



جایابی و تعیین ظرفیت بهینه CHP ها در شبکه توزیع و بررسی اثرات مثبت اقتصادی آن

حامد رویین^۱، رضا اسلامی^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند تبریز

خلاصه

تولید همزمان برق و حرارت به عنوان یک روش کارآمد برای کاهش مصرف انرژی در حال حاضر در دستور کار بسیاری از کشورهای پیشرفته قرار گرفته و سهم قابل توجهی از تولید برق و حرارت مورد نیاز در این کشورها با استفاده از این روش تأمین می‌گردد. عدم جایابی مناسب نیروگاه‌های تولید پراکنده در شبکه باعث افزایش تلفات و بالا رفتن هزینه‌های تولید و انتقال انرژی می‌شود. در این مقاله از الگوریتم MOPSO برای بهینه‌سازی استفاده شده است. این الگوریتم قادر به بهینه‌سازی چند تابع هدف به طور همزمان است. توابع هدف شامل کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و بهبود اعوجاج هارمونیکی (THD) هستند، بدین ترتیب که تعداد نیروگاه‌های پراکنده، محل نصب و ظرفیت آن‌ها چنان تعیین می‌شود که بیشترین کاهش تلفات شبکه با در نظر گرفتن قیود مسأله به وجود آید بنابراین لازم است با روش‌های بهینه‌سازی، جایابی این نیروگاه‌ها در شبکه انجام گیرد. روش پیشنهادی جهت جایابی CHP به شبکه ۱۸ باسه استاندارد IEEE اعمال شده است و نتایج شبیه‌سازی توانایی روش پیشنهادی را در بهبود مقادیر توابع هدف و ارضاء محدودیت‌ها نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: الگوریتم MOPSO، بهینه‌سازی، جایابی CHP(Combined heat and power)، منابع تولید پراکنده



۱- مقدمه

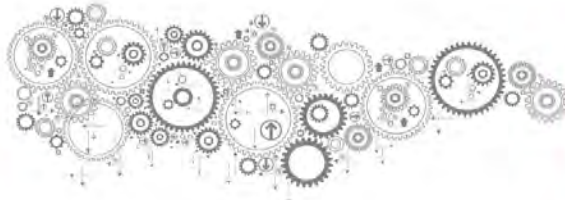
در دهه های اخیر، تجدید ساختار صنعت برق و همچنین خصوصی سازی این صنعت، مطرح و در برخی کشورها اعمال گشته است. به طوری که برای ایجاد فضای رقابتی مناسب، بخش های مختلف آن از جمله تولید، انتقال و توزیع از هم مستقل گردیده اند. این تغییر و تحولات از یک طرف و عواملی همچون آلودگی محیط زیست، مشکلات احداث خطوط انتقال جدید و نیز اقتصادی بودن ساخت واحدهای تولیدی در مقیاس کوچک در مقایسه با واحدهای تولیدی بزرگ از طرف دیگر، باعث استفاده از واحدهای تولیدی کوچک تحت عنوان "تولیدات پراکنده" (DG) گردیده است. IEEE، تولید برق توسط وسایلی که به اندازه کافی از نیروگاه های مرکزی کوچک تر بوده و قابل نصب در محل مصرف هستند را به عنوان تولید پراکنده معرفی کرده است.

استفاده از واحدهای تولید پراکنده تأثیر قابل توجهی بر مسائل فنی و اقتصادی سیستم های قدرت می گذارد. یکی از انواع این مولدها، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت CHP است، که با توجه به دسترس بودن سوخت گاز در کشور می توان به خوبی از بازده بالا این مولدها بهره برداری نمود. مزیت عمده آنها امکان استفاده از حرارت اضافی خروجی جهت تأمین گرمایش یا سرمایش مورد نیاز مصرف کننده ها است که باعث افزایش راندمان آنها تا ۷۰٪ می شود [۱].

تولید همزمان برق و حرارت یا CHP، به معنای تولید برق و حرارت مفید از یک منبع انرژی است. عموماً در سیستم های تولید همزمان توان مکانیکی برای راندن یک ژنراتور برق مورد استفاده قرار گرفته و حرارت تولید شده مفید به شکل بخار، آب داغ و یا هوای داغ در فرآیندهای مختلف مانند خشک کردن، گرمایش، آب شیرین کن و ... به مصرف می رسد. البته این توان مکانیکی تولید شده علاوه بر تولید انرژی الکتریکی در فن ها، پمپ ها و کمپرسورهای هوا در کمپرسورهای تبرید نیز قابل استفاده است. مهم ترین قابلیت تولید همزمان، امکان بیشترین بهره برداری از انرژی مفید سوخت در مقایسه با سیستم های سنتی رایج مانند نیروگاه ها که تنها از سوخت برای تولید برق استفاده می کنند و یا بویلرهای واحدهای صنعتی که تنها برای تولید بخار به کار می روند، می باشد سیستم های تولید همزمان عمدتاً به دو صورت سیکل نزولی (Bottoming Cycle) و سیکل صعودی (Topping Cycle) طراحی می شوند.

