال می‌کند و قطع تغذیه می‌تواند

واحدی وجود داشته و عموماً به صورت یک تابع درجه ۲ از توان تولیدی نیروگاه بیان می‌گردد. در مورد توان راکتیو با توجه به ابهاماتی که در تعریف دقیق این توان در حالت کلی (محیط‌های هارمونیک و نامتعادل و...) وجود دارد، از روش‌های متعددی به منظور بیان این هزینه استفاده می‌گردد.

۳-۱- هزینه توان اکتیو

با تولید توان بیشتر، سوخت بیشتری مصرف شده و هزینه‌ی تولید توان اکتیو نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بر اساس مقدار توان اکتیو تولیدی می‌توان این هزینه را برآورد کرد.

$$C_{gpi}(P_{Gi}) = \alpha + \beta P_{Gi} + \gamma P_{Gi}^2 \quad (3)$$

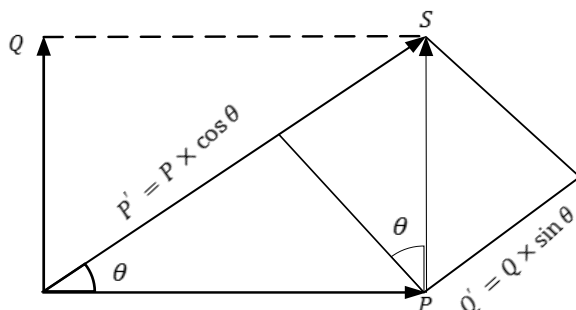
تابع هزینه توان اکتیو در باس i ام بصورت بالا می‌باشد که α ، β و γ ضرایبی ثابت وابسته به نوع نیروگاه می‌باشد.

۳-۲- تعیین قیمت توان راکتیو

با توجه به ابهامات موجود در تعریف توان راکتیو در حالت کلی، روش‌های مورد استفاده برای محاسبه‌ی هزینه‌ی توان راکتیو نیز متنوع می‌باشد. در این قسمت از دو روش مورد استفاده برای محاسبه‌ی این هزینه استفاده شده است.

۳-۲-۱- روش بر مبنای مثلث توان اصلاح شده

برای محاسبه‌ی هزینه‌ی توان راکتیو بر اساس این روش نمودار مثلث توان ارائه شده و متغیرهای جدید تعریف شده در آن که به صورت شکل ۳ است را در نظر می‌گیریم [۶]. همانطور که بر روی شکل هم مشخص شده است، مولفه‌های ثانویه‌ی مربوط به توانهای اکتیو و راکتیو را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:



شکل ۳: مثلث توان تغییر یافته

با توجه به شکل ۳ داریم:

برق، در حالت طبیعی مطابق با قیمت‌های محاسبه‌شده از هزینه‌ی نهایی سیستم انجام می‌شود که این قیمت‌ها می‌باید ارزش انتقال توان اکتیو و راکتیو را منعکس نمایند. در مرجع [۲] به منظور غلبه بر مشکلات این روش از ضرایب حاشیه‌ی قیمت استفاده شده است، هرچند که این قیمت‌ها تنها جزئی از هزینه‌ی توان راکتیو را شامل می‌شوند [۳]. در مرجع [۴] نشان داده شده است که قیمت‌های حاشیه‌ای مربوط به توان راکتیو در حدود 1% قیمت حاشیه‌ای توان اکتیو است.

۳-۲- بهینه‌سازی توان‌های اکتیو و راکتیو

با در نظر گرفتن هزینه‌ی توان راکتیو، مسئله به صورت چندهدفه حل می‌شود که در آن هم هزینه‌ی تولید توان اکتیو و هم توان راکتیو در نظر گرفته شده است. در این حالت مسئله به صورت کنترل بهینه هزینه توان اکتیو و راکتیو تبدیل شده است. (۱)

$$P(i) = P_G(i) - P_D(i) = \sum_{j=1}^{n_b} V_i V_j (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j))$$

$$Q(i) = Q_G(i) - Q_D(i) = \sum_{j=1}^{n_b} V_i V_j (B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j))$$

که در آن $P(i)$ و $Q(i)$: توان اکتیو و راکتیو تزریقی به باس i می‌باشد، که تفاوت توان اکتیو و راکتیو تولیدی ($P_G(i)$) و مصرفی ($P_D(i)$) و $Q_D(i)$ در شین مربوطه می‌باشد. V_i, δ_i : به ترتیب بیانگر فاز و دامنه ولتاژ در شین i می‌باشند. B, G : به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی ماتریس Y_{bus} می‌باشند.

