

کنترل بهینه توان راکتیو با استفاده از مقادیر موجود بانک‌های خازنی

محمدباقر بناء شریفیان و وحید بهجت
دانشگاه تبریز، دانشکده فنی، گروه مهندسی برق

واژه‌های کلیدی: جایابی بهینه خازن، شبکه توزیع، کنترل توان راکتیو

چکیده

میکنند که با کمترین خازن‌ها بهترین کنترل ممکن بر روی توان راکتیو و ولتاژ انجام گیرد. هرگاه بتوان تلفات خط را بهینه (حداقل) کرد، مسلماً ولتاژ باسها نیز به واحد نزدیک خواهند شد و هزینه های مربوط به تلفات خط حداقل می شود.

۱- مقدمه

کنترل توان راکتیو به عنوان یک عامل حائز اهمیت در طراحی و بهره برداری از سیستمهای قدرت الکتریکی از دیر باز مورد توجه بوده هست. طبق آمار و اسناد منتشره وزارت نیرو تلفات انرژی در شبکه به صورت جدول زیر می باشد:

توسعه شبکه توزیع انرژی الکتریکی و تعداد مشترکین، نیاز به الگوریتمی سریع جهت کنترل بهینه توان راکتیو و بهبود وضعیت پایدار و دینامیکی سیستم را لازم می دارد. روشهای مرسوم نظیر الگوریتم ژنتیک و ... که کند می باشند، حتی با وجود دقت بالا، نمی توانند در این مورد کارایی مناسب داشته باشند. روش بکار رفته در این بررسی روش HI بوده که از لحاظ برنامه نویسی ساده، حجم برنامه بسیار کم، و سرعت اجرا و همگرایی آن نیز بالاست. آوردن هزینه مربوط به تجهیزات کنترل توان راکتیو و ولتاژ (در اینجا خازن) در تابع هدف موجب استفاده بهینه (حداقل) از آنها شده و نرم افزار بهینه سازی سعی

جدول ۱- تقسیم بندی تلفات انرژی در شبکه

| مصرف داخلی نیروگاهها | تلفات شبکه انتقال | تلفات شبکه توزیع | جمع کل تلفات |
|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| ۵ درصد تولید خالص | ۳/۹ درصد تولید خالص | ۹/۷ درصد تولید خالص | ۱۸/۶ درصد تولید خالص |

با توجه به جدول فوق مجموع تلفات در شبکه توزیع و انتقال ۱۳/۶٪ تولید خالص می باشد. مقدار تلفات در شبکه توزیع ۵۲٪ و در شبکه انتقال ۲۱٪ کل تلفات سیستم می باشد. با توجه به سهم عمده شبکه توزیع در تلفات کل سیستم باید در جهت کاهش تلفات در شبکه توزیع اقدامات اساسی انجام گردد. لذا لزوم بهینه سازی در این بخش از طریق برنامه ریزی دراز مدت و کوتاه مدت بسیار ضروری به نظر می رسد.

جایابی و تعیین ظرفیت بهینه خازنهای موازی به منظور کاهش تلفات توان و انرژی و بهبود پروفیل ولتاژ یکی از مسائل مرسوم در طراحی و کنترل سیستمهای قدرت است که تا بحال تحقیقات وسیعی بر روی آن صورت گرفته است. از بین روشهای مختلف به کار رفته میتوان به روش برنامه ریزی خطی، برنامه ریزی غیرخطی و روشهای تجربی اشاره کرد.

روشهای اولیه برای جایابی خازنهای روشهای تحلیلی بوده است که توسط Goldberg استفاده شده است [۱]. Rajicic & Bose ظرفیت آزاد شده پست و افزایش ولتاژ در بار کم را نیز در مدل در نظر گرفت [۲]. این روشهای تحلیلی سپس با بعضی از روشهای ابتکاری یا تجربی ترکیب شده اند تا معایب قبل برطرف شوند. Augugliaro فرمول بندی مسئله را با در نظر گرفتن کاهش تلفات انرژی و حداکثر

تلفات توان کاملترکرد و روشی برای تعیین تعداد و اندازه خازنها پیشنهاد نمود [۳]. Grainger محدوده های ولتاژ را نیز در مدل اعمال کرد [۴]. سپس Dong Chiang رشد بار، آزاد سازی ظرفیت سیستم و افزایش ولتاژ در شرایط بار کم را در نظر گرفته و از یک تکنیک بهینه سازی محلی استفاده نمودند [۵]. Kim & You بکمک روش الگوریتم ژنتیک به بهبود پروفیل ولتاژ در سیستمهای توزیع نامتعادل پرداخته اند. تابع هدف بکار رفته متشکل از دو قسمت هزینه انرژی صرف شده برای تلفات و هزینه خرید و نصب خازن بوده است. در این تحقیق از خازنهای موجود استاندارد استفاده شده است [۶]. Delfanti & et al با استفاده از الگوریتمهای deterministic و ژنتیک به مسئله جایابی بهینه خازن پرداخته اند. در این کار هزینه نصب خازن بعنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است [۷]. در [۸] جهت بهبود کیفیت توان از جایابی بهینه خازن استفاده شده است. تابع هدف هزینه تجهیزات مربوط به خازن، THD، ولتاژ باسها، ولتاژ مؤثر باسها و بار خطوط مختلف بوده است. در [۹] اندیسهای ولتاژ و افت توان باسهای سیستم توزیع با توابع فازی مدل شده و از یک سیستم خبره فازی جهت جایابی بهینه خازن استفاده شده است. در [۱۰] از روش جستجوی HJ برای جایابی بهینه خازن با توابع هدف مختلف استفاده شده است. تلفات خطوط، افت ولتاژ در خطوط و هزینه نصب خازن جزء توابع هدف انتخاب شده است. در این مقاله خازن بصورت ایده آل و پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است و لذا ممکن است نتیجه حاصل مستقیماً و بدون تغییرات کاربرد نداشته باشد. در [۱۱] نیز از

الگوریتم ژنتیک برای جایابی بهینه خازن به منظور کاهش تلفات و نیز بهبود پروفیل ولتاژ استفاده شده است.

