فصل‌نامه مطالعات اقتصاد انرژی/ سال چهاردهم / شماره ۵۹/ زمستان ۱۳۹۷/ صفحات ۱۴۴-۱۲۱

مقایسه تطبیقی انواع مدل‌های بهینه‌سازی توسعه شبکه‌های برق و گاز در استان خراسان

وحید خلیق[۱]

دانشجوی دکتری مهندسی، گروه برق قدرت، دانشگاه فردوسی مشهد،
Vahid.khaligh@mail.um.ac.ir
مجید علومی بایگی
عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد، m.oloomi@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۱۹

چکیده

امروزه برنامه‌ریزی توسعه همزمان شبکه‌های برق و گاز به‌عنوان روشی برای حداقل‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق انواع روش‌های توسعه شبکه‌های برق و گاز در یک مطالعه واقعی در استان خراسان مورد بررسی قرار گرفته است. براساس یافته‌های تحقیق که در دو روش توسعه یکپارچه و نیز توسعه به روش ADMM که در آن یک نهاد واسط، وظیفه هماهنگی دو شبکه برق و گاز را برعهده دارد نتایج یکسانی را برای توسعه شبکه‌های برق و گاز به‌دست می‌دهند، با این تفاوت که در حالت توسعه به روش ADMM هر شرکت مسئول توسعه و بهره‌برداری شبکه متبوع خود خواهد بود. همچنین در حالت توسعه مستقل، ناهماهنگی بین شبکه‌های برق و گاز به هزینه زیاد توسعه برای کل شبکه منجر می‌شود. نتایج تحقیق در حالت رهبر پیرو نیز نشان دهنده آن است که با پیرو بودن شبکه گاز، هزینه توسعه بیشتری نسبت به حالت توسعه یکپارچه به شبکه گاز تحمیل می‌شود. برنامه پاسخگویی بار نیز می‌تواند هزینه توسعه در هر دو شبکه گاز و برق را کاهش دهد. در نهایت با مشارکت و ضریب نفوذ مناسب برنامه پاسخگویی بار، پروفیل بار روزانه می‌تواند مسطح شود.

طبقه‌بندی JEL: C61, L94, L94

کلید واژه‌ها: شبکه گاز، برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق، استان خراسان

---

۱. نویسنده مسئول

۱- مقدمه

صنعت برق و شاخص‌های مرتبط با آن به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین صنایع همواره مطرح بوده است. حفظ پایداری سیستم‌های انتقال برق و جلوگیری از نوسانات بیش از حد فرکانس از جمله مواردی است که متخصصان همواره آن را مدنظر داشته‌اند. ناپایداری فرکانس علاوه بر تحمیل خسارات نسبتا سنگین به تجهیزات سیستم، ممکن است سبب تکه تکه شدن شبکه انتقال برق (جزیره‌ای شدن شبکه) و در برخی موارد نیز باعث بروز خاموشی‌های سراسری گردیده و طبعا زیان‌های اقتصادی را به دنبال داشته باشد. از این رو به هر طریق ممکن باید سعی شود تا از بروز این مسأله جلوگیری گردد. (EIA,۲۰۱۸)

با توجه به آن‌چه گفته شد، برنامه‌ریزی توسعه همزمان شبکه‌های برق و گاز به‌عنوان روشی برای حداقل‌سازی هزینه مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی‌ها، نظریه یک سرمایه‌گذار مرکزی مطرح است که به دنبال حداقل کردن کل هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه برق و گاز می‌باشد (شاوو و همکاران[1]، ۲۰۱۷). در کشورهای مختلف بهره‌برداران شبکه‌های برق و گاز از یکدیگر مستقل هستند و توسط یک نهاد مرکزی به‌نام وزارت انرژی، کنترل می‌شوند. بنابراین، برای توسعه نیاز به ارائه مدلی است که ضمن برآوردن معیارهای فنی از قبیل کفایت سوخت، تأمین نیاز مشترکین و قابلیت اطمینان شبکه، هماهنگی لازم را بین توسعه شبکه برق و گاز ایجاد نماید، به‌گونه‌ای که ریسک سرمایه‌گذاری برای هر یک از سرمایه‌گذاران حداقل شده و از سرمایه‌گذاری بیش از نیاز نیز خودداری شود.

در این تحقیق سعی شده با مقایسه تطبیقی مدل‌های بهینه‌سازی متمرکز و غیرمتمرکز، امکان مشارکت هماهنگ شبکه‌های برق و گاز را فراهم نمود. در این مدل‌ها ضمن برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز، دست‌یابی به هزینه کمتر مدنظر قرار گرفته است. همچنین در برخی روش‌ها به منظور حفظ استقلال دو شبکه و نیز کاهش تبادل اطلاعات بین آن‌ها و وزارت انرژی، مشارکت شبکه‌های برق و گاز طی یک فرآیند تکراری و به‌صورت موازی انجام می‌شود. در برخی روش‌ها نیز شبکه‌های برق و گاز با

1. Shao et al

هدف کاهش هزینه کل توسعه شبکه‌های برق و گاز به‌صورت هماهنگ درنظر گرفته شده است و در نهایت بهترین روش انتخاب خواهد شد.

چارچوب ساماندهی تحقیق بدین صورت است که به منظور مدل‌سازی توسعه شبکه‌های برق و گاز، در ابتدا با مرور مطالعات گذشته، در بخش بعدی تابع هدف توسعه یکپارچه شبکه‌های برق و گاز ارائه و سپس مدل‌های پیشنهادی با روش‌های مختلف شرح داده شده و در انتها به مقایسه تطبیقی نتایج روش‌های مربوط به بهره‌برداری بهینه از هر دو شبکه برق و گاز پرداخته شده است.