$$P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max}$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$$

$$N^{\min} \leq N \leq N^{\max}$$

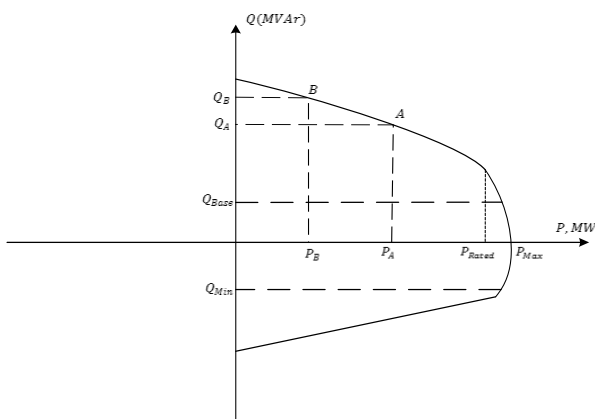
$$Q_{SGC}^{\min} \leq Q_{SGC} \leq Q_{SGC}^{\max} \quad (2)$$

که در آن S بیانگر شین مرجع می‌باشد. G بیانگر شین‌های ژنراتوری به جز شین مبنا موجود در سیستم و C بیانگر شین‌های باری می‌باشد که دارای جبرانسازی توان راکتیو می‌باشند.

۳-۲- روش‌های قیمت‌گذاری توان اکتیو و راکتیو

در مورد تعیین قیمت توان اکتیو با توجه به اینکه قسمت عمده‌ی آن را هزینه تأمین سوخت تشکیل می‌دهد تعریف

ناحیه‌ی بین (P_A, Q_{base}) قرار بگیرد، در این حالت بدون نیاز به تغییر توان اکتیو تولیدی ژنراتور از P_A می‌توان توان راکتیو تولیدی ژنراتور را از Q_{base} به Q_A افزایش داد. در این حالت، اما تلفات در سیم‌پیچ‌ها افزایش یافته و تلفات افزایش خواهد یافت. در صورتی که ژنراتور بر روی مرز منحنی عملکردی قرار بگیرد، هرگونه افزایش در توان راکتیو متناظر با کاهش توان اکتیو خواهد بود به نحوی که بتوان محدودیت گرمایی سیم‌پیچ‌ها را حفظ کرد. سرمایه‌ی از دست رفته در نتیجه‌ی کاهش توان اکتیو تولیدی به منظور افزایش توان راکتیو که یک موضوع بسیار مهم می‌باشد را به عنوان هزینه‌ی فرصت از دست رفته در نظر می‌گیریم.



شکل ۴: منحنی توانمندی ژنراتور

بنابراین سه ناحیه‌ی عملکردی بر اساس توان راکتیو تولیدی ژنراتور به شرح زیر بیان می‌گردد:

ناحیه‌ی ۱: $(0 < Q < Q_{Base})$: توان راکتیو تولیدی در این ناحیه به منظور مصرف تجهیزات داخلی خود ژنراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ناحیه‌ی ۲: توان راکتیو بین (Q_{Base}, Q_A) و $(0, Q_{Min})$: هنگامی که ژنراتور در این بازه به تولید یا جذب توان راکتیو می‌پردازد در این حالت هزینه‌ی توان راکتیو شامل هزینه‌ی مورد نیاز برای در دسترس بودن نیروگاه و تلفات ایجاد شده در اجزاء می‌باشد.

ناحیه‌ی ۳: توان راکتیو تولیدی بین (Q_A, Q_B) : هنگامی که ژنراتور در این ناحیه کار می‌کند، در این حالت باید هزینه‌ی مربوط به از دست رفتن فرصت تولید توان اکتیو (هزینه‌ی فرصت) را نیز بپردازد، در حالی که هزینه‌های ثانویه قبلی (تلفات و دسترس‌پذیری) را نیز بپردازد. از نظر ریاضی ساختار

$$P' + Q' = S \rightarrow Cost(P') + Cost(Q') = Cost(S) \quad (4)$$

در این حالت هزینه‌ی مربوط به توان اکتیو برای ژنراتور نام به صورت فرمول (۵) محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} Cost(P'_i) &= Cost(P_i \cos(\theta_i)) \\ &= \alpha_i + \beta_i \cos(\theta_i)P_i + \gamma_i \cos^2(\theta_i)P_i^2 \\ &= \alpha_i + \beta'_i P_i + \gamma'_i P_i^2 \end{aligned} \quad (5)$$

با توجه به رابطه‌ی (۵) می‌توان ضرایب مربوط به توان اکتیو واحد نیروگاهی نام را با توجه به نقطه‌ی کار (مقدار توان راکتیو خروجی ژنراتور) تعیین کرد. بر همین اساس برای توان راکتیو خروجی ژنراتور می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} Cost(Q'_i) &= Cost(S \sin^2 \theta) = Cost\left(\frac{P}{\cos \theta} \sin^2 \theta\right) \\ &= \alpha_i + \beta_i \sin(\theta_i)Q_i + \gamma_i \sin^2(\theta_i)Q_i^2 \\ &= \alpha_i + \beta''_i Q_i + \gamma''_i Q_i^2 \end{aligned} \quad (6)$$

با توجه به رابطه‌ی (۶) می‌توان دید که هزینه‌ی توان راکتیو به صورت یک تابع درجه‌ی ۲ از توان راکتیو تولید واحد بوده و ضرایب آن با توجه به نقطه‌ی کار تعیین می‌گردد.