با توجه به رشد روز افزون مصرف انرژی الکتریکی و نیاز به کنترل توان راکتیو و ولتاژ جهت حصول نتایج بهینه و نیز وجود کامپیوترهای با پردازنده های خیلی سریع ، حافظه زیاد و سرعت بالا، و دستیابی به اطلاعات از طریق کارتهای آنالوگ به دیجیتال و بالعکس (Flash A/D & D/A)، امکان کنترل زمان واقعی (On Line)، توان راکتیو و ولتاژ حاصل شده است.

توسعه شبکه توزیع و تعداد مشترکین، نیاز به الگوریتمی سریع جهت این امر را لازم می دارد. بنابراین روشهای مرسوم نظیر الگوریتم ژنتیک و ... که کند میباشند، حتی با وجود دقت بالا، نمی توانند در این مورد کارایی مناسب داشته باشند. روش به کار رفته در این بررسی روش HJ بوده که از لحاظ برنامه نویسی ساده، حجم برنامه بسیار کم، و سرعت اجرا و همگرایی آن نیز بالاست [۱۰]. در آن از گرادیان یا مشتق تابع هدف استفاده نشده است و براحتی قابل اعمال به مسائل پیوسته و گسسته است. با توجه به وجود شبکه های حلقوی در سیستمهای امروزی، جهت بهینه سازی استفاده از نتایج پخش بار در هر مرحله ضروری به نظر می رسد. از آنجائیکه افزایش سرعت در اجرای برنامه (جهت کاربرد زمان واقعی آن) از اهمیت اساسی برخوردار است لذا از روش پخش بار FD استفاده شده است.

این مقاله در ادامه [۱۰] کار شده و در آن از خازنهای موجود و استاندارد که شرکتهای توانیر استفاده میکنند

بهره جسته شده است. لذا نتایج حاصله قابل کاربرد مستقیم بوده و دیگر نیازی به دستکاری مقادیر خازن پیشنهادی حاصل از بهینه سازی نیست.

جهت بهینه سازی خازن گذاری، نرم افزار تهیه شده با تعریف تابع هدف مناسب در هر مرحله عمل به نتایج پخش بار مراجعه می کند، سپس به محاسبه تابع هدف می پردازد. نکته قابل توجه این است که تزریق توان راکتیو خازنی، به منظور حصول شرایط بهینه، فقط با استفاده از مقادیر موجود بانگهای خازنی صورت می گیرد. بدین ترتیب از وقوع خطاهائی که ناشی از فرض کردن بانگهای خازنی به صورت متغیرهای پیوسته ایجاد می شوند، دوری می شود.

آوردن هزینه مربوط به تجهیزات کنترل توان راکتیو و ولتاژ (در اینجا خازن) در تابع هدف موجب استفاده بهینه (حداقل) از آنها شده و نرم افزار بهینه سازی سعی می کند که با کمترین خازنها بهترین کنترل ممکن بر روی توان راکتیو و ولتاژ انجام گیرد. هرگاه بتوان تلفات خط را بهینه (حداقل) کرد، مسلماً ولتاژ باسها نیز به واحد نزدیک خواهند شد و هزینه های مربوط به تلفات خط حداقل می شود.

۲- تابع هدف و روش پخش بار بکار رفته

اهداف کلی خازن گذاری در شبکه ، حداقل سازی تلفات خط، و کنترل ولتاژ باسها است که جهت توجیه اقتصادی باید سعی شود که این اهداف با کمترین هزینه ممکن برآورده شوند، لذا تابع هدف می تواند یکی از این سه عنوانین و یا ترکیبی از دو یا سه مورد باشد. بر حسب این تقسیم بندی توابع

در خط فرض می شود. لذا در تابع هدف مورد بحث، جمله مربوط به تلفات با ضریب ۱۰ نسبت به جمله مربوط به توان راکتیو خازنی تزریقی آمده است. با تغییر ضریب DV در تابع هدف ضریب ۱۰۰ به بهترین نتیجه منتهی شده است.

با توجه به موارد فوق، در نهایت تابع هدف به شکل زیر ساده شده است:

$$F_4(X) = (10 P_{Loss})^2 + (T_{InjectedQ})^2 + (100 DV)^2 \quad (5)$$

که در آن:

$$P_{ij} = G_{ij} (V_i - V_j)^2 = G_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_{ij})] \quad (6)$$

$$Q_{ij} = B_{ij} (V_i - V_j)^2 = B_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_{ij})] \quad (7)$$

$$P_{Loss} = \sum_{i=1,2,\dots,n} \sum_{j=i+1,\dots,n} P_{ij}, \quad Q_{Loss} = \sum_{i=1,2,\dots,n} \sum_{j=i+1,\dots,n} Q_{ij} + \sum Y_i (V_i)^2, \quad (8)$$

$$DV = \sum |1 - V_i|, \quad i = 2, \dots, n \quad (9)$$

$$T_{InjectedQ} = \sum (InjectedQ(i)), \quad i = 2, \dots, n \quad (10)$$

P_{ij} و Q_{ij} تلفات توان اکتیو و راکتیو متقابل بین دو شین i و j ، ولتاژ هر شین، Y_{ci} ادمیتانس خودی هر شین B_{ij} و G_{ij} اعضای ماتریسهای سوسپیتانس و رسانایی، و n تعداد شین های شبکه میباشند. DV انحراف ولتاژ، $InjectedQ(i)$ وار تزریقی به شین i ام و $T_{InjectedQ}$ کل وار تزریقی به شینهای شبکه را نمایش می دهد.