۲- پیشینه تحقیق

برخی از مقالات به بررسی برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز پرداخته‌اند. رویکرد رهبر- پیرو توسط خلیق و همکاران[1] (۲۰۱۸) معرفی شده که در آن شبکه برق به‌عنوان رهبر و شبکه گاز در نقش پیرو دنبال‌کننده تصمیمات آن می‌باشد. مدل ارائه شده توسط ژوو و همکاران[2] (۲۰۱۷)، گسترش خطوط و اجزای توزیع شبکه برق را در هاب انرژی فرموله می‌کند. به این ترتیب، مدل پیشنهادی، بازآرایی بهینه را در سیستم‌های توزیع برق و گاز طبیعی فراهم می‌کند. نویسندگانی همچون اونسیهای ویلا[3] (۲۰۱۷) مدلی چند منطقه‌ای و چند مرحله‌ای را معرفی می‌کنند که تصمیم‌گیرنده مرکزی، برنامه‌ریزی توسعه زیرساخت‌های شبکه‌های گاز و برق را تحت یک مدل واحد ادغام می‌نماید. مدل متمرکز که برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های توزیع گاز و برق را بهینه می‌کند توسط سالدریگا و همکاران[4] (۲۰۱۰) ارائه شده است. این مدل زمانی مناسب است که هر دو شبکه گاز و برق یک بهره‌بردار مرکزی دارند. مدل متمرکز پیشنهاد شده در مقاله چادری و همکاران[5] (۲۰۱۴) هزینه‌های عملیاتی و گسترش شبکه‌های گاز و برق را کاهش می‌دهد. در این مدل توسعه شبکه برق با افزایش ظرفیت خطوط انتقال انجام می‌شود. علاوه بر این، مکان‌یابی واحدهای تولید انرژی از پیش

1. Khaligh et al
2. Zhou et al
3. Unsihuay-Vila et al
4. Saldarriaga et al
5. Chaudry et al

برنامه‌ریزی شده را نیز انجام می‌دهد. در مقاله کیو و همکاران[1] (۲۰۱۵)، برنامه‌ریزی توسعه‌ای به‌منظور حداکثرسازی رفاه اجتماعی در شیکه‌های گاز و برق انجام می‌شود. در این مدل، هزینه انطباق با شرایط جدید برای مقابله با عدم اطمینان‌های موجود در برنامه‌ریزی توسعه (همانند قیمت گاز و برق) مورد استفاده قرار گرفته است. مدل ارائه شده توسط براتی و همکاران[2] (۲۰۱۵) چارچوبی یکپارچه برای حل مشکل برنامه‌های توسعه شبکه‌های گاز و برق فراهم می‌کند. روش پیشنهادی شامل یک روش سه مرحله‌ای برای حل مسئله توسعه شبکه انتقال، تولید و گاز با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. همچنین نویسنده یک مدل توسعه با قید کاهش انتشار دی اکسید کربن معرفی کرده است که در آن به حداکثررساندن سود بر اساس قیمت‌های بازار گاز و برق به‌صورت چندین سناریو دنبال می‌شود. مسئله هماهنگی برنامه‌ریزی توسعه که در مقاله شاوو و همکاران (۲۰۱۷) ارائه شده است، یک سیستم یکپارچه با ظرفیت مطلوب، مکان مناسب و زمان نصب زیرساخت‌های جدید شبکه‌های گاز و برق را فراهم می‌کند. در این مدل مسئله توسعه هماهنگ شبکه‌های برق و گاز به یک مسئله اصلی سرمایه گذاری متمرکز و دو زیرمسئله بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های برق و گاز تجزیه می‌شود. روش خطی که در مقاله کیو و همکاران[3] (۲۰۱۶) ارائه شده، منجر به حداقل سرمایه گذاری و هزینه بهره‌برداری در زمینه توسعه شبکه‌های گاز و برق شده است. در این مدل تعاملات بازار گاز و برق در یک فرایند تکراری شبیه سازی شده و اطلاعات بازار برای هدایت مسئله برنامه‌ریزی توسعه قابل استفاده می‌باشد. نویسندگان مقاله ژانگ[4] (۲۰۱۵) یک مدل مقاوم[5] ارائه می‌دهند که در مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های گاز و برق قید تاب‌آوری[6] شبکه لحاظ شده است. مدل برنامه‌ریزی توسعه ارائه شده توسط ژائو و همکاران [7] (۲۰۱۷) از یک چارچوب بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای برای بیان عدم قطعیت در رشد تقاضا استفاده می‌کند. مدلی مشابه در مقاله دینگ و همکاران[8]

1. Qiu et al
2. Barati et al
3. Qiu et al
4. Zhang et al
5. Robust
6. Resilence
7. Zhao et al
8. Ding el al

(۲۰۱۸) ارائه شده که عدم قطعیت در رشد بار را از طریق یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای بررسی می‌کند. در این روش در مرحله اول برنامه‌ریزی توسعه مدل‌سازی شده و در مرحله دوم مسئله بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های برق و گاز در نظر گرفته شده است. یک مدل برنامه‌ریزی برای توسعه خطوط توزیع گاز، واحدهای تولید انرژی الکتریکی و بانک‌های خازنی توسط اودتایو و همکاران[1] (۲۰۱۷) ارائه شده است که با استفاده از یک روش برنامه‌ریزی مرحله‌ای حل می‌شود. برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های گاز و برق در حالتی که تبدیل انرژی دوطرفه بین شبکه‌های برق و گاز وجود دارد در مقاله زنگ[2] (۲۰۱۷) به‌عنوان یک مسئله دو سطحی مطرح شده است، که در آن سطح بالایی برنامه توسعه را بهینه می‌کند و سطح پایین تر بهره‌برداری از شبکه‌های برق و گاز را بهینه می‌کند. یک مدل برنامه‌ریزی برای توسعه شبکه‌های گاز و برق با توجه به معیار امنیت N-1 و قابلیت اطمینان احتمالی توسط هی و همکاران[3] (۲۰۱۷) ارائه شده است. یک مدل ایستا و نامعین برای حداقل‌سازی هزینه توسعه شبکه‌های یکپارچه برق و گاز در کار تحقیقی نونس و همکاران[4] (۲۰۱۸) ارائه شده که نایقینی در انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد بار و قیمت گاز را در مدل برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های گاز و برق در نظر می‌گیرد.

۳- بررسی تابع هدف توسعه شبکه‌های برق و گاز

با وجود استفاده از روش‌های مختلف، تاکنون تحقیقی در خصوص مدل‌سازی همزمان توسعه شبکه‌های برق و گاز با در نظرگرفتن بارهای پاسخگو انجام نشده و این موضوع به‌عنوان نوآوری تحقیق مدنظر می‌باشد، زیرا سرمایه‌گذار به دنبال حداقل کردن هزینه به منظور توسعه سیستم می‌باشد که با مقایسه انواع روش‌های مدل‌سازی می‌توان بدان دست یافت. به این منظور در ابتدا قیود مربوط به بهره‌برداری شبکه‌های گاز و برق بیان شده و سپس روش‌های مختلف برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز مدل‌سازی شده است.