۳-۲-۲- روش بر مبنای هزینه‌ی فرصت

قبل از توضیح این روش، ابتدا به تعریف دو مفهوم برای بیان این روش می‌پردازیم [۵]:

الف) تابع پرداخت مورد انتظار (EPF): ژنراتورهای تأمین کننده‌ی سرویس‌های توان راکتیو، هزینه‌های مختلفی بسته به رژیم مورد استفاده برای بهره‌برداری آنها متحمل می‌شوند این هزینه‌ها در قالب EPF بیان می‌گردند.

ب) هزینه‌ی تلفات: این هزینه یکی از بخش‌های تابع پرداخت مورد انتظار EPF است. توان راکتیو تأمین شده و یا جذب شده توسط ژنراتور، منجر به افزایش تلفات توان حقیقی در سیم‌پیچ‌های تحریک خواهد شد. که این توان تلف شده تابعی غیرخطی از توان راکتیو ژنراتور است.

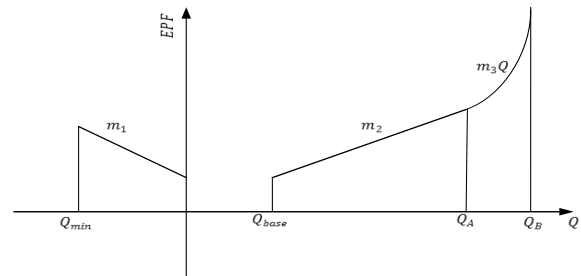
منحنی توانمندی یک ژنراتور نمونه در شکل (۴) آورده شده است. حدود این نمودار بر اساس حد مجاز جریان آرمیچر، و همچنین جریان سیم‌پیچ‌های تحریک و حد زیر تحریک تعیین می‌گردد. در این نمودار Q_{base} توان راکتیو مورد نیاز برای تجهیزات جانبی ژنراتور می‌باشد. اگر نقطه‌ی عملکردی در

مورد استفاده برای پیشنهاد توان راکتیو (EPF) به صورت (۶) بیان می‌گردد:

$$EPF_i = a_{0i} + \int_{Q_{min}}^0 m_{1i} dQ_i + \int_{Q_{base}}^{Q_A} m_{2i} dQ_i + \int_{Q_A}^{Q_B} m_{3i} Q_i dQ_i \quad (6)$$

که a_0 : مؤلفه‌ی قیمت در دسترس بودن (\$)، m_1 : مؤلفه‌ی قیمت پیشنهادی برای بهره‌برداری در مد زیر تحریک، m_2 : مؤلفه‌ی قیمت پیشنهادی برای تلفات در ناحیه‌ی دوم، m_3 : مؤلفه‌ی قیمت فرصت ازدست‌داده شده پیشنهادی برای بهره‌برداری در ناحیه‌ی سوم ($\frac{\$}{MVA \cdot h}$).

بنابراین تابع پرداخت مورد انتظار هزینه‌ی فرصت یک تابع درجه‌ی ۲ از توان راکتیو تولیدی ژنراتور می‌باشد. و منحنی آن به صورت شکل ۵ می‌باشد.



شکل ۵: منحنی هزینه توان راکتیو ژنراتور

و برای محاسبه‌ی هزینه‌ی فرصت توان راکتیو داریم:

$$C_{gqi}(Q_{Gi}) = \left[C_{gpi}(S_{Gi,max}) - C_{gpi} \left(\sqrt{S_{Gi,max}^2 - Q_{Gi}^2} \right) \right] \cdot k \quad (7)$$

که $S_{Gi,max}$: ماکزیمم توان ظاهری ژنراتور نام، Q_{Gi} : توان راکتیو تولیدی ژنراتور نام، k : ضریب نرخ بازده توان راکتیو است که به صورت معمول دارای مقداری بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد.

۳-۲-۳ تعیین قیمت توان راکتیو بانکهای خازنی

جیرانسازهای توان راکتیو به وسیله‌ی سرمایه‌گذاران خصوصی در برخی از شین‌های منتخب سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹]. هزینه استفاده از جیرانسازهای توان راکتیو خازنی به صورت مقداری متناسب با توان راکتیو تزریقی به شبکه محاسبه شده و به صورت (۸) بیان می‌گردد:

$$C_{Cj} C_{Cj}(Q_{Cj}) = r_j Q_{Cj} \quad (8)$$

که در آن r_j و Q_{Cj} مقدار نرخ توان راکتیو و توان راکتیو خریداری شده و تزریقی به شبکه می‌باشد، که بر روی شین j قرار گرفته است. هزینه‌ی تولید توان راکتیو با استفاده از بازگشت هزینه‌ی سرمایه‌گذاری پایه محاسبه می‌گردد، که می‌تواند براساس ضریب استهلاک آن بیان گردد.