در سیستم های صعودی، حرارت تولید شده ابتدا برای تولید برق در مولد توان به کار می رود، سپس بازیافت شده و به مصارف گرمایش یا سرمایش و ... می رسد. در سیستم های نزولی، حرارت تولید شده با دمای بالا ابتدا در یک فرایند مورد استفاده قرار می گیرد سپس بازیافت شده و به صورت مستقیم و یا با به کارگیری مبدل های حرارتی تولید بخار، در مولدهای توان برای تولید برق استفاده می شود [۲].

یکی از مسائلی که در استفاده از این مولدها مدنظر است، یافتن مصرف کننده حرارتی و برودتی مناسب است که بتواند کارکرد CHP را مقرون به صرفه کند. به عبارتی واحد CHP با حداکثر توان خود هم الکتریسیته و هم حرارت را برای مصرف کننده تولید کند. کشورهایی نظیر فنلاند، استرالیا و سوئد تمام ظرفیت تولید نیروگاه های حرارتی خود را با روش تولید همزمان برق و حرارت استفاده می نمایند. همچنین کشورهای دانمارک، هلند، آلمان، روسیه، اتریش، ژاپن، انگلستان و آمریکا حداکثر ظرفیت تولید برق حرارتی خود را به استفاده از روش مذکور اختصاص داده اند و کشورهای کانادا، هندوستان، آفریقای جنوبی، ایرلند، کره جنوبی، مکزیک و یونان نیز به میزان قابل توجهی به این روش روی آورده اند. همان طور که اشاره شد، در حال حاضر در بسیاری از نقاط جهان از سیستم های تولید همزمان استفاده می کنند. جدول (۱) لیست ۱۰ کشور جهان و درصد تأمین حرارت به وسیله سیستم های تولید همزمان به نسبت کل حرارت مصرفی در این کشورها را نشان می دهد [۱].



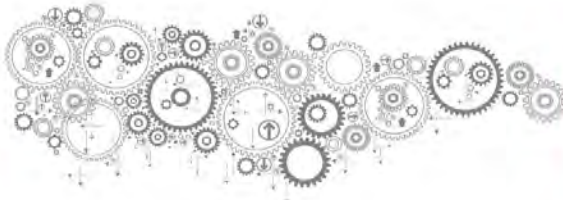
جدول (۱): استفاده کنندگان عمده CHP

نام کشور	درصد حرارت تأمین شده به روش متمرکز به کل تقاضای حرارت	سهم CHP	طول خطوط انتقال آب گرم (Km)
ایسلند	٪۸۵	---	---
روسیه	٪۷۰	---	---
لهستان	٪۵۲	---	۱۶۳۹۲
فنلاند	٪۵۰	٪۳۶	۲۳۹۰۰
دانمارک	٪۵۰	٪۶۲	۲۳۹۰۰
سوئد	٪۴۲	٪۶	۱۱۱۸۰
جمهوری چک	٪۲۲	---	۲۵۰۱
اتریش	٪۱۴	٪۲۵	۲۶۴۶
آلمان	٪۱۲	٪۸	۱۷۴۹۶۹
کره	٪۴	٪۲۵	۲۶۴۶

به کارگیری CHP در سیستم توزیع مزایای زیست محیطی، اقتصادی و فنی بسیار زیادی را به دنبال دارد. برای رسیدن به این مزایا CHP ها باید دارای اندازه مناسب بوده و در مکان های مناسب نصب شوند.

به طور کلی مزایای تولید همزمان برق و حرارت در محل مصرف عبارتند از:

- کاهش تلفات انتقال قدرت
 - سهولت امکان بازیافت گرما در این نیروگاه ها
 - کاهش آلودگی های زیست محیطی و صوتی نیروگاه های بزرگ
 - کاهش تلفات با جایابی بهینه نیروگاه های تولید پراکنده در شبکه توزیع
 - آزاد شدن ظرفیت سیستم های انتقال و توزیع اعم از خطوط و پست ها
 - کم کردن هزینه مربوط به تجهیزات قدرت
 - افزایش بازده سوخت دریافتی به برق تحویلی
 - افزایش امکان حضور طیف گسترده بخش خصوصی
 - حذف تلفات توان پیک ۳۰ درصدی و تلفات انرژی ۱۸ درصدی
 - کاهش تراکم شبکه
 - تملک کمتر زمین برای توسعه شبکه
 - افزایش پایداری و امنیت فنی سیستم قدرت
- با توجه به راندمان کاری مولدهای تولید همزمان برق و حرارت، به ازای هر ۱ مگاوات ظرفیت نصب شده سالانه از انتشار ۳۰۰۰ تن گازهای گلخانه ای جلوگیری می شود. برابر مفاد پیمان کیوتو، با ثبت پروژه به عنوان یک پروژه دوستدار محیط زیست، حق انتشار آلاینده به صاحب مولد اعطا و برابر قیمت روز Right Emission در بورس های جهانی، باعث درآمدزایی تا ۱۰ سال خواهد بود [۳].