$InjectedQ(i)$ یک متغیر گسسته است بدین معنی که تزریق وار به شین i ام از میان مقادیر موجود بانکهای خازنی صورت می گیرد. در این بررسی برای مقادیر موجود بانکهای خازنی به لیست بانکهای خازنی شرکت تولیدی و صنعتی صباخازن مطابق جدول ۲ استناد شده است.

هدفی به شکل روابط زیر میتوانند برای این بهینه سازی انتخاب شوند:

$$F_1(X) = g_1(P_{Loss}) \quad (1)$$

$$F_2(X) = g_2(P_{Loss}, DV) \quad (2)$$

$$F_3(X) = g_3(P_{Loss}, T_{InjectedQ}) \quad (3)$$

$$F_4(X) = g_4(P_{Loss}, T_{InjectedQ}, DV) \quad (4)$$

که در آن:

P_{Loss}

مقدار تلفات توان اکتیو سیستم در خطوط

DV

کنترل (خطای) ولتاژ (مجموع قدر مطلق

خطای ولتاژ باسها)

$T_{InjectedQ}$

مقدار توان راکتیو خازنی تزریقی کل به

باسهای شبکه

X

بردار متغیرهای بهینه سازی (در اینجا

توانهای راکتیو خازنی تزریقی کل به

باسهای شبکه)

با بررسی های انجام شده مشاهده شد که در بین چهار تابع هدف موجود، تابع هدف چهارم بهترین نتیجه را از نقطه نظر تلفات، ولتاژ باسها و هزینه های جبران سازی بدست می دهد. لذا این تابع به عنوان تابع هدف مرجع در نظر گرفته شده است.

از آنجائیکه روش بهینه سازی در نهایت باید به حداقل سازی تابع هدف منجر شود لذا تابع هدف باید تابعی همیشه مثبت باشد (اگر منفی باشد عمل بهینه سازی دچار خطا می شود)، از این جهت در تابع هدف از مربعات جملات استفاده شده است. بر اساس اطلاعات موجود، هزینه هر ۱۰ کیلووار خازن- گذاری به صورت تقریبی معادل یک کیلووات تلفات

جدول ۲- لیست قیمت بانکهای خازنی صباخازن

| | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ظرفیت (kVar) | ۵۰ | ۷۵ | ۱۰۰ | ۱۲۵ | ۱۵۰ | ۱۷۵ | ۲۰۰ | ۲۲۵ |
| قیمت (هزار ریال) | ۵۲۲۰ | ۶۵۸۰ | ۹۰۰۰ | ۱۰۶۱۰ | ۱۲۰۳۰ | ۱۴۶۴۰ | ۱۶۰۶۰ | ۱۷۶۷۰ |
| ظرفیت (kVar) | ۲۵۰ | ۳۷۵ | ۳۰۰ | ۳۲۵ | ۳۵۰ | ۳۷۵ | ۴۰۰ | ۴۲۵ |
| قیمت (هزار ریال) | ۱۹۰۹۰ | ۲۰۷۰۰ | ۲۲۱۲۰ | ۲۴۲۳۰ | ۲۵۶۵۰ | ۲۷۲۶۰ | ۲۸۶۸۰ | ۳۱۵۹۰ |

وری از کامپیوتر و کاهش حافظه های مورد نیاز آن است، که از یک مدل تقریبی روش نیوتن-رافسون استفاده می کند.

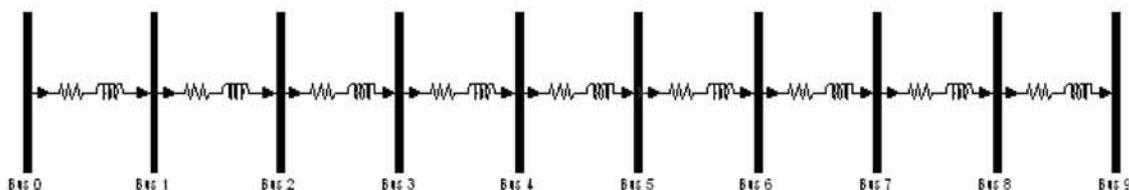
۳- مثالهای عددی

در این مقاله ابتدا یک شبکه توزیع شعاعی ۱۰ شینه، که شین اول مرجع و بقیه شینهای بار هستند، مورد بررسی قرار گرفته و سپس یک شبکه ۱۲ شینه مورد تحلیل قرار می گیرد. شکلهای ۱ و ۲ شمای کلی این دو شبکه را نشان می دهند. ولتاژ و قدرت مینا در هر دو شبکه بترتیب ۲۰ kV و ۲ MVA هستند. جداول ۳ و ۴ نتایج پخش بار قبل و بعد از بهینه سازی را برای شبکه ۱۰ شینه نشان می دهند. (10 = 1 p.u. Power Loss Cost / 1 p.u. Capacitor Cost)