۴- الگوریتم کلونی مورچه‌ها (ACO)

الگوریتم کلونی مورچه‌ها، اولین بار توسط Marco Dorigo به‌عنوان تز دکتری مطرح شد و از رفتار مورچه‌ها برای یافتن کوتاه‌ترین مسیر میان لانه تا منبع غذا الهام می‌گیرد [۷]. بسیاری از انواع مورچه‌ها در هنگام حرکت در محیط اطراف خود ماده‌ای به نام فرومون ترشح می‌کنند که برای سایر مورچه‌ها قابل درک است. با گذشت زمان میزان فرومون موجود در کوتاه‌ترین مسیر میان لانه و غذا بیشتر می‌شود و در نتیجه تعداد مورچه‌هایی که به این مسیر کوتاه‌تر جذب می‌شوند نیز افزایش می‌یابد، این چرخه به‌همین صورت ادامه می‌یابد تا جایی که اکثریت مورچه‌ها از مسیر کوتاه‌تر عبور کنند. در ادامه گام‌های مورد استفاده برای انجام بهینه‌سازی به روش ACO بیان خواهند شد: گام ۱: تبدیل مسئله به پارامترهای عددی: بر این اساس مسئله‌ی بهینه‌سازی به صورت یک گراف که متشکل از گره‌ها و شاخه‌ها است مدل‌سازی می‌گردد. هر گره جزئی از مسئله است که مورچه‌ها می‌توانند بین آنها حرکت کنند. گام ۲: نقطه‌ی شروع اولیه برای مورچه‌ها: برای شروع حل مسئله مورچه‌ها به صورت تصادفی بین گره‌های گراف قرار می‌گیرند. گام ۳: قوانین حرکت بین گره‌ها: مورچه‌ها در فرایند حل مسئله از یک گره به گره بعدی حرکت می‌کنند. حرکت یک مورچه از یک گره به گره دیگر بر اساس قوانین احتمال انجام می‌گیرد. گام ۴: قوانین به‌روز کردن فرومون موجود در هر مسیر می‌باشد.

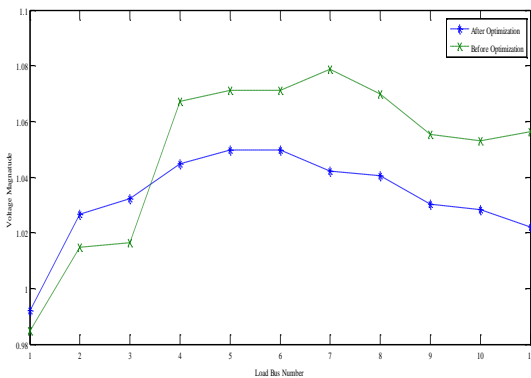
۵- بررسی نتایج شبیه‌سازی

سیستم ۱۴ شین دارای ۳ ژنراتور در شین‌های ۱، ۲ و ۹ که توان ظاهری هرکدام از ژنراتورها ۱۲۵ MVA می‌باشد. مقدار حداقل و حداکثر توان خروجی این واحدها هم به ترتیب ۲۰ MW و ۱۲۵ MW می‌باشد. در این بررسی هزینه‌ی تولید توان اکتیو هرکدام از ژنراتورها به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$C_{gpi}(P_{Gi}) = 75 + 750P_{Gi} + 420P_{Gi}^2 \quad (9)$$

جدول ۱: مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی در این حالت

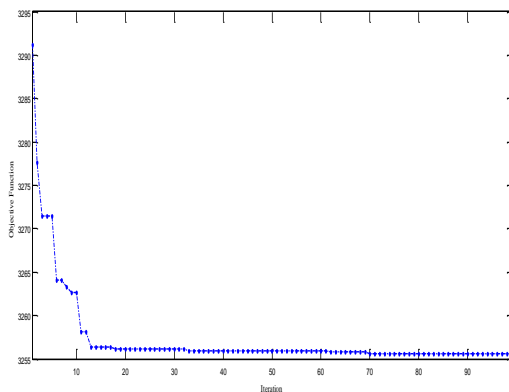
مقدار بهینه	متغیر کنترلی	مقدار بهینه	متغیر کنترلی
-۱۶/۰۵	$Q_{G1}(MVar)$	۹۰/۰۰	$P_{G2}(MW)$
۳۸/۴۹	$Q_{G2}(MVar)$	۸۸/۷۹	$P_{G9}(MW)$
۱۹/۲۷	$Q_{G9}(MVar)$	۱/۰۴۷	$V_{G2}(pu)$
		۱/۰۵	$V_{G9}(pu)$
		۲۷/۳۱	$Q_{C5}(MVar)$



شکل ۷: نمودار پروفایل ولتاژ شین‌های بار سیستم ۱۴ با سه

۵-۱-۲- بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هزینه توان اکتیو و راکتیو و هزینه بانک خازنی

در این قسمت هر سه تابع هدف به‌عنوان تابع هدف در بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند در شکل ۸ نمودار تغییرات تابع هدف در حالت زیر آورده شده است.