1. Odetayo et al
2. Zeng et al
3. He et al
4. Nunes et al

قیود بهره‌برداری شبکه‌های گاز و برق

قیود بهره‌برداری شبکه گاز را می‌توان بر اساس روابط ویموث به‌صورت زیر مدل نمود (ژانگ و همکاران[1]، ۲۰۱۵).

$$C_{yd}^{Gas} = \sum_{i} S_{iyd}^{Gas} \lambda_{i}^{Gas} + \sum_{i} r_{iyd}^{Gas} \lambda^{Gas_r} \quad (۱)$$

$$\underline{f_{ij}^{Gas}} \le f_{ijyd}^{Gas} \le \overline{f_{ij}^{Gas}} \qquad \forall ij \in \mathcal{PL}^{passive} \quad (۲)$$

$$sign(f_{ijyd}^{Gas}) f_{ijyd}^{Gas^2} = K_{ij}^{pipe^2} \left(pr_{iyd}^{g\ 2} - pr_{jyd}^{g\ 2} \right) \qquad \forall ij \in \mathcal{PL}^{passive} \quad (۳)$$

$$sign(f_{ijyd}^{Gas}) f_{ijyd}^{Gas^2} \ge K_{ij}^{pipe^2} \left(pr_{iyd}^{g\ 2} - pr_{jyd}^{g\ 2} \right) \qquad \forall ij \in \mathcal{PL}^{Active} \quad (۴)$$

$$0 \le f_{ijyd}^{Gas} \le \overline{f_{ij}^{Gas}} \qquad \forall ij \in \mathcal{PL}^{Active} \quad (۵)$$

$$\underline{S_{i}^{Gas}} \le S_{iyd}^{Gas} \le \overline{S_{i}^{Gas}} \qquad \forall i \in N^{Gas} \quad (۶)$$

$$\underline{pr_{i}^{g}} \le pr_{iyd}^{g} \le \overline{pr_{i}^{g}} \qquad \forall i \in N^{Gas} \quad (۷)$$

$$0 \le r_{iyd}^{Gas} \le s_{iyd}^{l} \qquad \forall i \in N^{Gas} \quad (۸)$$

$$S_{iyd}^{Gas} = \sum_{j} bin_{ij}^{Pipe} f_{ijyd}^{Gas} + \left(X_{iyd}^{Gas} + s_{iyd}^{l} \right) + r_{iyd}^{Gas} + s_{iyd}^{comp} \qquad \forall i \in N^{Gas} \quad (۹)$$

$$s_{iyd}^{comp} = \int_{ij}^{comp} f_{ijyd}^{Gas} (pr_{jyd}^{g} - pr_{iyd}^{g}) \qquad \forall ij \in \mathcal{PL}^{A} \quad (۱۰)$$

$$pr_{jyd}^{g} \le R_{ij}^{comp} pr_{iyd}^{g} \qquad \forall ij \in \mathcal{PL}^{A} \quad (۱۱)$$

در این روابط قید (۱) هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه گاز شامل هزینه خریداری گاز و نیز هزینه ناشی از عدم تأمین بار مشترکین را مشخص می‌کند. قید (۲) محدودیت فلو در خطوط مختلف است. قیود (۳) و (۴) به ترتیب مربوط به رابطه بین فلو و فشار در خطوط فاقد کمپرسور (پسیو) و خطوط دارای کمپرسور (اکتیو) است (منون[2]، ۲۰۰۵). قید (۵) الزام به یک طرفه بودن فلو در خطوط اکتیو ایجاد می‌کند. قید (۶) محدوده تولید را در گره‌های مختلف مشخص می‌کند. قید (۷) محدودیت فشار در گره‌های مختلف است. قید (۸) محدوده بار از دست رفته را مشخص می‌کند. قید (۹) تعادل ورود

1. Zhang et al
2. Menon

و خروج گاز در گره‌های مختلف شبکه گاز را مشخص می‌کند. قید (۱۰) رابطه مربوط به مصرف گاز کمپرسور است (اوجدا استایبار[1]، ۲۰۱۴) و قید (۱۱) نسبت فشار را در دو طرف کمپرسور نشان می‌دهد.

در مدل‌سازی بهره‌برداری اقتصادی از شبکه برق از قیود مربوط به پخش بار DC برای تأمین کفایت بار و ارزیابی قابلیت اجرای طرح‌های مختلف توسعه استفاده شده است.

$$C_{yd}^{Elec} = \sum_{t} OC_{yd} + \sum_{mt} r_{mydt}^{Elec}\lambda^{Elec_r} + \sum_{tm} \lambda_{mydt}^{DR} P_{DR_{mydt}}^{-} \qquad (۱۲)$$

$$OC_{yd} = \sum_{mg} \lambda_{m}^{X} X_{mgyd}^{Elec} bin_{mg}^{Gen} \qquad \forall m \in N^{Elec}, g \in GU \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{g} bin_{mg}^{Gen} p_{mgydt}^{Gen} = \sum_{n} bin_{mn}^{Trans} PF_{mnydt} + r_{mydt}^{Elec} + p_{mydt}^{E_load} \qquad \forall m \in N^{Elec} \qquad (۱۴)$$

$$PF_{mnydt} = p_{b} \times \sum_{n} y_{mn}\left(\theta_{mydt} - \theta_{nydt}\right) \qquad \forall\, m \in N^{Elec} \qquad (۱۵)$$

$$\theta_{ref} = 0 \qquad (۱۶)$$

$$\underline{p_{mg}^{Gen}} \le p_{mgydt}^{Gen} \le \overline{p_{mg}^{Gen}} \qquad \forall m \in N^{Elec}, g \in GU \qquad (۱۷)$$

$$-\overline{PF_{mn}} \le PF_{mnyd} \le \overline{PF_{mn}} \qquad \forall m \in N^{Elec}, mn \in TL \qquad (۱۸)$$

$$0 \le r_{mydt}^{Elec} \le p_{mydt}^{load} \qquad (۱۹)$$

$$X_{mgyd}^{Elec} = \sum_{t} T_{t} \frac{(\alpha_{mg} + \beta_{mg} p_{mgydt}^{Gen} + \gamma_{mg} {p_{mgydt}^{Gen}}^{2})}{GHV_{g}} \qquad \forall\, m \in N^{Elec}, g \in GU \qquad (۲۰)$$

در قیود به کار رفته برای مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از شبکه برق، قید (۱۲) هزینه بهره‌برداری روزانه از شبکه برق شامل هزینه تأمین سوخت، جریمه ناشی از بارهای تأمین نشده و نیز هزینه پرداختی بابت بارهای پاسخگو را شامل می‌شود. قید (۱۳) به بیان هزینه تأمین سوخت نیروگاه‌های شبکه برق می‌پردازد. قید (۱۴) تعادل

1. Ojeda-Esteybar

تولید و مصرف را در باس‌های مختلف شبکه برق برقرار می‌سازد. قید (۱۵) توان جاری در خطوط مختلف شبکه برق را بر اساس پخش بار DC تعیین می‌کند. زاویه ولتاژ باس مرجع مطابق با پخش بار DC در قید (۱۶) برابر صفر قرار داده شده است. قید (۱۷) محدودیت تولید نیروگاه‌های مختلف را تعیین می‌کند. قید (۱۸) محدودیت عبور توان در خطوط انتقال مختلف شبکه برق را مشخص می‌کند. قید (۱۹) محدوده بار از دست رفته را در باس‌های مختلف بیان می‌کند و قید (۲۰) مصرف گاز نیروگاه‌های مختلف را مشخص می‌کند.