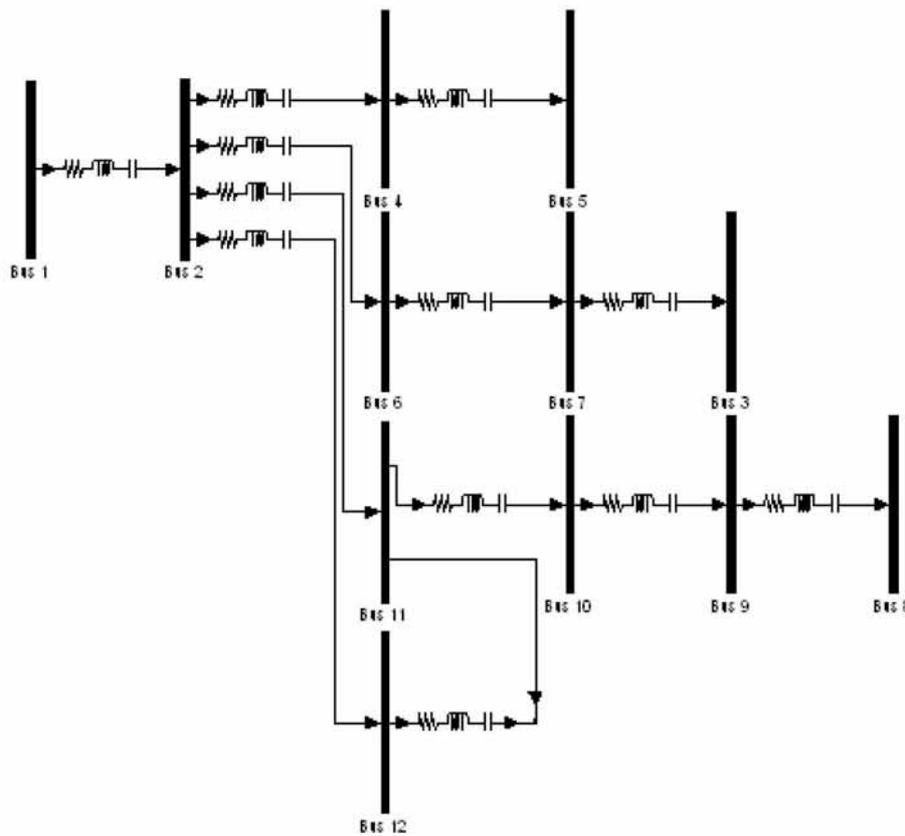
در جدول ۵ مقادیر توانهای راکتیو خازنی تزریقی به باسها، بر حسب اجزاء گسسته آنها، برای شبکه ۱۰ شینه نشان داده شده است.

نکته جالب توجه دیگر این است که نرم افزار تهیه شده برای تزریق وار به یک شین، با توجه به لیست قیمت بانکهای خازنی موجود عمل بهینه سازی اقتصادی را نیز انجام می دهد. به عنوان مثال اگر شین i ام به ۵۵۰ کیلو وار تزریق توان راکتیو نیاز داشته باشد، برنامه ترکیب $۱۵۰ + ۴۰۰ = ۵۵۰$ که کمترین مجموع قیمت را در میان ترکیبهای ممکنه دارد، انتخاب می نماید.

اطلاعات اساسی که از برنامه پخش توان بدست می آید عبارتند از دامنه و زاویه فاز هر ولتاژ در هر شین و توان اکتیو و راکتیوی که از خط عبور می کند. اکثر روشهای پخش بار بعلت بالا بودن R/X خطوط در شبکه های توزیع دچار مشکل همگرایی می شوند. از طرفی بعلت تعداد نسبتا زیاد عملیات پخش بار لازم در روش بهینه سازی HJ، نیاز به روشی برای پخش بار می باشد که علاوه بر داشتن سرعت زیاد، همگرایی آن نیز برای شبکه با R/X بالا تضمین شده باشد. لذا از روش دیکوپله سریع FD استفاده شده است. این روش یک روش مناسب برای بهبود بهره-



شکل ۱: دیاگرام تک خطی شبکه شعاعی ۱۰ شینه



شکل ۲: دیاگرام تک خطی شبکه حلقوی ۱۲ شینه

جدول ۴: نتایج پخش بار بعد از بهینه سازی برای شبکه ۱۰ شینه

| Name of Bus | P (pu) | Q (pu) | V (pu) | θ (Deg.) | InjectedQ (pu) |
|-------------|--------|--------|--------|----------|----------------|
| BusNo0 | 4.968 | -3.424 | 1.000 | 0.000 | -4.643 |
| BusNo1 | -0.920 | 0.502 | 1.003 | -0.741 | 0.525 |
| BusNo2 | -0.049 | 0.509 | 1.010 | -1.512 | 0.525 |
| BusNo3 | -0.895 | 0.447 | 1.008 | -3.454 | 0.469 |
| BusNo4 | -0.799 | -0.450 | 1.002 | -4.420 | 0.469 |
| BusNo5 | -0.805 | 0.496 | 0.998 | -7.022 | 0.525 |
| BusNo6 | -0.039 | 0.489 | 0.998 | -7.893 | 0.494 |
| BusNo7 | -0.575 | 0.492 | 0.995 | -9.549 | 0.494 |
| BusNo8 | -0.049 | 0.489 | 0.987 | -11.752 | 0.494 |
| BusNo9 | -0.820 | 0.485 | 0.974 | -13.464 | 0.500 |

Number of function evaluations = 230, Function minimum = 72.07097, Function initial value = 3709.62, Power loss minimum = 1.671953E-02 pu, Power loss initial value = .171976 pu, Total injected reactive power (# cost) = 4.49375