شکل ۸: نمودار تغییرات توابع هدف بر حسب تکرار

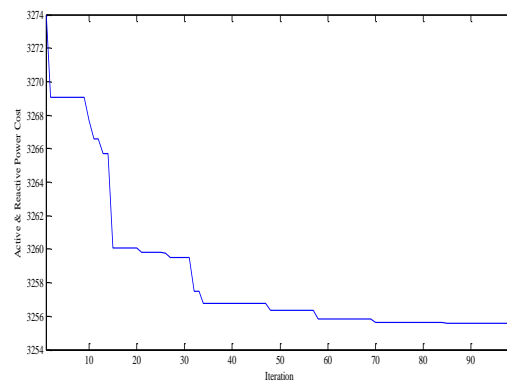
مقدار نامی توان مورد استفاده در این سیستم ۱۰۰MVA است. یک بانک خازنی با ظرفیت کل ۵۰MVA نیز بر روی شین ۵ نصب شده است. در این بررسی فرض می‌شود که توان راکتیو خروجی ژنراتورها می‌توانند به‌صورت پیوسته تغییر کند. بنابراین در این سیستم متغیرهای کنترلی شامل توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتورهای نصب شده بر روی شین ۲ و ۹ و همچنین مقدار توان راکتیو خروجی واحد جبران‌ساز خازنی می‌باشد. دیگر محدودیت‌های عملکردی سیستم قدرت به‌صورت زیر می‌باشند [۱۱]. حد ظرفیت انتقالی خطوط: $|P_{ij}| \leq 1.8pu$. محدودیت مربوط به دامنه ولتاژ شین‌ها: $0.95 \leq |V_i| \leq 1.05$. تنظیمات مربوط به شین مبنا: $\delta_1 = 0$ و $V_1 = 1.05$

۵-۱-۱- بهینه‌سازی توان راکتیو با هزینه فرصت

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش محاسبه هزینه توان راکتیو با استفاده از هزینه فرصت، با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف آورده شده است.

۵-۱-۱-۱- در نظر گرفتن هزینه توان اکتیو و راکتیو

در این قسمت بهینه‌سازی با در نظر گرفتن همزمان هزینه‌های توان‌های اکتیو و راکتیو به‌عنوان تابع هدف انجام شده است. نمودار تغییرات تابع هدف که مجموع هزینه توان اکتیو و توان راکتیو محاسبه شده با استفاده از هزینه فرصت می‌باشد در شکل ۶ آورده شده است:

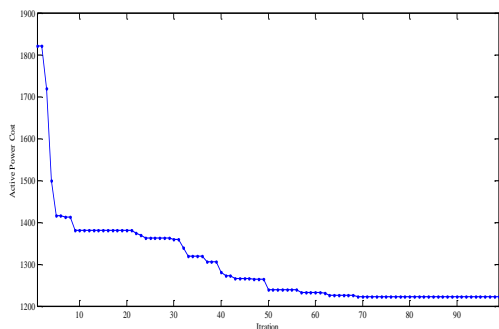


شکل ۶: نمودار تغییرات هزینه توان اکتیو و راکتیو

جدول ۱ متغیرهای کنترلی مربوط به ژنراتورها و بانک خازنی آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۷ هم دیده می‌شود در این حالت هم نسبت به مقدار مرجع یک پریونیت تغییرات بعد از انجام بهینه‌سازی کمتر شده است.

۵-۲-۱- در نظر گرفتن هزینه‌ی توان اکتیو

در ابتدا و قسمت اول تنها هزینه‌ی توان اکتیو به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ تغییرات تابع هدف برحسب تکرارها آورده شده است.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات هزینه‌ی توان اکتیو

در جدول ۳ مقادیر متغیرهای کنترلی با استفاده از روش مثلث توان آورده شده است. همان‌طور که از این جدول دیده می‌شود در این حالت الگوریتم تمایل به ماکزیمم کردن تولید توان اکتیو واحد ۲ و حداقل کردن ولتاژ ترمینال این ژنراتور دارد. همان‌طور که از جدول دیده می‌شود برای ژنراتور شین ۹ روندی معکوس مشاهده می‌شود. همچنین در این حالت خروجی واحد جبران‌ساز خازنی نیز به سمت مقدار حداکثر مقدار افزایش یافته است.