۴- بررسی روش‌های توسعه شبکه برق

در این تحقیق برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز به پنج روش، یکپارچه، ADMM، رهبر- پیرو، توسعه مستقل و نیز توسعه یکپارچه با در نظر گرفتن بارهای پاسخگو مدل‌سازی شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

روش توسعه یکپارچه[1]

هدف اصلی برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز، تأمین نیاز بار با حداقل کردن هزینه در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. هزینه توسعه شامل هزینه بهره‌برداری از شبکه‌های برق و گاز و نیز هزینه سرمایه‌گذاری برای توسعه زیرساخت‌های این دو شبکه است. به این ترتیب برای تأمین بارهای شبکه گاز در صورت نیاز، خطوط لوله به شبکه گاز اضافه می‌شوند. خطوط لوله به گونه‌ای در شبکه گاز مکان‌یابی می‌شوند که کفایت بار به‌صورت بهینه در طول دوره بهره‌برداری تأمین شود. از سوی دیگر هدف توسعه در شبکه برق بهره‌برداری اقتصادی و نیز تأمین کفایت بار از طریق اضافه کردن خطوط انتقال و واحدهای تولیدی جدید به شبکه است. به این ترتیب در برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق، مکان و سایز واحدهای تولیدی جدید و نیز مکان خطوط انتقال جدید تعیین می‌شود. تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز به‌صورت رابطه (۱) نوشته شده است:

1. Centralized

$$\text{Min } C^{ISO} = \sum_{mn}(bin_{mn}^{trans} cost_{mn}^{trans}) + \sum_{mh}\left(bin_{m,h}^{gen} P_{s_{m,h}}^{rated} cost_{mh}^{gen}\right) + \sum_{ij} bin_{ij}^{Pipe} L_{ij}^{Pipe} A_{ij}^{Pipe} cost_{ij}^{Pipe} + \sum_{y=1}^{T}(1+r)^{-(y-1)} \sum_{d}\left(C_{y,d}^{Gas} + C_{y,d}^{Elec}\right) \quad (۲۱)$$

s.t.

$$\sum_g X_{mgyd}^{Elec} = X_{mgyd}^{Gas} \quad (۲۲)^{۱}$$

که در رابطه (۲۱) عبارات اول تا سوم به ترتیب؛ هزینه توسعه خطوط انتقال شبکه برق، واحدهای تولیدی شبکه برق و خطوط لوله شبکه گاز است. عبارت چهارم مقدار ارزش فعلی هزینه بهره‌برداری است که شامل هزینه بهره‌برداری از شبکه‌های برق و گاز با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار در شبکه برق می‌شود.

در این مسئله قید (۲۲) قیدی است که دو شبکه گاز و برق را به یکدیگر مرتبط می‌کند و طی آن مصرف نیروگاهی شبکه برق، وارد محاسبات شبکه گاز می‌شود.

روش مستقیم جایگزین ضرب‌کننده‌ها[۲]

در این روش هر کدام از دو بهره بردار به‌صورت مستقل از یکدیگر در نظر گرفته شده و در نتیجه حریم شخصی آن‌ها حفظ می‌شود. در یک روند تکراری مقادیر متغیرهای مشترک اولیه به روز می‌شوند.

قید مشترکی که شبکه‌های برق و گاز را به یکدیگر مرتبط می‌کند، مصرف گاز نیروگاه‌های گاز سوز است که از رابطه (۲۰) در تابع بهینه‌سازی شبکه برق به‌دست می‌آید.

برای حل مسئله به هم پیوسته توسعه شبکه‌های برق و گاز، از روش ADMM استفاده می‌شود که دو بهینه‌سازی مربوط به شبکه‌های برق و گاز را از یکدیگر جدا

---

۱. منظور قیدهای ۱ تا ۲۰ می‌باشد.

2. ADMM

می‌کند. در این روش یک هماهنگ کننده مرکـزی بـا دریافـت اطلاعـات حـداقلی از دو شبکه برق و گاز و ارسال مجدد اطلاعات تصحیح شده به آن‌ها، اختلاف متغیر مشـترک را به حداقل می‌رساند.

مسئله بهینه‌سازی شبکه گاز در این روش به‌صورت زیر است.

(۲۳)[۱]

$$\left(\frac{P}{A},r,T\right)\left[\sum_{ij} bin_{ij}^{Pipe^{k+1}} L_{ij}^{Pipe} A_{ij}^{Pipe} cost_{ij}^{Pipe}\left(\frac{A}{P},r,T\right)\right]+$$
$$\sum_{y=1}^{T}\left(\frac{P}{F},r,y\right)\sum_{d} C_{yd}^{Gas^{k+1}}+\sum_{i}\mu_{im}^{k}\left(X_{iyd}^{Gas^{k+1}}-\sum_{g} X_{mgyd}^{Elec\ k}\right)+$$
$$\frac{\rho}{2}\sum\left\|X_{iyd}^{Gas^{k+1}}-\sum_{g} X_{mgyd}^{Elec\ k}\right\|_{2}^{2}$$
s.t.

مسئله بهینه‌سازی شبکه برق به‌صورت زیر است.

$$\left(\frac{P}{A},r,T\right)\left[\sum_{mn}\left(bin_{mn}^{trans^{k+1}} cost_{mn}^{trans}\right)\left(\frac{A}{P},r,T\right)+\right.$$
$$\left.\sum_{mh}\left(bin_{mg}^{gen^{k+1}} P_{s_{mg}}^{rated} cost_{mg}^{gen}\right)\left(\frac{A}{P},r,T\right)\right]+\sum_{y=1}^{T}\left(\frac{P}{F},r,y\right)\sum_{d} C_{yd}^{Elec^{k+1}}+$$
$$\sum_{m}\mu_{im}^{k}\left(X_{iyd}^{Gas^{k}}-\sum_{g} X_{mgyd}^{Elec\ k+1}\right)+\frac{\rho}{2}\sum\left\|X_{iyd}^{Gas^{k}}-\sum_{g} X_{mgyd}^{Elec\ k+1}\right\|_{2}^{2}$$
s.t. (۲۴)[۲]

برای جداسازی این دو مسئله از یک متغیر مشترک استفاده می‌شود. این متغیر گـاز مصرفی در دوشبکه گاز و برق است.