بهینه سازی شبکه های توزیع و ارتقاء آن به منظور ارائه خدمات با قابلیت اطمینان بیشتر و اقتصادی تر همواره یکی از چالش های پیش روی صنعت برق بوده است. امروزه پیشرفت تکنولوژی گستره وسیعی از انواع واحدهای تولید پراکنده (DG) و به خصوص واحدهای تولید همزمان (CHP) ایجاد کرده است که می توانند در کاهش هزینه ها به رقابت بپردازند. در جابجایی تولید پراکنده، معمولا تابع هدف شامل کاهش تلفات، بهبود پروفایل ولتاژ و پایداری ولتاژ است که توسط روش های بهینه سازی همچون GA، PSO و غیره، محل و ظرفیت بهینه DG تعیین می شود [۴] و [۵]. مسئله اضافه کردن واحدهای CHP به شبکه توزیع با اهداف گوناگونی مطرح و با روش های مختلفی حل شده است. در این مقاله جابجایی CHP در شبکه استاندارد ۱۸ باسه IEEE انجام شده است. لازم به ذکر است که توابع هدف شامل کاهش تلفات، بهبود پروفایل ولتاژ و بهبود اعوجاج هارمونیک (THD) می باشد و از مفاهیم بهینه پارتو و الگوریتم MOPSO جهت بهینه سازی استفاده شده است. همچنین منابع CHP در سمت برقی آن به عنوان یک منبع تولید هارمونیک در نظر گرفته شده است. علاوه بر این فرض شده است که منبع CHP قادر به تولید توان اکتیو و راکتیو می باشد. در این مقاله محدودیت هایی مدنظر قرار گرفته که در پایان این محدودیت ها باید ارضاء شوند.

۲- معرفی الگوریتم تکاملی چند هدفه MOPSO

مسائل بهینه سازی چند هدفه همانند رابطه (۱) شامل چندین تابع هدف ناسازگار، قیود تساوی و نامساوی بوده که بطور همزمان باید بهینه شوند:

$$\begin{aligned} \min y &= \vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T \\ \text{s.t. } h_i(\vec{x}) &= 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, p \\ g_j(\vec{x}) &\geq 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

where $\vec{X}^* = [X_1^*, X_2^*, \dots, X_N^*]^T \in \Omega \forall i \in \{1, 2, \dots, k\}$:
 $(\exists j \in \{1, 2, \dots, k\} : \vec{f}_j(\vec{x}_1) \leq \vec{f}_j(\vec{x}_2) \vec{x}_1 \leq \vec{f}_i(\vec{x}_2))$

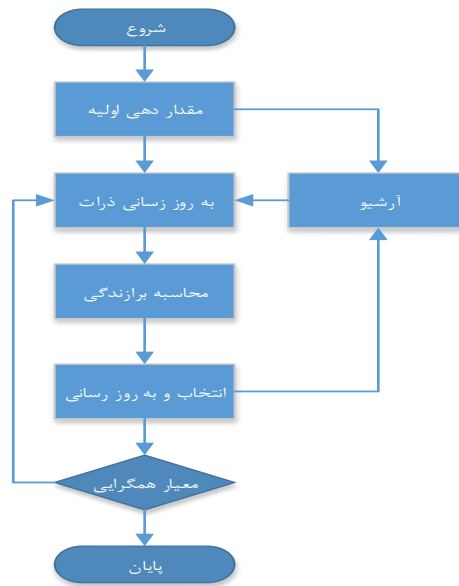
فضایی که تابع هدف در آن تعریف می شود، فضای هدف نامیده می شود. در بهینه سازی چند هدفه، هر دو حل نسبت به همدیگر می توانند دو حالت داشته باشند. یکی بر دیگری چیره شود و اینکه هیچ یک نتوانند بر دیگری چیره شوند. حل $x_1 \in \Omega$ بر حل $x_2 \in \Omega$ چیره خواهد شد اگر حل x_1 برازندگی حداقل یک تابع هدف را نسبت به حل x_2 بهتر کرده و برازندگی سایر توابع را نسبت به x_2 بدتر نسازد. بردار تصمیم $x_1 \in \Omega$ یک جواب بهینه پارتو است اگر هیچ $x_2 \in \Omega$ وجود نداشته باشد که بتواند بر x_1 چیره شود. به مجموعه جواب های بهینه پارتو یک دسته جواب بهینه پارتو گفته می شود. با ترکیب مفاهیم بهینه سازی پارتو با اصول اساسی الگوریتم PSO روش بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) به وجود می آید که از آن می توان به منظور حل مسائل بهینه سازی چند هدفه استفاده نمود. در الگوریتم MOPSO از یک آرشیو استفاده می شود. منظور از آرشیو یک حافظه خارجی بوده که در این آرشیو حل های چیره نشده ذخیره می شود. این الگوریتم ابتدا با استفاده از یکسری ذرات تصادفی شروع به کار می کند و در طول یک پروسه تکراری کلیدی ذرات جمعیت با یکدیگر مقایسه شده و مکان (موقعیت) ذرات چیره نشده در آرشیو ذخیره می شوند. سرعت و موقعیت جدید ذره \vec{A}_m در بعد d و تکرار $t+1$ با استفاده از روابط زیر بروز می شوند.



$$V_{id}^{t+1} = wV_{id}^t + c_1 rand_1 \times (pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 rand_2 \times (gbest_{id}^t - x_{id}^t) \quad (2)$$

$$x_{id}^t = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (3)$$

چرخه‌ای که در الگوریتم MOPSO تکرار می‌شود، مطابق شکل (۱) است.