جدول ۳: مقادیر بهینه‌ی پارامترهای کنترلی در این حالت

مقدار بهینه متغیر	متغیر کنترلی	مقدار بهینه متغیر	متغیر کنترلی
۷۸/۱۴	$Q_{G2}(MVar)$	۱۱۳/۰۱	$P_{G2}(MW)$
۶۵/۵۴	$Q_{G9}(MVar)$	۵۹/۱۶۸	$P_{G9}(MW)$
		۰/۹۵	$V_{G2}(pu)$
		۱/۰۵	$V_{G9}(pu)$
		۴۸/۶۹	$Q_{C5}(MVar)$

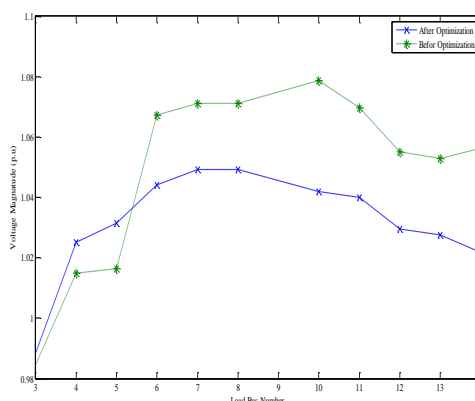
در شکل ۱۱ تغییرات پروفایل شین‌های بار سیستم ۱۴ شین IEEE آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با بهینه‌سازی سیستم پروفایل ولتاژ در سیستم به مقدار زیادی بهبود یافته است و تغییرات ولتاژ کمتر شده است.

در جدول ۲ مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از انجام بهینه‌سازی آورده شده است. در شکل ۹ تغییرات پروفایل ولتاژ بعد از انجام بهینه‌سازی نیز آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در این حالت پروفایل ولتاژ نسبت به دو حالت دیگر دارای بهترین مقادیر می‌باشد.

جدول ۲: مقادیر بهینه‌ی پارامترهای کنترلی

مقدار بهینه متغیر کنترلی	مقدار بهینه متغیر کنترلی	مقدار بهینه متغیر کنترلی
۸۹/۸۸	$P_{G2}(MW)$	$Q_{G1}(MVar)$ -۱۰/۳۹
۹۰/۱۱	$P_{G9}(MW)$	$Q_{G2}(MVar)$ +۳۳/۳۵
۱/۰۴۵	$V_{G2}(pu)$	$Q_{G9}(MVar)$ +۲۰/۶۹
۱/۰۵	$V_{G9}(pu)$	
۲۵/۵۱	$Q_{C5}(MVar)$	

پروفایل ولتاژ حالت بعد از بهینه‌سازی با نقاط (x) و پروفایل ولتاژ قبل از انجام بهینه‌سازی نیز با (*) نشان داده شده است.



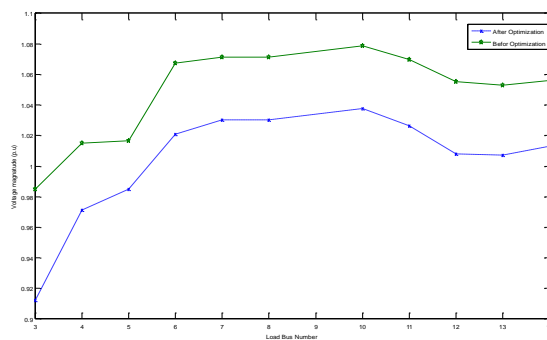
شکل ۹: نمودار پروفایل ولتاژ با در نظر گرفتن هر سه تابع هدف

۵-۲-۲- بهینه‌سازی توان راکتیو با استفاده از روش مثلث توان اصلاح‌شده

در ادامه از روش مثلث توان بهبودیافته نیز به‌منظور محاسبه‌ی مقادیر بهینه‌ی توابع هدف استفاده خواهد شد. البته توجه داریم که چون تعریف مورد استفاده برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو در این حالت نسبت به حالت هزینه‌ی فرصت متفاوت است و مقادیر محاسبه‌شده برای این توان‌ها باهم متفاوت می‌باشند.

جدول ۴: مقادیر بهینه با در نظر گرفتن هزینه‌ی هر سه تابع هدف

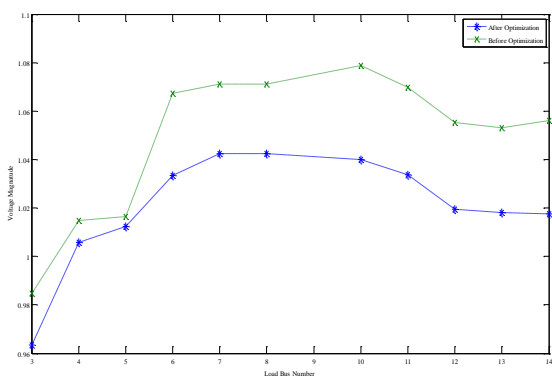
مقدار بهینه متغیر	متغیر کنترلی	مقدار بهینه متغیر	متغیر کنترلی
+۴۷/۸۲	$Q_{G1}(MVar)$	۸۹/۱۴۵	$P_{G2}(MW)$
-۴۲/۲۴	$Q_{G2}(MVar)$	۸۵/۴۶۰۶	$P_{G9}(MW)$
+۳۱/۴۴	$Q_{G9}(MVar)$	۱/۰۱۴	$V_{G2}(pu)$
		۱/۰۵	$V_{G9}(pu)$
		۳۵/۷۵	$Q_{C5}(MVar)$