ضریب دوگان μ_{im} توسط هماهنگ کننده مرکزی با اسـتفاده از روش زیـر گرادیـان [۳۰] و با استفاده از رابطه (۲۵) به روز می‌شود.

$$\mu_{im}^{k+1}=\mu_{im}^{k}+\rho(X_{iyd}^{Gas^{k}}-\sum_{g} X_{mgyd}^{Elec\ k}) \quad (۲۵)$$

در زیرمسئله شبکه گاز X_{iyd}^{Gas} متغیر و X_{mgyd}^{Elec} و μ_{im} به‌عنوان ثابـت در نظـر گرفتـه شده‌اند. مقدار X_{mgyd}^{Elec} با استفاده از آخرین تکرار در شبکه برق به‌دست می‌آید. همچنین مقدار متغیر دوگان در آخرین تکرار هماهنگ کننده مرکزی به‌دسـت مـی‌آیـد. از سـوی دیگر در زیرمسئله شبکه برق، X_{mgyd}^{Elec} متغیر و X_{iyd}^{Gas} و μ_{im} ثابت در نظر گرفتـه شـده و

۱. منظور قیدهای ۱ تا ۱۱ می‌باشد.

۲. منظور قیدهای ۱۲ تا ۲۰ می‌باشد.

از آخرین تکرار زیرمسئله شبکه گاز و هماهنگ‌کننده مرکزی به‌دست می‌آیند. فرآیند تکراری به کار گرفته شده در مدل ADMM اختلاف بین X_{mgyd}^{Elec} و X_{iyd}^{Gas} را به حداقل می‌رساند.

برای توقف فرآیند تکراری و وصول همگرایی بین زیر مسئله‌های شبکه برق و شبکه گاز شرط زیر توسط هماهنگ کننده مرکزی استفاده شده که در آن اختلاف بین متغیر مشترک شبکه گاز و برق از حد مشخصی کمتر باشد.

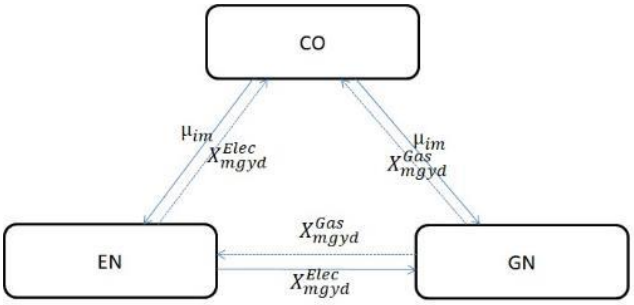
$$\left\| X_{mgyd}^{Elec\ k+1} - X_{iyd}^{Gas\ k+1} \right\|_2^2 \leq \varepsilon \qquad (۲۶)$$

در این روابط $\boldsymbol{\rho}$ ضریب جریمه است که امکان‌پذیری حل مسئله اولیه را مشخص می‌کند و مقدار آن از طریق سعی و خطا به‌دست می‌آید.

همچنین مقادیر اولیه صفر در نظر گرفته شده و در تکرارهای بعدی به روز می‌شوند.

الگوریتم روش پیشنهادی:

۱. مقداردهی اولیه متغیرها X_{mgyd}^{Elec}، X_{iyd}^{Gas} و μ_{im}
۲. انجام مراحل زیر برای $k = 0,1,2, \ldots$
۳. اجرای بهینه‌سازی محلی شبکه‌های برق و گاز
۴. به روز رسانی مقادیر متغیرهای اولیه توسط کنترل کننده مرکزی
۵. به روز رسانی مقادیر متغیرهای دوگان
۶. بررسی شرط پایان



۴-۳ روش رهبر- پیرو (Leader-Follower)

در این حالت، برنامه‌ریزی مشترک توسعه شبکه گاز و برق با استفاده از رویکرد پیرو رهبر صورت گرفته و نتایج با روش‌های دیگر مقایسه شده است. اپراتور شبکه برق به‌عنوان رهبر، تصمیم‌گیری در مورد برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق را بدون توجه به محدودیت تأمین سوخت انجام می‌دهد. سپس، اپراتور شبکه برق اطلاعات مربوط به مصرف گاز را به اپراتور شبکه گاز ارسال می‌کند. اپراتور شبکه گاز شبکه خود را به‌گونه‌ای گسترش می‌دهد که گاز مورد نیاز برای نیروگاه‌ها را تأمین نماید. در این روش مسئله بهینه‌سازی شبکه برق به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Min } C^{\text{Elec}} = & \sum_{mn} (bin_{mn}^{trans} cost_{mn}^{trans}) \\ & + \sum_{mh} \left(bin_{m,h}^{gen} P_{s_{m,h}}^{rated} cost_{mh}^{gen} \right) \\ & + \sum_{y=1}^{T} \left(\frac{P}{F}, r, y \right) \sum_{d} C_{y,d}^{Elec} \end{aligned} \qquad (۲۷)$$

s.t. (۲۰-۱۲)[۱]

مسئله بهینه‌سازی شبکه گاز با در نظر گرفتن سوخت مورد نیاز شبکه برق به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} Min\ C^{\text{Gas}} = & \sum_{ij} bin_{ij}^{Pipe} L_{ij}^{Pipe} A_{ij}^{Pipe} cost_{ij}^{Pipe} \\ & + \sum_{y=1}^{T} \left(\frac{P}{F}, r, y \right) \sum_{d} C_{y,d}^{Gas} \end{aligned} \qquad (۲۸)$$

s.t. (۱۷) ،(۱۱-۱)[۲]

با وجود اینکه قید (۱۷) در هر دو مدل بهینه‌سازی توسعه یکپارچه و نیز توسعه به روش رهبر پیرو یکسان است، اما در این حالت این قید تنها در مسئله بهینه‌سازی شبکه گاز به کار گرفته می‌شود، لذا بر خلاف مدل توسعه یکپارچه، هزینه برنامه‌ریزی توسعه

---

۱. منظور قیدهای ۱۲ تا ۲۰ می‌باشد.