جدول ۳: نتایج پخش بار قبل از بهینه سازی برای شبکه ۱۰ شینه

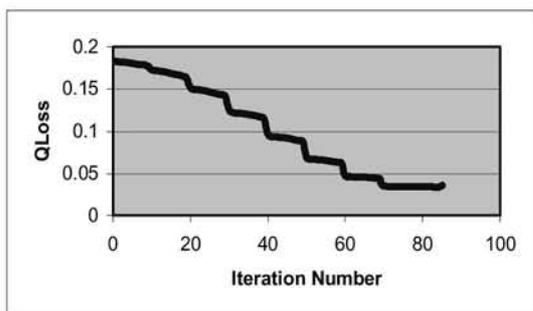
| Name of Bus | P (pu) | Q (pu) | V (pu) | θ (Deg.) |
|-------------|----------|----------|---------|----------|
| BusNo0 | 5.11866 | 1.21860 | 1.00000 | 0.00000 |
| BusNo1 | -0.92025 | -0.02267 | 0.99413 | -0.57707 |
| BusNo2 | -0.04964 | -0.01629 | 0.99018 | -1.32994 |
| BusNo3 | -0.89564 | -0.02135 | 0.96764 | -2.61454 |
| BusNo4 | -0.79948 | -0.91883 | 0.95287 | -3.03194 |
| BusNo5 | -0.80463 | -0.02944 | 0.92748 | -4.38235 |
| BusNo6 | -0.03942 | -0.00453 | 0.91993 | -4.80548 |
| BusNo7 | -0.57401 | -0.00208 | 0.90345 | -5.73253 |
| BusNo8 | -0.04953 | -0.00472 | 0.87994 | -6.70810 |
| BusNo9 | -0.81409 | -0.01539 | 0.85556 | -7.80164 |

Active Power Loss = .171976 pu

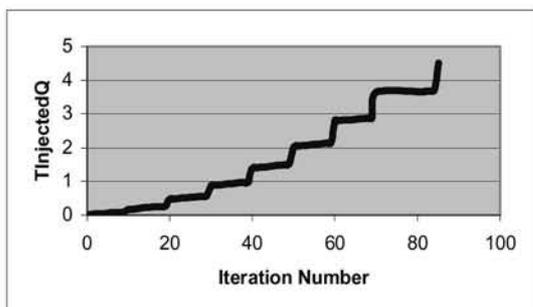
جدول ۵: توانهای راکتیو خازنی تزریقی به باسها بر حسب مقادیر موجود بانکهای خازنی برای شبکه ۱۰ شینه

| Name of Bus | InjectedQ (kVar) | VAR1 (kVar) | VAR2 (kVar) | VAR3 (kVar) | VAR4 (kVar) | VAR5 (kVar) | VAR6 (kVar) |
|-------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| BusNo0 | -9286.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo1 | 1050.0 | 400.0 | 400.0 | 250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo2 | 1050.0 | 400.0 | 400.0 | 250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo3 | 937.5 | 300.0 | 300.0 | 300.0 | 12.5 | 12.5 | 12.5 |
| BusNo4 | 937.5 | 300.0 | 300.0 | 300.0 | 12.5 | 12.5 | 12.5 |
| BusNo5 | 1050.0 | 400.0 | 400.0 | 250.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo6 | 987.5 | 350.0 | 350.0 | 275.0 | 12.5 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo7 | 987.5 | 350.0 | 350.0 | 275.0 | 12.5 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo8 | 987.5 | 350.0 | 350.0 | 275.0 | 12.5 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo9 | 1000.0 | 350.0 | 350.0 | 300.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

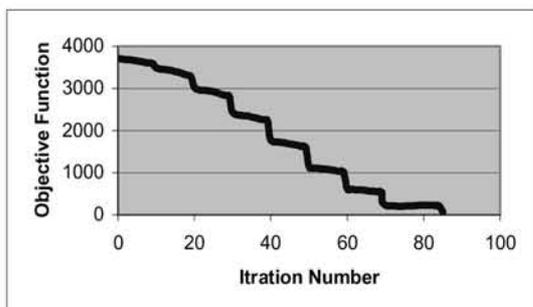
Total Injected Reactive Power = 8987.5 kVar, Total Injected Reactive Power Cost = 6.32585E+08 Rial



شکل ۴: تغییرات تلفات راکتیو برحسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۰ شینه

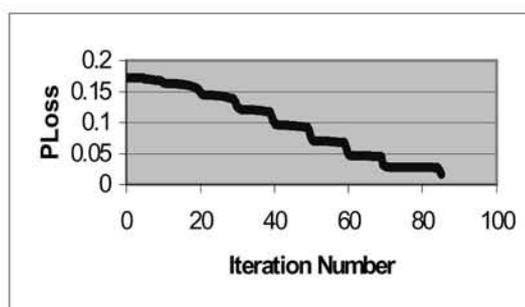


شکل ۵: تغییرات مجموع توان راکتیو خازنی تزریقی به باسها بر حسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۰ شینه



شکل ۶: تغییرات تابع هدف بر حسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۰ شینه

مشاهده می شود که پس از بهینه سازی، میزان تلفات خطوط از مقدار اولیه 0.171976 pu به مقدار نهایی 0.1671953 pu و تابع هدف از مقدار اولیه $3709/62$ pu به مقدار نهایی $72/07097$ pu کاهش یافته اند. کل توان راکتیو خازنی تزریقی به باسها در این حالت $4/49375$ pu می باشد. قابل توجه است که با تزریق این مقدار توان راکتیو خازنی تلفات خط تا حدود 90% کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که پس از بهینه سازی ولتاژ تمامی باسها به مرز 1 pu نزدیک می شوند. جهت مشخص شدن بهتر موضوع و همچنین مشاهده عملکرد نرم-افزار در طی بهینه سازی تغییرات تابع هدف، تلفات اکتیو و راکتیو خطوط، توان راکتیو خازنی تزریقی به باسها، توان راکتیو منتجه باسها، ولتاژ باسها و هزینه های بهینه سازی بر حسب مراحل تکرار از مقادیر اولیه تا مقادیر نهایی بصورت گرافیکی در شکل های ۳-۹ آورده شده اند. توضیح اینکه هزینه های کمپانزاسیون فقط قیمت خازنها را در بر می گیرد و از هزینه های شامل نصب، تعمیرات و نگهداری صرفنظر شده است. همچنین در این شکلها فقط تکرارهای موفقیت آمیز رسم شده اند (تکرارهای موفقیت آمیز تکرارهایی هستند که منجر به کاهش مقدار تابع هدف می شوند).