شکل (۱): الگوریتم MOPSO

۳- معرفی توابع هدف

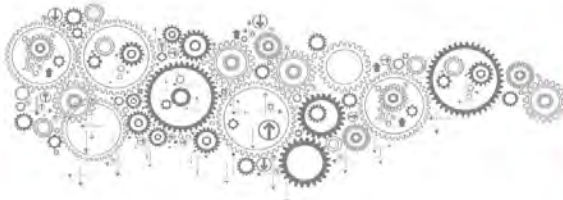
۳-۱- تلفات شبکه

همان طور که می‌دانیم یکی از اهداف در جابجایی منابع تولید پراکنده، مینیمم کردن تلفات حقیقی توان است. می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۴) تلفات حقیقی توان را به دست آورد [۱۲]:

$$F_1 = P_{LOSS} = \sum_{h=1}^L P_{LOSS}^{(h)} = \sum_{h=1}^L \left[\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^n V_j^{(h)} V_m^{(h)} Y_{jm}^{(h)} \cos(\theta_j^{(h)} - \theta_m^{(h)} - \delta_{jm}^{(h)}) \right] \quad (4)$$

$$m > j$$

که در آن، n تعداد کل شین‌ها، $V_j^{(h)}$ اندازه ولتاژ هارمونیک h ام در شین j ام، $\theta_j^{(h)}$ فاز ولتاژ هارمونیک h ام در شین j ام، $Y_{jm}^{(h)}$ اندازه ادمیتانس خط متناظر با هارمونیک h ام بین شین‌های j و m و $\delta_{jm}^{(h)}$ زاویه ادمیتانس خط متناظر با هارمونیک h ام بین شین‌های j و m است.



۲-۳- پروفیل ولتاژ

با جایابی بهینه منابع تولید پراکنده می توان پروفیل ولتاژ را بهبود بخشید. در حقیقت می توان بیان نمود که منظور از بهبود پروفیل ولتاژ یعنی اینکه ولتاژ تمام باس ها به مقدار یک پریونیت نزدیک باشد. پروفیل ولتاژ را می توان به صورت زیر فرمول بندی کرد:

$$VI_i = |V_{i,ref} - V_i| \quad (5)$$

که در آن، VI_i ولتاژ باس i ام $V_{i,ref}$ ولتاژ مطلوب می باشد که معمولا یک پریونیت در نظر گرفته می شود. برای هر باس یک مقدار VI به دست می آید که هدف مینیمم کردن ماکزیمم مقدار VI است، به عبارت دیگر هدف این است که عبارت زیر حداقل شود:

$$F_2 = MAX(|V_{i,ref} - V_i|) = MAX(VI_i) \quad (6)$$

۳-۳- اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ (THD_v)

شبکه مورد نظر دارای بارهای غیر خطی است، همچنین منبع تولید پراکنده در نظر گرفته شده، تولید هارمونیک می کند. لذا در این حالت، با جایابی منابع تولید پراکنده، THD ولتاژ شبکه می تواند از حد مجاز آن که حدود ۵٪ است، بالاتر رود. بنابراین یکی از پارامترهایی که باید مینیمم شود، THD ولتاژ است که به صورت رابطه ی (۷) تعریف می شود:

$$THD_{v,i} = \frac{[\sqrt{\sum_{h \neq 1} (V_i^{(h)})^2}]}{V_i^{(1)}} \times 100\% \quad (7)$$

که در آن، i شماره باس، h مرتبه هارمونیک، $V_i^{(h)}$ ولتاژ هارمونیک مرتبه h ام مربوط به باس i و $V_i^{(1)}$ مولفه اصلی ولتاژ باس i ام است.

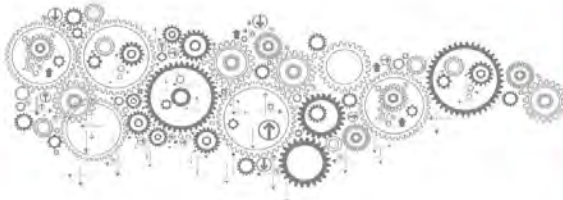
۴-۳- تابع هزینه مرتبط با نصب و بهره برداری از CHP

هزینه ی سرمایه گذاری CHP شامل خرید واحد CHP، هزینه های مربوط به تحقیقات اولیه، تعبیه مکان برای نصب CHP، ساختمان و ادوات مونیتورینگ است. این هزینه ها می تواند به صورت معادله (۸) بیان شود:

$$C_1 = \sum_{i=1}^{NCHP} \sum_{K=1}^{KCHP} Cost_{Inv,lk} \quad (8)$$

که در آن، $Cost_{Inv,lk}$ هزینه سرمایه گذاری منابع CHP برحسب ($\$/MW$)، $NCHP$ تعداد واحد CHP نصب شده در شبکه و $KCHP$ ظرفیت CHP از ۲۰۰ کیلووات تا ۵ مگاوات است. هزینه نگهداری و تعمیرات CHP شامل هزینه تعمیر قطعات و سرویس سالیانه مکانیکی و الکتریکی است. این هزینه به همراه ارزش فعلی آن می تواند به صورت معادلات زیر فرمول بندی شود:

$$C_2 = \sum_{i=1}^{NCHP} \sum_{K=1}^{KCHP} Cost_{Main,lk} \quad (9)$$



$$CPV(C_2) = C_2 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^t \quad (10)$$