۲. منظور قیدهای ۱ تا ۱۱ و نیز قد ۱۷ می‌باشد.

کل سیستم حداقل نمی‌شود، بلکه گاز درخواستی شبکه برق به‌صورت الزامی توسط شبکه گاز تأمین می‌شود.

روش توسعه مستقل[1]

در این حالت، شبکه برق مسئول برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق است و شبکه گاز مسئول برنامه‌ریزی توسعه شبکه گاز است. هیچ گونه تبادل اطلاعات بین این دو شبکه وجود ندارد و هر یک به‌طور جداگانه شبکه خود را گسترش می‌دهند. گسترش شبکه برق بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های شبکه گاز انجام می‌شود. از سوی دیگر، شبکه گاز گسترش می‌یابد در حالی‌که تنها رشد سالانه‌ای را برای بار نیروگاهی و غیرنیروگاهی در نظر می‌گیرد. در این روش مسئله بهینه‌سازی شبکه برق به‌صورت رابطه (۲۷) و مسئله شبکه گاز به‌صورت رابطه (۲۸) نوشته می‌شود، با این تفاوت که در این روش قیدی برای انتقال اطلاعات شبکه برق به شبکه گاز (قید (۱۷)) وجود ندارد.

روش بارهای پاسخگو

در این مدل اثر برنامه پاسخگویی بار شبکه برق در برنامه‌ریزی توسعه یکپارچه شبکه‌های برق و گاز بررسی شده است. به این ترتیب هزینه برنامه پاسخگویی بار با هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری شبکه برق ادغام می‌گردد تا طرحی برای توسعه شبکه‌های برق و گاز انتخاب شود که از انعطاف‌پذیری مناسبی شرایط مختلف برخوردار است. در برنامه پاسخگویی بار پیشنهادی، پیک‌سایی پروفیل بار و انتقال بار از ساعات گران قیمت و اوج مصرف به سایر ساعات شبانه‌روز مدل‌سازی شده است. به این ترتیب اثر مسطح‌سازی پروفیل بار در برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز مدل‌سازی شده و دید جامعی در خصوص استفاده و یا عدم استفاده از برنامه پاسخگویی بار و تأثیر آن بر هر دوی شبکه‌های برق و گاز مورد مطالعه قرار گرفته است. به این ترتیب در این روش فرض شده است که مقدار مشوق ارائه شده در قبال مشارکت در برنامه پاسخگویی بار، بیشتر از هزینه مصرف انرژی الکتریکی است و بر این اساس بارهای پاسخگو به‌صورت

1. Independent

بارهای قابل انتقال در طول دوره زمانی روزانه مدل می‌شوند. (لـی و همکـاران[1]، ۲۰۰۵). در روش ارائه شده مشترکین در هر دوره زمانی می‌توانند بار خود را با توجـه بـه قیمـت انرژی افزایش یا کاهش دهند، با این قید که مجموع تغییرات بار در طول روز صفر باشد. مدل در نظر گرفته شده برای بارهای پاسخگو با اسـتفاده از روابـط (۲۹) تـا (۳۳) ارائـه شده است. در این مدل توسعه به روش یکپارچه علاوه بر قیود بهره‌بـرداری شـبکه‌هـای برق و گاز، مقید به قیود (۲۹) تا (۳۳) می‌شود.

$$P_{mydt}^{E_load} = P_{mydt}^{load} - P_{DR_{mydt}}^{-} + P_{DR_{mydt}}^{+} \qquad \forall t\in\mathcal{T}, m\in\mathcal{B} \qquad (۲۹)$$

$$\sum_{t}(P_{DR_{mydt}}^{+} - P_{DR_{mydt}}^{-}) = 0 \qquad \forall m\in\mathcal{B} \qquad (۳۰)$$

$$0 \le P_{DR_{mydt}}^{-} \le u_{DR_{mydt}}^{-}\overline{P_{DR_{mydt}}^{-}} \qquad \forall t\in\mathcal{T}, m\in\mathcal{B} \qquad (۳۱)$$

$$0 \le P_{DR_{mydt}}^{+} \le u_{DR_{mydt}}^{+}\overline{P_{DR_{mydt}}^{+}} \qquad \forall t\in\mathcal{T}, m\in\mathcal{B} \qquad (۳۲)$$

$$u_{DR_{mydt}}^{+} + u_{DR_{mydt}}^{-} \le 1 \qquad \forall t\in\mathcal{T}, m\in\mathcal{B} \qquad (۳۳)$$

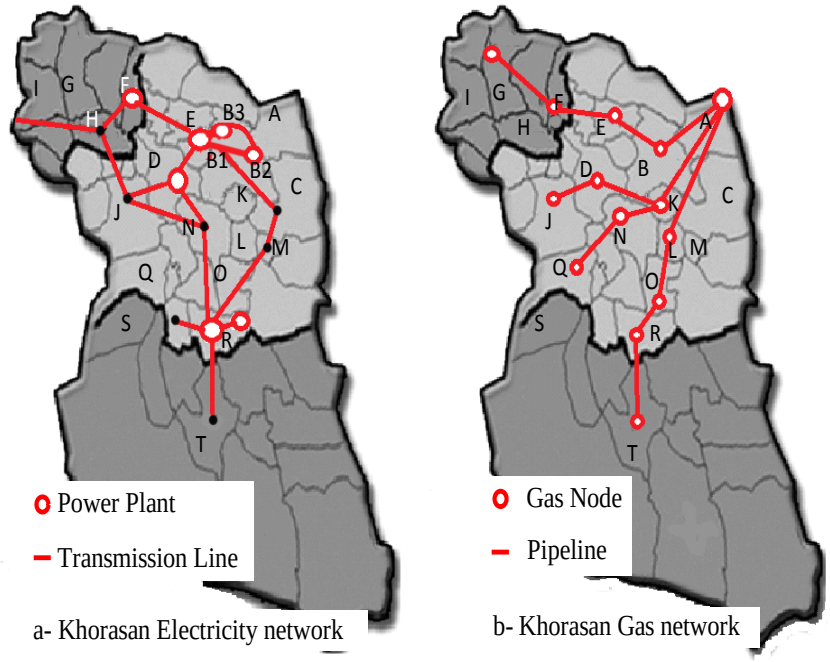
در این مدل، بار مورد انتظار پس از اعمال برنامه پاسخگویی بار بـا اسـتفاده از رابطـه (۲۹) بیان شده است. انتقال بار مشترکین به ساعات دیگر در طول دوره زمانی روزانه بـا استفاده از رابطه (۳۰) تضمین شده است. محدودیت اعمال شده بـر قابلیـت اسـتفاده از بارهای پاسخگو بر اساس روابط (۳۱) و (۳۲) بیان شده است. قید استفاده شده در (۳۳) بیانگر این است که در هر ساعت تنها یکی از قابلیت‌های کاهش بار و یا افزایش بار قابـل اعمال است.