شکل ۳: تغییرات تلفات اکتیو برحسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۰ شینه

جدول ۶: نتایج پخش بار قبل از بهینه سازی برای شبکه ۱۲ شینه

| Name of Bus | P (pu) | Q (pu) | V (pu) | θ (Deg.) |
|-------------|---------|---------|--------|----------|
| BusNo0 | 2.4339 | 0.4197 | 1.0000 | 0.0000 |
| BusNo1 | 3.7129 | 1.1496 | 1.0037 | -1.7254 |
| BusNo2 | 0.4207 | -0.0768 | 0.9817 | -1.1688 |
| BusNo3 | -0.7812 | -0.1449 | 0.9878 | -7.3150 |
| BusNo4 | -1.1788 | -0.0390 | 0.9753 | -10.5290 |
| BusNo5 | -1.9109 | -0.1699 | 1.0008 | -2.3055 |
| BusNo6 | -0.5797 | -0.2348 | 0.9822 | -2.7174 |
| BusNo7 | -0.1993 | -0.0697 | 0.9478 | -6.4113 |
| BusNo8 | 0.0795 | -0.1996 | 0.9590 | -5.2033 |
| BusNo9 | -0.1901 | -0.0350 | 0.9760 | -4.7583 |
| BusNo10 | -0.8402 | -0.4397 | 0.9862 | -3.4262 |
| BusNo11 | -0.9603 | -0.1598 | 0.9932 | -2.9607 |

Active Power Loss = 6.577306E-03 pu

جدول ۷: نتایج پخش بار بعد از بهینه سازی برای شبکه ۱۲ شینه

| Name of Bus | P (pu) | Q (pu) | V (pu) | θ (Deg.) | InjectedQ (pu) |
|-------------|--------|--------|--------|----------|----------------|
| BusNo0 | 2.431 | -0.055 | 1.000 | 0.000 | -0.055 |
| BusNo1 | 3.711 | 1.144 | 1.010 | -1.731 | 0.000 |
| BusNo2 | 0.421 | -0.014 | 1.000 | -1.323 | 0.063 |
| BusNo3 | -0.780 | -0.150 | 1.004 | -7.294 | 0.000 |
| BusNo4 | -1.180 | 0.148 | 1.000 | -10.465 | 0.188 |
| BusNo5 | -1.910 | -0.170 | 1.008 | -2.310 | 0.000 |
| BusNo6 | -0.580 | -0.185 | 0.997 | -2.784 | 0.050 |
| BusNo7 | -0.200 | 0.018 | 1.000 | -6.634 | 0.087 |
| BusNo8 | 0.080 | -0.100 | 1.002 | -5.448 | 0.100 |
| BusNo9 | -0.190 | -0.035 | 1.002 | -4.878 | 0.000 |
| BusNo10 | -0.840 | -0.440 | 0.997 | -3.445 | 0.000 |
| BusNo11 | -0.960 | -0.160 | 1.001 | -2.966 | 0.000 |

Number of function evaluations = 498, Function minimum = 11.66201, Function initial value = 463.2707, Power loss minimum = 2.900708E-03 pu, Power loss initial value = 6.577306E-03 pu, Total injected reactive power (# cost) = .4875

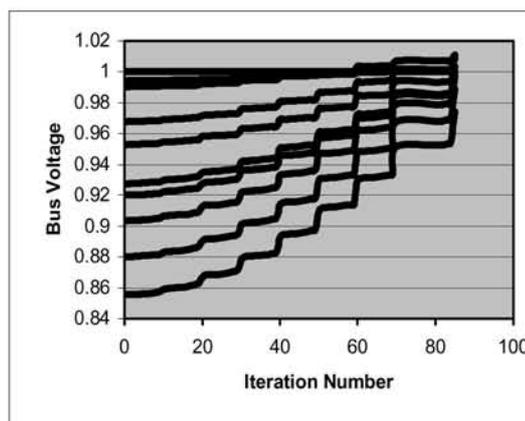
جدول ۸: توانهای راکتیو خازنی تزریقی به باسها بر حسب مقادیر موجود

بانکهای خازنی برای شبکه ۱۲ شینه

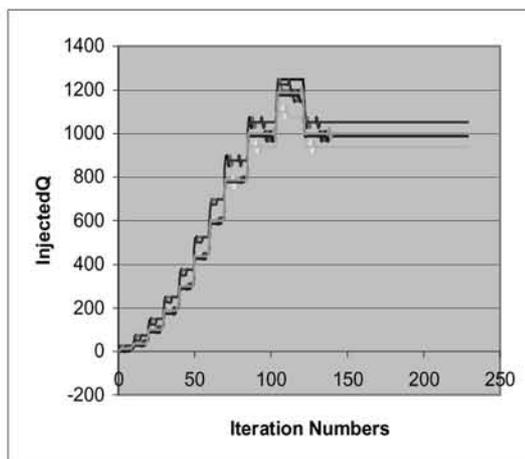
| Name of Bus | InjectedQ (pu) | VAR1 (kVar) | VAR2 (kVar) | VAR3 (kVar) |
|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| BusNo0 | -109.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo2 | 125.0 | 125.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo4 | 375.0 | 375.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo6 | 100.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo7 | 175.0 | 175.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo8 | 200.0 | 200.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| BusNo11 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Total Injected Reactive Power = 975 kVar, Total Injected Reactive Power Cost = 7.484E+07 Rial