که در آن، $Cos t_{Main,ik}$ هزینه تعمیر و نگهداری در هر سال ($\$/MW-CHP$)، $IntR$ نرخ بهره، $InfR$ نرخ تورم، T طول عمر CHP و $CPV()$ مقدار ارزش فعلی هزینه است. همچنین هزینه سوخت CHP و مقدار ارزش فعلی آن به صورت فرمول‌های زیر بیان می‌شود:

$$C_3 = \sum_{i=1}^{NDG} \sum_{K=1}^{KDG} T_J \times CHP_{J,ik} \times CP_{ik} \quad (11)$$

$$CPV(C_3) = C_3 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^t \quad (12)$$

که در آن، $CHP_{J,ik}$ توان تولید شده به وسیله منبع CHP نصب شده در شبکه در سطح بار مشخص برحسب (MW)، CP_{ik} هزینه کارکرد واحدهای CHP بر حسب ($\$/MWh$)، T_J زمان سپری شده ($h/year$) است.

در یک سیستم قدرت، شرکت‌های توزیع انرژی الکتریکی توان مورد نیاز خود را از شبکه انتقال خریداری می‌کنند. بخشی از این توان برای مصرف‌کنندگان سیستم توزیع است و بخش دیگر آن صرف تلفات خط انتقال و تجهیزات می‌شود. کاهش انرژی الکتریکی دریافتی و در نتیجه کاهش تلفات در حضور CHP ، توسط معادله‌ی (۱۳) و (۱۴) فرمول‌بندی می‌شود:

$$PT = PT_{NCHPJ} - PT_{CHPJ} = Loss_{NCHPJ} + \sum_{i=1}^{NCHP} \sum_{K=1}^{KCHP} \sum_{L=1}^{Nloc} (CHP_{J,ik} - Loss_{J,ikl}^{chp}) \quad (13)$$

$$Loss_{J,IKL} = \sum_{i=1}^{NCHP} \sum_{k=1}^{KCHP} \sum_{L=1}^{Nloc} (Loss_{NCHPJ} - Loss_{J,ikl}^{chp}) \quad (14)$$

که در آن، PT_{NCHPJ} توان اکتیو درخواستی بدون در نظر گرفتن CHP در شبکه برحسب MW ، $Loss_{NCHPJ}$ تلفات سیستم بدون در نظر گرفتن CHP در شبکه برحسب MW ، PT_{CHPJ} توان اکتیو درخواستی با در نظر گرفتن CHP در شبکه برحسب MW ، $Loss_{J,ikl}^{chp}$ تلفات سیستم با در نظر گرفتن CHP در شبکه برحسب MW است.

بر این اساس سود ناشی از کاهش توان اکتیو برای هر سال که شرکت‌های توزیع می‌توانند بدست آورند و مقدار ارزش کنونی آن به وسیله معادله‌ی (۱۵) و (۱۶) بیان می‌شود:

$$B_1 = \sum_{J=1}^3 C_{MWh,J} \times PT \times T_J \quad (15)$$

$$BPV(B_1) = B_1 \sum_{t=1}^T \left(\frac{1 + InfR}{1 + IntR} \right)^t \quad (16)$$

که در آن، B_1 ارزش کنونی سود، $C_{MWh,J}$ قیمت بازار انرژی در سطح بار J بر حسب ($\$/MWh$) است و لذا معادله شماره (۱۷) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$F_{Saving} = profit - cost = BPV(B_1) - [C_1 + CPV(C_2) + CPV(C_3)] \quad (17)$$

که هدف حداکثر کردن این تابع است.



۵-۳- محدودیت ها و قیود مسئله

محدودیت ولتاژ: ولتاژ هر باس نباید از حدود مجاز خود تجاوز کند.
بنابراین خواهیم داشت:

$$V_{\min} \leq \sqrt{\sum_h (V_i^h)^2} \leq V_{\max} \quad (18)$$

با توجه به استاندارد IEEE-519، $V_{\min}=0.9(\text{pu})$ و $V_{\max}=1.1(\text{pu})$ در نظر گرفته می شود.

محدودیت THD: مقدار ماکزیمم $THD_{v,i}$ باید از THD_v^{\max} کمتر باشد، به عبارت دیگر خواهیم داشت:

$$\text{MAX}(THD_{v,i}) \leq THD_v^{\max} \quad (19)$$

که با توجه به استاندارد IEEE-519 مقدار مجاز هارمونیک حدود ۵ درصد است یعنی داریم:
 $THD_v^{\max} = 5\%$
قیود مربوط به واحدهای گازسوز شامل دو بخش کلی است. بخش اول مربوط به کارکرد الکتریکی این واحدها است. مجموعه روابط (۲۰) قیود مربوط به این قسمت را نشان می دهند. این قیود شامل محدوده تولید توان اکتیو و راکتیو محدوده ضریب توان مجاز این واحدها است.

$$\begin{aligned} P_{CHP_i}^{\min} &\leq P_{CHP_i} \leq P_{CHP_i}^{\max} \\ Q_{CHP_i}^{\min} &\leq Q_{CHP_i} \leq Q_{CHP_i}^{\max} \end{aligned} \quad (20)$$

بخش دوم قید مربوط به محدوده حرارت بازیافتی از این واحدها است. رابطه (۲۱) این قید را نشان می دهد.

$$Q_{CHP_i}(n,t) \leq k_{heat} \cdot P_{CHP_i}(n,t) \quad (21)$$

در صورت وجود بار حرارتی محلی و امکان بازیافت حرارت، نصب واحدهای گازسوز با دو دیدگاه مختلف می تواند انجام شود که این دو دیدگاه بیان شده اند. روابط (۲۲) و (۲۳) قیود مربوط به این قسمت را به ترتیب برای اولویت تولید حرارت و تولید برق نشان می دهند.