شکل ۱۱: نمودار پروفایل ولتاژ شین‌های بار سیستم ۱۴ با سه

۵-۲-۲- بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هزینه توان اکتیو و راکتیو و توان راکتیو بانک خازنی

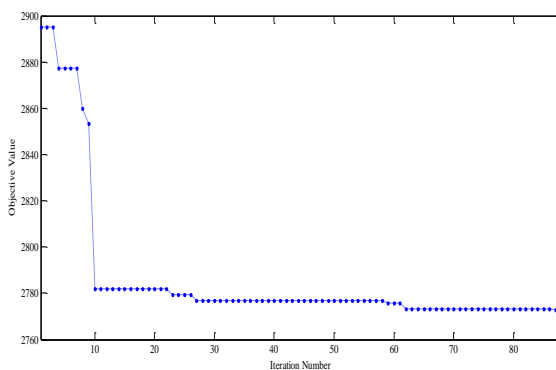
در این قسمت هر سه تابع هدف بیان شده به‌عنوان تابع هدف در بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند، در واقع تابع هدف مجموع این سه تابع هدف می‌باشد. در شکل ۱۲ نمودار تغییرات تابع هدف در این حالت آورده شده است.



شکل ۱۳: نمودار پروفایل ولتاژ شین‌های بار سیستم ۱۴ با سه

۵-۳-۱- مقایسه‌ی نتایج حاصل از ACO و GA با روش مثلث توان اصلاح شده

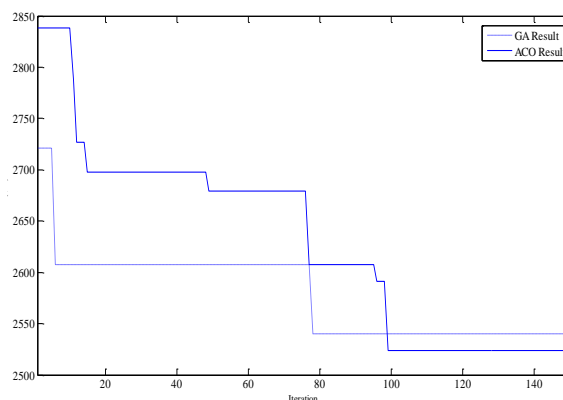
نمودار مقایسه‌ی این دو الگوریتم در شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در این حالت کلونی مورچه نتایج بهتری نسبت به ژنتیک داشته است. البته با تعداد تکرارهای بیشتر نیز نتایج با هم مقایسه شده‌اند ولی تغییری در مقدار نتایج حاصله تا ۱۵۰ تکرار حاصل نشده است. همان‌طور که دیده می‌شود در ابتدا الگوریتم ژنتیک دارای عملکرد بهتری بوده است اما در نهایت روش کلونی مورچه منجر به نتایج بهتری شده است. در این قسمت الگوریتم ژنتیک از نظر سرعت همگرایی عملکرد بهتری داشته است و همان‌طور که دیده می‌شود بعد از ۸۰ تکرار به نتیجه‌ی نهایی رسیده است این در حالی است که الگوریتم کلونی مورچه بعد از ۱۰۰ تکرار به نتیجه‌ی نهایی رسیده است.



شکل ۱۲: نمودار تغییرات توابع هدف بر حسب تکرار

در جدول ۴ مقادیر متغیرهای کنترلی بعد از انجام بهینه‌سازی آورده شده است. تغییرات ایجاد شده در این متغیرهای کنترلی به نحوی است که بتواند هر سه تابع هدف را پوشش دهد. تغییرات پروفایل ولتاژ بعد از انجام بهینه‌سازی نیز آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۳ دیده می‌شود، قبل از انجام بهینه‌سازی مقداری اضافه ولتاژ در شین‌های بار این سیستم دیده می‌شود که بعد از انجام بهینه‌سازی این اضافه ولتاژ کمتر شده و دامنه‌ی ولتاژ شین‌ها به یک پریونیت نزدیک‌تر شده است. پروفایل ولتاژ حالت قبل از بهینه‌سازی با نقاط (x) و پروفایل ولتاژ بعد از انجام بهینه‌سازی نیز با (*) نشان داده شده است.