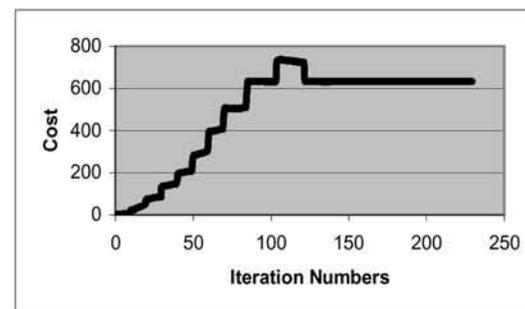
مشاهده می شود که با خازن گذاری بهینه میزان تلفات خط از مقدار اولیه حدود ۰/۰۰۶۵۷ pu به مقدار نهایی حدود ۰/۰۰۲۹۰ pu و همچنین تابع هدف از مقدار اولیه ۴۶۳/۲۷۰۷ pu به مقدار نهایی ۱۱/۶۶۲۰۱ pu کاهش یافته اند. کل توان راکتیو



شکل ۷: تغییرات ولتاژ باسهای سیستم بر حسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۰ شینه

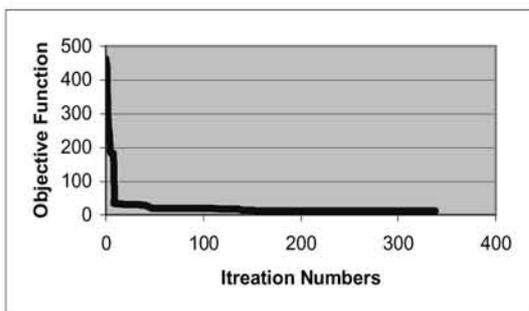


شکل ۸: تغییرات توان راکتیو خازنی تزریقی به هر یک از باسهای سیستم بر حسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۰ شینه

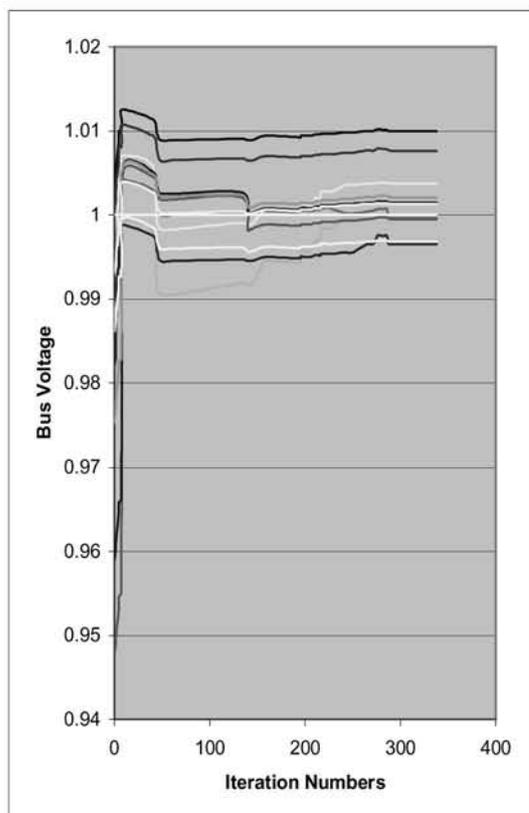


شکل ۹: تغییرات هزینه های بهینه سازی بر حسب تعداد تکرارها برای شبکه ۱۰ شینه

در جداول ۸-۶ نتایج پخش بار قبل و بعد از بهینه سازی را برای شبکه ۱۲ شینه نشان می دهند.



شکل ۱۲: تغییرات تابع هدف برحسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۲ شینه



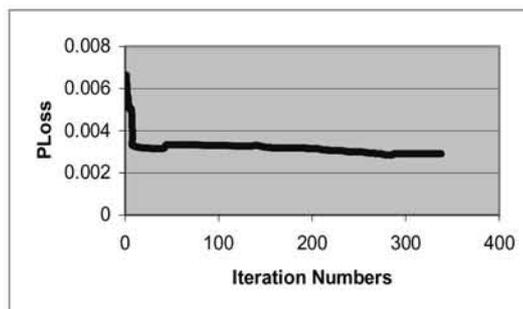
شکل ۱۳: تغییرات ولتاژ باسهای سیستم برحسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۲ شینه

شینه ۱۲

خازنی تزریقی به باسها در این حالت 0.4875 pu میباشد، که با تزریق این توان راکتیو خازنی تلفات خط انتقال تا حدود 56% کاهش می یابد. همچنین دوباره مشاهده می شود که پس از بهینه سازی ولتاژ تمامی باسها در حد 1 pu می شوند.

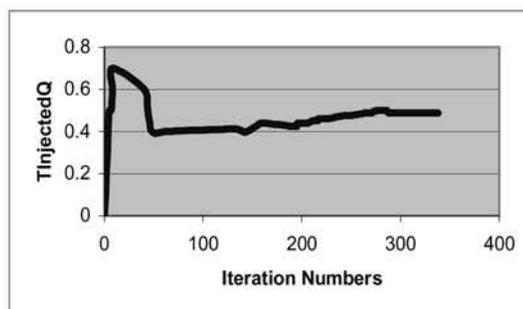
در اشکال زیر منحنی نمایش تلفات خط انتقال، مجموع توانهای راکتیو خازنی تزریقی به باسها، تابع هدف، ولتاژ هر یک از باسهای سیستم، توان راکتیو خازنی تزریقی به هر یک از باس بارهای سیستم و مجموع هزینه های خازن گذاری بر حسب تعداد تکرارها به ترتیب آمده است.