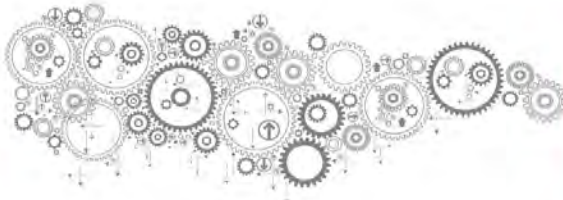
$$Q_{CHP_i}(n,t) \geq Q_{D_i}(t) \cdot (1+r_h)^n \quad (22)$$

$$Q_{CHP_i}(n,t) + Q_{boiler_i}(n,t) = Q_{D_i}(t) \cdot (1+r_h)^n \quad (23)$$

در رابطه (۲۳) پارامتری است که در صورت مثبت بودن بیانگر نیاز به نصب بویلر کمکی برای تامین حرارت است. در صورت منفی بودن بیانگر مازاد بودن گرمای قابل بازیافت نسبت به مصرف محلی است، که در این صورت باید مقداری از گرمای موجود به محیط داده شود.

۶-۳- نحوه در نظر گرفتن قیود مسأله در تابع هزینه

در این مطالعه قیود مسأله به صورت ضرایب جریمه در تابع هدف اصلی، ضرب شده اند. البته باید توجه داشت که تعیین دقیق ضرایب جریمه بطور جداگانه برای هر قسمت از تابع هدف، در بهینه سازی مهم و ضروری است. یعنی این ضرایب جریمه بستگی به اهمیتی که دارند، باید به گونه ای با ضرایب متفاوت در تابع هزینه اصلی ضرب شوند، که در نهایت بهینه سازی مطلوب حاصل شود. ضرایب جریمه مورد استفاده به صورت زیر هستند:



۱-۶-۳- ضریب جریمه مربوط به قید ولتاژ شین ها

این ضریب جریمه برای محدود نمودن ولتاژ شین ها بکار گرفته شده است و به صورت رابطه‌ی (۲۴) تعریف می‌شود:

$$V_i = \begin{cases} 1 & 0.9 \leq V_i \leq 1.1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \\ \max(V_i^{pu}) & \text{elseif } \max(V_i^{pu}) > 1.1 \text{ and } \min(V_i^{pu}) \geq 0.9 \\ \frac{1}{\min(V_i^{pu})} & \text{elseif } \max(V_i^{pu}) \leq 1.1 \text{ and } \min(V_i^{pu}) < 0.9 \\ \max\left\{\max(V_i^{pu}), \frac{1}{\min(V_i^{pu})}\right\} & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

که در رابطه فوق، $\min(V_i^{pu})$ و $\max(V_i^{pu})$ به ترتیب حداقل و حداکثر ولتاژ شین ها برحسب پریونیت است.

۲-۶-۳- ضریب جریمه مربوط به قید حداکثر اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ شین ها

این ضریب جریمه برای محدود نمودن حداکثر اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ شین ها بکار گرفته شده است و به صورت رابطه (۲۵) تعریف می‌شود:

$$F_{THD} = \begin{cases} 1 & \text{if } \max(THD_{v,i}) \leq THD^{\max}, i = 1, 2, 3, \dots, n \\ \frac{\max(THD_{v,i})}{THD^{\max}} & \text{else} \end{cases} \quad (25)$$

که در رابطه فوق، $\max(THD_{v,i})$ حداکثر اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ شین ها برحسب درصد و THD^{\max} درصد حداکثر اعوجاج هارمونیک مجاز بر طبق استاندارد IEEE است که در مطالعه حاضر $THD^{\max} = 5\%$ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که از مفاهیم بهینه پارتو برای این مقاله استفاده شده است لذا تابع هدف را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$F = \begin{cases} \text{Min}(F_{Cost}) \\ \text{Min}(F_1) \\ \text{Min}(F_2) \end{cases} \quad (26)$$

تابع هدف کلی را که قیود مسئله را هم در نظر می‌گیرد، به صورت معادله‌ی (۲۷) در می‌آید:

$$F_{tot} = F_V \times F_{THD} \times F \quad (27)$$

لذا توابع هدف مورد نظر به دست می‌آید.