۵- مقایسه نتایج شبیه‌سازی

سیستم آزمون مورد استفاده برای تحلیل با استفاده از روش پیشنهادی، شـبکه‌هـای گاز و برق استان خراسان است. شبکه برق ۴۰۰ کیلو وات شـامل ۱۸ خـط انتقـال و ۱۵ باس است که در آن ۳۳ واحد گاز مصرفی در ۷ باس قرار گرفته‌انـد. در شـبکه گـاز، ۱۴ گره وجود دارد که از طریق ۱۳ خط لوله به یکدیگر متصل می‌شوند. داده‌های شبکه‌های برق و گاز خراسان به ترتیب در مقالات سیدی و همکاران[2](۲۰۰۹) و براتی و همکـاران[1]

1. Ojeda-Esteybar & et al
2. Seyedi & et al

(۲۰۱۵) ارائه شده است. در این پژوهش فرض شده که طرح پیشنهادی توسعه باید قابلیت تأمین سیستم در یک دوره برنامه‌ریزی ۱۵ ساله با در نظر گرفتن رشد بار سالانه ۳ درصد را داشته باشد. سطح تقاضای فعلی در شبکه برق ۳۱۲۹ مگاوات است و حداکثر تولید ۳۸۸۰ مگاوات در دسترس است. در شبکه گاز میزان مصرف ۳۹.۱۳۳ میلیون متر مکعب استاندارد در روز[۲] شامل مصرف گاز غیر از نیروگاه‌های گازسوز مانند بخش مسکونی وجود دارد. خطوط لوله موجود، خطوط انتقال و واحدهای تولیدی و نامزدهای آن‌ها برای برنامه‌ریزی توسعه، در شکل ۱ نشان داده شده است. نامزدهای توسعه شبکه‌های گاز و برق و هزینه‌های سرمایه گذاری آن‌ها در جدول ۱ آمده است.



شکل ۱. شبکه‌های گاز و برق خراسان

1. Barati & et al
2. MSCMD

این مسئله که یک مسئله غیر خطی همراه با اعداد صحیح[1] است، توسط نرم افزار GAMS حل شده است.

جدول ۱. کاندیدهای توسعه و هزینه‌های آن‌ها

Pipe.	Cost (k$/inch-km)	Trans.	Cost (k$/km)	Gen.	Cost (k$/MW)
A-B	۴۰	S-Q	۲۴۰	C	۹۰۰
A-L	۴۰	K-C	۲۴۰	S	۹۰۰
A-K	۶۰	B-C	۳۶۰	Q	۹۰۰
F-D	۶۰	K-D	۴۸۰	L	۹۰۰
G-J	۶۰	R-Q	۴۸۰	F	۹۰۰
		R-T	۴۸۰	I	۹۰۰
		R-S	۴۸۰	T	۱۱۷۰
				B	۱۴۴۰
				R	۱۰۸۰

توسعه متمرکز شبکه‌های برق و گاز به روش توسعه یکپارچه و ADMM

نتایج روش ADMM حاکی از آن است که هر دو روش ADMM و توسعه یکپارچه نتایج یکسانی تولید می‌کنند، با این تفاوت که در روش ADMM شرکت‌های برق و گاز به‌صورت مستقل از یکدیگر بهره‌برداری شده و در یک بازی همکارانه با یکدیگر به تعادل می‌رسند.

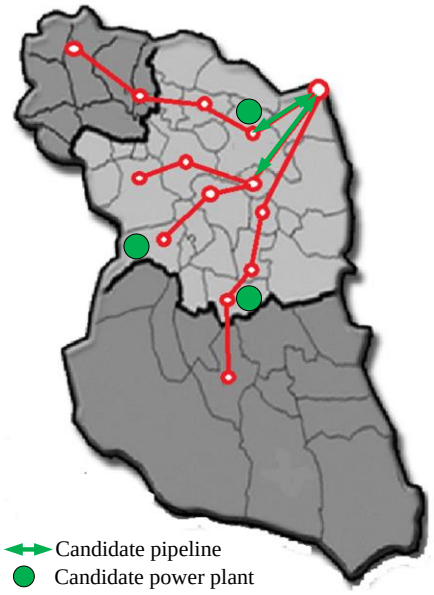
نتایج به‌دست آمده از مسئله سرمایه‌گذاری شبکه گاز نشان می‌دهد که نیاز به افزایش ظرفیت خط لوله بین مناطق A و B مطابق شکل ۱ وجود دارد. در این مورد، هزینه سرمایه گذاری شبکه گاز ۱۹ میلیون دلار است در حالیکه کل هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه گاز ۳۷.۱۹ میلیارد دلار است. از سوی دیگر، در شبکه برق، نیاز به نصب نیروگاه‌های جدید در مناطق F، R و B2 است. همچنین این نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت خط انتقال F-H باید افزایش یابد.

1. Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)

در این مدل هزینه سرمایه گذاری و بهره برداری از شبکه برق ۷.۷۶ میلیارد دلار است که در آن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری به ترتیب ۰.۳۷ و ۷.۳۹ میلیارد دلار می‌باشد. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که اگر ارزش بار از دست رفته بیش از ۱۱۵$ / MWh و ۱۲۰۰ $ / MSCMD به ترتیب در شبکه‌های برق و گاز باشد، سرمایه‌گذاری برای توسعه گزینه ارزانتری نسبت به قطع اجباری بار است.

روش رهبر - پیرو

نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که در این روش مقدار ارزش فعلی کل هزینه بهره‌برداری و سرمایه گذاری شبکه گاز ۳۷.۳۸ میلیارد دلار است که بیشتر از روش ADMM و روش توسعه متمرکز شده است. دلیل این موضوع این است که در این حالت گسترش شبکه برق با نادیده گرفتن محدودیت‌های شبکه گاز منجر به نصب نیروگاه جدید در Q می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده Q توسط خط لوله A-K تأمین می‌شود. بنابراین، برای تأمین تقاضای جدید گاز در Q، اپراتور شبکه گاز باید ظرفیت خط لوله A-K را افزایش دهد که به‌دلیل هزینه‌های بالای نصب آن هزینه زیادی را به شبکه گاز تحمیل می‌کند. در نتیجه در روش رهبر - پیرو شبکه گاز هزینه سرمایه گذاری بیشتری نسبت به روش ADMM دارد. نتایج دقیق برنامه‌ریزی توسعه با استفاده از رویکرد پیرو رهبر در جدول ۲ برای شبکه‌های گاز و برق داده شده است.