تفاوتهای شکلی، که در نتایج مربوط به این دو شبکه مشاهده می شوند به تفاوتهای ساختاری دو شبکه (یکی شعاعی و دومی حلقوی) مربوط می شوند.



شکل ۱۰: تغییرات تلفات اکتیو برحسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۲ شینه

شینه



شکل ۱۱: تغییرات مجموع توان راکتیو خازنی تزریقی به باسها برحسب

تعداد تکرار برای شبکه ۱۲ شینه

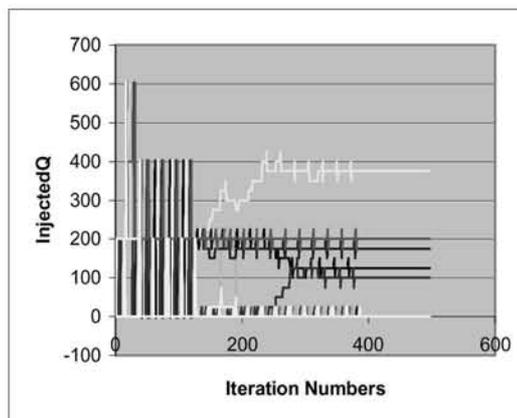
کاهش یافت و ولتاژ تمامی باسها تا حد ولتاژ باس مرجع تصحیح شدند.

از آنجائیکه توانهای راکتیو خازنی باسها (متغیرهای بهینه سازی) متغیرهای گسسته ای انتخاب شدند، نتایج بدست آمده از بهینه سازی نتایجی واقعی و به دور از تقریب و خطا بودند.

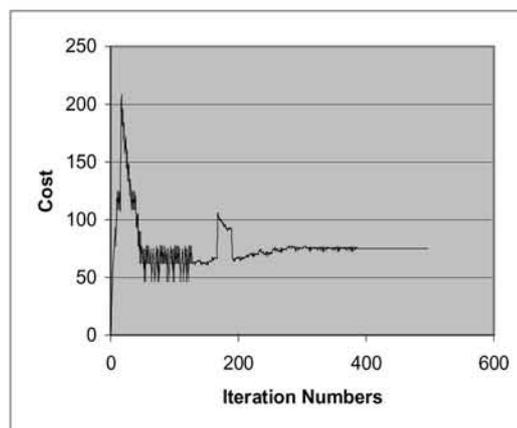
در روش ارائه شده جایابی و مقدار یابی خازنها به صورت توأمان انجام شده است و لذا خازنها در کل شبکه پخش شده اند.

۵- مراجع

- [1]. D.E. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison Wesley Pub. Co., 1989.
- [2]. D. Rajicic and A. Bose, "A modification to the fast decoupled power flow for networks with high R/X ratios", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 2, 1988, pp. 743-746.
- [3]. A. Augugliaro, "Optimal design and on-line control of switched capacitors in MV radial distribution networks", Proc. Of Power Computational Conference, Austria, 1990, pp. 455-461.
- [4]. J/J. Grainger and et al, "Volt/Var control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, Part 1: The overall problem", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, No. 11, 1985.
- [5]. H.D. Chaing and et al, "Optimal capacitor replacement and control in large scale unbalanced distribution systems: system modeling and a new formulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 1, 1995, pp. 356-369.
- [6]. K.H. Kim and S.K. You, "Voltage profile improvement by capacitor



شکل ۱۴: تغییرات توان راکتیو خازنی تزریقی به هر یک از باسهای سیستم برحسب تعداد تکرار برای شبکه ۱۲ شینه



شکل ۱۵: تغییرات هزینه های بهینه سازی برحسب تعداد تکرارها برای شبکه ۱۲ شینه

۴- نتیجه گیری

در این مقاله از روش ساده بهینه سازی HJ (با توجه به سرعت بالا و کارایی آن در شبکه های پیچیده) همراه با پخش بار FD جهت خازن گذاری بهینه در سیستم انرژی الکتریکی استفاده شد. تابع هدف مناسبی تعریف شد و برای بهینه سازی دو سیستم نمونه بکار رفت. نتیجه کار کاهش تلفات خط و اصلاح پروفیل ولتاژ در هر دو سیستم نمونه بود، بطوری که تلفات خط به طور متوسط تا حد ۷۰٪

placement and control in unbalanced distribution systems using GA", IEEE, 1999, pp.

- [7]. M. Defanti an et al, "Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms", IEEE, 1999, pp.
- [8]. B. Gou and A. Abur, "Optimal capacitor placement for improving power quality", IEEE, 1999, pp.
- [9]. H.N. Ng, M.M.A. Salama and A.Y. Chikhani, "Capacitor allocation by approximate reasoning: Fuzzy capacitor placement", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, 2000, pp.

[۱۰]. ایرج حسن زاده، محمد باقر بناء شریفیان و محمودرضا حقی فام، "کنترل بهینه توان راکتیو در شبکه های انرژی الکتریکی"، سیزدهمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۷۷، صفحات ۵۴۸-۵۶۲.

[۱۱]. سید محمد موسوی انزهائی و سایرین، "کاربرد الگوریتم ژنتیک در جایابی و تعیین بهینه خازنهای شبکه توزیع قدرت بمنظور کاهش تلفات توان و انرژی و بهبود پروفیل ولتاژ"، پنجمین کنفرانس مهندسی برق ایران، جلد دوم، ۱۳۷۶، صفحات ۱۸۸-۱۸۰.