هزینه‌ی فرصت و مثلث توان اصلاح‌شده استفاده شده است. نتایج استفاده از این روش‌ها به‌منظور بهینه‌سازی قیمت توان‌های اکتیو و راکتیو با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی کلونی مورچه‌ها و ژنتیک آورده شده است. نتایج با استفاده از سیستم قدرت استاندارد ۱۴ شینه IEEE بررسی شده است. از پارامترهای کنترلی موجود در سیستم قدرت که شامل توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور و ولتاژ ترمینال‌های ژنراتوری و همچنین مقدار توان راکتیو واحدهای جبران‌ساز می‌توان به‌صورت همزمان به‌منظور کاهش هزینه‌ی توان‌های اکتیو و راکتیو و بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش تلفات در سیستم قدرت استفاده کرد.



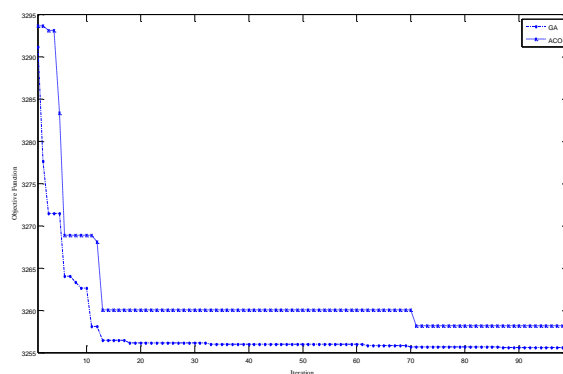
شکل ۱۴: نمودار مقایسه نتایج GA و ACO، در مثلث توان

مراجع

- [1] K. Zehar and S. Sayah, "Optimal power flow with environmental constraint using a fast successive linear programming algorithm: Application to the Algerian power system," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 11, pp. 3362–3366, 2008.
- [2] A.A. El-Keib, X. Ma, "Calculating short-run marginal costs of active and reactive power production", *IEEE Trans. Power Syst.*, pp.559-565, 1997.
- [3] M. K. Mangoli, K. Y. Lee, and Y. Moon Park, "Optimal real and reactive power control using linear programming," *Electric power systems research*, vol. 26, no. 1, pp. 1–10, 1993.
- [4] M.L. Baughman, and S.N. Siddiqi, "Real-time pricing of reactive power: Theory and case study results". *IEEE Trans. Power Syst.*, DOI: 10.1109/59.131043, 1991.
- [5] J.B. Gil, T.G. San Roman, J.A. Rios and P.S. Martin, "Reactive power pricing: A conceptual framework for remuneration and charging procedures", *IEEE Trans. Power Syst.*, pp.483-489, 2000.
- [6] J. Zhong and K. Bhattacharya, "Toward a Competitive Market for Reactive Power", *IEEE Trans. Power Syst*, vol.17, no.4, November 2002.
- [7] A. Ketabi and A. Ali Babae, "Application of the Ant Colony Search Algorithm to Reactive Power Pricing in an Open Electricity Market", pp. 956-963, 2009.
- [8] X. Bai, H. Wei, K. Fujisawa, and Y. Wang, "Semidefinite programming for optimal power flow problems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 383–392, 2008.
- [9] L. Weibing, L. Min and W. Xianjia, "An improved particle swarm optimization algorithm for optimal power flow", *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp.2448 – 2450, 17-20 May 2009.
- [10] Z. Haibo, Z. Lizi and M. Fanling, "Reactive power optimization based on genetic algorithm", *International Power Conference on Power System Technology*, pp.1448 – 1453, 18-21 August 1998.
- [11] N.H. Dandachi, M.J. Rawlins, M. Paris, B. Stott, "OPF for reactive pricing studies on the NGC system", *IEEE Trans. Power Syst.*, pp.226-232, 1996.

۵-۳-۲- مقایسه نتایج حاصل از ACO و GA با روش هزینه‌ی فرصت

در این قسمت نتایج بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های کلونی مورچه و ژنتیک باهم مقایسه شده‌اند. در شکل ۱۵ نمودار تغییرات هزینه برحسب تعداد تکرارها آورده شده است. همان‌طور که می‌بینیم الگوریتم ژنتیک دارای نتایج بهتری نسبت به الگوریتم کلونی مورچه می‌باشد. زمان به جواب رسیدن الگوریتم ژنتیک نیز بسیار سریع‌تر از الگوریتم کلونی مورچه می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود الگوریتم ژنتیک بعد از ۲۰ تکرار به جواب نهایی رسیده است در حالی که الگوریتم مورچه در تکرار ۷۰ به جواب رسیده است.



شکل ۱۵: نمودار مقایسه‌ی نتایج الگوریتم‌های ACO و GA

نتیجه‌گیری

در این بررسی به مطالعه‌ی قیمت‌گذاری توان راکتیو در بحث کنترل بهینه‌ی سیستم قدرت پرداخته شده است. به‌منظور محاسبه‌ی هزینه‌ی توان راکتیو از دو روش استفاده شده یعنی