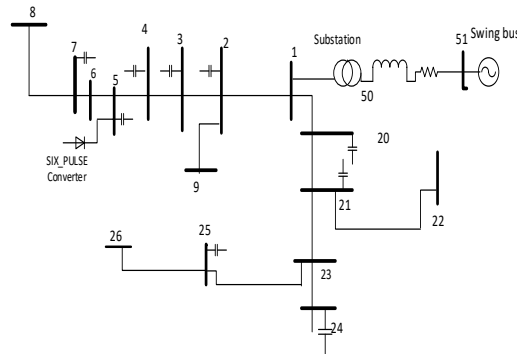
۴- نتایج شبیه سازی



شبکه مورد مطالعه جهت جایابی CHP در شرایط هارمونیک، شبکه ۱۸ باسه نمونه IEEE است که دیاگرام تک خطی آن در شکل (۲) و مشخصات آن‌ها در [۱۱] آورده شده است. در این شبکه در باس ۵ یک بار غیر خطی قرار دارد که می‌توان فرض نمود این بار غیر خطی یک کوره قوس الکتریک با توان‌های اکتیو ۳۰۰۰ کیلو وات و راکتیو ۲۲۶۰ کیلو وار می‌باشد.

در ابتدای جایابی CHP، شبکه نمونه تحت شرایط بار پایه خود قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که کلیه مقادیر مصرف و تولید روی تمامی باس‌ها در [۱۱] آورده شده است. سپس شبکه مذکور تحت شرایط ۸۰ درصد و ۱۲۰ درصد بار پایه خود قرار گرفته و مقادیر مصرف و تولید باس‌ها به ترتیب ۸۰ درصد و ۱۲۰ درصد مقادیر ارائه شده انتخاب شده است. همان طور که اشاره شد، منبع CHP که جایابی آن انجام شده است، قادر به تولید توان اکتیو و راکتیو است.

در این قسمت نتایج اعمال الگوریتم بهینه سازی روی شبکه ۱۸ باسه مذکور به ازای ۳ سطح بار مختلف ارائه شده است. علت استفاده از چند سطح بار مختلف در این شبیه سازی، نمایش کارایی الگوریتم ارائه شده جهت جایابی منابع CHP تحت شرایط هارمونیک در یک شبکه نسبتاً واقعی است. در این مقاله کلیه محاسبات مربوط به الگوریتم PSO با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است. در این قسمت به بررسی جایابی منبع CHP با مولد از نوع سنکرون که قادر به تولید توان اکتیو و راکتیو است، پرداخته شده است. از آنجایی که CHP در ارتباط با مصرف کننده‌های حرارتی است لذا مطلوب است که محل قرار گیری این منابع حداقل در نزدیکی این باس‌ها باشد. بنابراین لازم است که باس‌هایی که در آن مصرف کننده‌های حرارتی قرار دارند مشخص شوند. در روند حل مسئله جایابی، این باس‌ها به عنوان باس‌های کاندیدا در نظر گرفته می‌شوند.



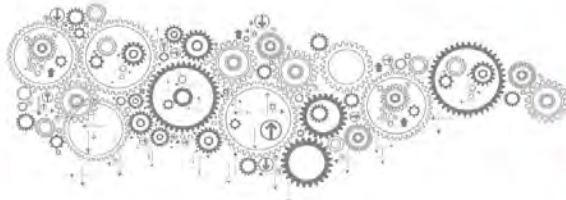
شکل (۲): دیاگرام تک خطی شبکه ۱۸ باسه

در شبکه ۱۸ باسه مذکور، فرض شده است که در باس‌های ۵، ۶، ۸، ۲۰ و ۲۱ مصرف کننده‌های حرارتی قرار دارند. و به عنوان باس‌های کاندیدا در نظر گرفته خواهند شد.

در جدول (۲) تا (۴) نتایج جایابی CHP به ترتیب به ازای اعمال بار پایه، ۱۲۰٪ بار پایه و ۸۰٪ بار پایه آورده شده است.

جدول (۲): نتایج جایابی CHP به ازای اعمال بار پایه

تعداد CHP	شماره باس دارای CHP	مقدار توان اکتیو CHP (MW)	مقدار توان راکتیو تولید شده توسط CHP (MVar)	تلفات (KW)	THD _{Max} (%)	Saving(\$)
۰	-	-	-	۲۶۰	۷,۰۱	-



۱	۵	۳,۸۲۶۵۰۹	۲,۳۲۷۱۴	۱۷۶	۱,۴۲	۲۵۱۱۹۱۷
۲	۶	۲,۶۲۱۳۶	۱,۴۹۵۴۱۸	۱۷۴	۵	۲۰۱۰۰۶۴
	۲۰	۰,۳۳۱۱۸۸	۰,۸۷۶۸۸			

جدول (۳): نتایج جایابی CHP به ازای اعمال ۱۲۰٪ بار پایه

تعداد CHP	شماره باس دارای CHP	مقدار توان اکتیو CHP (MW)	مقدار توان راکتیو تولید شده توسط CHP (MVar)	تلفات (KW)	THD _{Max} (%)	Saving (\$)
۰	-	-	-	۳۶۸	۸,۲۷	-
۱	۶	۳,۹۴۲۷۹۲	۲,۷۱۲۲۵۷	۲۲۹	۳,۳۹	۲۵۷۴۷۱۷
۲	۵	۴,۹۴۲۰۸۷	۳,۴۸۷۵۶۷	۱۸۶	۴,۸	۴۲۴۲۸۰۴
	۲۱	۱,۷۰۴۴۵۹	۱,۲۰۴۶۸۷			

جدول (۴): نتایج جایابی CHP به ازای اعمال ۸۰٪ بار پایه

تعداد CHP	شماره باس دارای CHP	مقدار توان اکتیو CHP (MW)	مقدار توان راکتیو تولید شده توسط CHP (MVar)	تلفات (KW)	THD _{Max} (%)	Saving (\$)
۰	-	-	-	۱۹۳	۵,۴۳	-
۱	۶	۲,۷۱۵۴۸	۱,۶۲۶۲۶۹	۱۵۵	۴,۳۷	۹۰۷۷۹۳
۲	۶	۱,۶۵۷۹۳	۱,۰۷۰۹۹۱	۱۵۴	۴,۱۱	۸۸۹۵۸۷
	۸	۱,۰۰۸۷۲	۰,۶۴۴۸۱۸			

در جدول (۵) نتایج قبل از جایابی CHP و بعد از جایابی آن، به ازای اعمال بار پایه با هم مقایسه شده است.

جدول (۵): مقایسه نتایج قبل و بعد از جایابی CHP به ازای اعمال بار پایه

تعداد CHP	THD _{MAX} (%)	V _{MIN} (pu)	V _{MAX} (pu)	P _{LOSS} (KW)
۰	۷,۰۱	۱,۰۲۶۹	۱,۰۵۶۴	۲۶۰
۱	۱,۴۲	۱,۰۵۱۵	۱,۰۸۳۸	۱۷۶
۲	۵	۱,۰۵۱۵	۱,۰۸۲۳	۱۷۴

۵- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج جایابی منبع CHP در شبکه ۱۸ باس IEEE در سه سطح بار مختلف به وسیله الگوریتم MOPSO، مورد بررسی قرار گرفت. جایابی تعداد یک و دو واحد CHP با در نظر گرفتن باسهای مصرف کننده حرارتی که در حقیقت باسهای کاندیدا هستند، صورت پذیرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد که اگرچه منبع CHP مورد استفاده، یک منبع تولید هارمونیک است ولیکن جایابی مناسب آن باعث کاهش THD می شود. هم چنین نتایج حاکی از آن است که کلیه توابع هدف مورد نظر به همراه محدودیت های در نظر گرفته شده، بهبود یافته است. لازم به ذکر است که در این روش جایابی CHP باعث کاهش هزینه و افزایش سود در مقایسه با روش های سنتی و قدیمی می گردد. نتایج به دست آمده از اعمال



الگوریتم MOPSO بر روی شبکه استاندارد ۱۸ باسه IEEE کارایی آن را در حل مسائل بهینه سازی چندهدفه تأیید می کند.

۶- مراجع

1. J. Heo, C. Seon Hong, S. Bong Kang, AND S. Soo Jeon, "Design and Implementation of Control Mechanism for Standby Power Reduction," IEEE Trans. Consum. Electron., VOL. 54, NO. 1, PP. 179–185, FEB. 2014.
2. Oland, C. B. (2004). "Guide to Combined Heat and Power Systems for Boiler Owners and Operators." Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2004/144
3. "Catalog of CHP Technologies," U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership Tech. REP., DEC. 2014 [ONLINE]. Available: [HTTP://WWW.EPA.GOV/CHP/DOCUMENTS/CATALOG_CHPTECH_INTRO.PDF](http://www.epa.gov/chp/documents/catalog_chp_tech_intro.pdf)
4. M. H. Moradi, M. Abedini, "Optimal Multi- Distributed Location and Capacity by Genetic Algorithm", The 9th International Power and Energy Conference, 27-29, 2010, Singapore.
5. M. H. Moradi, M. Abedini, "A Combination of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Optimal DG Location and Sizing in Distribution Systems ", The 9th International Power and Energy Conference, 27-29, 2010, Singapore.
6. M. H. Moradi, Farhad Samaie, "combined Heat and Power (CHP) Allocation and Capacity determination Based on Bus Thermal and Electrical coefficient using Game Theory", Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, 2011.
7. M. H. Moradi, Farhad Samaie, " Combined Heat and Power (CCM) Allocation and Capacity determination Based on Bus Thermal and Electrical coefficient using Game Theory", 8th Asian Control Conference ASCC 2011 - Kaohsiung-Taiwan, 2011.
8. Reza Hashemi, "A Developed Off/line Model for Optimal Operation of Combined Heating and Cooling and Power Systems", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL.24, NO. 1, page(s) 222:229, MARCH 2009.
9. Reza Hashemi, "A Developed Offline Model for Optimal Operation of Combined Heating and Cooling and Power Systems", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL.24, NO. 1, page(s) 222:229, MARCH 2009.
10. Sepehr Sanaye, Moslem Raessi Ardali, "Estimating the power and number of microturbines in small-scale combined heat and power systems" Applied Energy 86 (2009) 895–903.
11. L. Giacccone, A. Canova, "Economical Comparison of CHP systems for industrial user with large steam demand", Applied Energy, Volume 86, Issue 6, Pages 904-914, June 2009.
12. Zhi-Gao Sun, "Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine", Energy and Buildings 40, pages 126–130, 2008.
13. Taher S.A., Hasani M., Karimian A., "A novel method for optimal capacitor placement and sizing in distribution systems with nonlinear loads and DG using GA", Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, vol. 16, no. 2, pp. 851-862, 2011.