شکل ۲. نتایج روش رهبر پیرو برای توسعه شبکه‌های برق و گاز

توسعه مستقل

برنامه‌ریزی توسعه شبکه گاز در حالت مستقل نشان می‌دهد که نیازی به نصب یک خط لوله جدید نیست و زیرساخت‌های موجود در طول افق برنامه‌ریزی برای تأمین سیستم کافی است. نتایج برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق در حالت مستقل کاملا مشابه با رویکرد رهبر- پیرو است، زیرا در هر دو روش هیچ محدودیتی در مصرف گاز برای نیروگاه‌ها وجود ندارد. برای مقایسه بهتر با روش ADMM، نتایج دقیق رویکرد برنامه‌ریزی توسعه مستقل نیز در جدول ۲ برای شبکه‌های گاز و برق ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برنامه‌ریزی مستقل توسعه شبکه‌های گاز و برق منجر به برنامه‌های توسعه غیرهماهنگ و افزایش میزان بار تأمین نشده در شبکه‌های گاز و برق می‌شود که در نتیجه موجب افزایش هزینه‌های کلی در شبکه‌های گاز و برق می‌شود.

بارهای پاسخگو

تأثیر برنامه پاسخگویی بار شبکه برق بر عملکرد سیستم یکپارچه گاز و برق در جدول ۳ بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با استفاده از این روش، هزینه توسعه شبکه گاز نسبت به حالت بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار تغییری نکرده است. زیرا در این حالت جابجایی بار بین ساعات شبانه‌روز مجموع سوخت مصرفی روزانه را تغییری نمی‌دهد. همچنین نتایج نشان میدهد که کل هزینه‌های سرمایه گذاری و بهره‌برداری در روش یکپارچه با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار برابر ۴۳.۶۷ میلیارد دلار است که کمتر از نتایج روش یکپارچه بدون اجرای برنامه پاسخگویی بار می‌باشد. دلیل این امر این است که با استفاده از برنامه پاسخگویی بار نیازی به اضافه کردن ظرفیت جدید در S وجود ندارد. نتایج استفاده از برنامه پاسخگویی بار می‌تواند نیاز به نصب تولید را مرتفع کند. بنابراین اگرچه در آرایش فعلی شبکه خراسان، برنامه پاسخگویی بار تأثیری بر شبکه گاز ندارد، اما نتایج نشان می‌دهد که در حالت کلی با تغییر نیاز به نصب نیروگاه‌های جدید می‌تواند نیاز به خطوط لوله جدید را نیز برطرف سازد.

جدول ۲. جزئیات توسعه شبکه‌های برق و گاز با روش پاسخگویی بار

موارد	بدون در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار		با در نظر گرفتن برنامه پاسخگویی بار	
	شبکه برق	شبکه گاز	شبکه برق	شبکه گاز
هزینه سرمایه‌گذاری ($106)	۳۷۰	۱۹	۱۶۰	۱۹
هزینه برنامه پاسخگویی بار ($106)	-	-	۰/۶۴	-
هزینه کل ($109)	۷.۷۶	۳۷.۱۹	۶.۳	۳۷.۱۹
نامزدهای توسعه تولید	F, S, B2	-	F,B2	-
نامزدهای خطوط انتقال و خطوط لوله	F-H	A-B	F-H	A-B
هزینه کل سیستم یکپارچه ($109)	۴۴.۹۵		۴۳.۶۷	

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج تحقیق بر روی یک مورد واقعی در استان خراسان بررسی شده که در آن کفایت شبکه برق و گاز استان خراسان در مدت ۱۵ سال با حداقل هزینه برنامه‌ریزی عملیاتی به انجام برسد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که هر دو روش توسعه یکپارچه و نیز توسعه به روش ADMM که در آن یک نهاد واسط وظیفه هماهنگی دو شبکه برق و گاز را دارد، نتایج یکسانی را برای توسعه شبکه‌های برق و گاز به‌دست می‌دهد با این تفاوت که در حالت توسعه به روش ADMM هر شرکت مسئول توسعه و بهره‌برداری شبکه متبوع خود است. در این تحقیق نشان داده شد که در حالت توسعه مستقل ناهماهنگی بین شبکه‌های برق و گاز منجر به هزینه زیاد توسعه برای کل شبکه می‌شود. نتایج تحقیق در حالت رهبر - پیرو نیز بررسی و نشان داده شد که با پیرو بودن شبکه گاز هزینه توسعه بیشتری نسبت به حالت توسعه یکپارچه به شبکه گاز تحمیل می‌شود. برنامه پاسخگویی بار می‌تواند هزینه توسعه در هر دو شبکه گاز و برق را کاهش دهد. با مشارکت و ضریب نفوذ مناسب برنامه پاسخگویی بار، پروفیل بار روزانه می‌تواند مسطح شود.

منابع

Adib, M.M., Trone, D,K,(1999). "Local load shedding", IEEE Trans. On Power System, Vol. 3, No. 3, August 1998, pp. 1220-1229.

Barati,F. Seifi, H. Sepasian,M. S. Nateghi,A. Shafie-khah,M. and Catalão, J.P.(2015), "Multi-period integrated framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, pp. 2527-2537.

Chaudry,M. Jenkins,N. Qadrdan,M. and Wu, J.(2014) "Combined gas and electricity network expansion planning," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1171-1187.

Ding,T. Hu,Y. and Bie,Z.(2018), "Multi-Stage Stochastic Programming With Nonanticipativity Constraints for Expansion of Combined Power and Natural Gas Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 317-328.

He, C. Wu,L. Liu,T. and Bie,Z. (2017),"Robust Co-optimization Planning of Interdependent Electricity and Natural Gas Systems with a Joint N-1 and Probabilistic Reliability Criterion," *IEEE Transactions on Power Systems.*

Khaligh,V. Anvari-Moghaddam A., Guerrero,J.M.(2018), "A Leader-Follower Approach to Gas-Electricity Expansion Planning Problem," *IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC 2018),* 12-15 June 2018.

Li, C. Dong,Z. Chen,G. Luo,F. and Liu,J.(2015), "Flexible transmission expansion planning associated with large-scale wind farms integration considering demand response," *IET Generation, Transmission & Distribution,* vol. 9, pp. 2276-2283.

Menon,E. S.(2005), *Gas pipeline hydraulics*: CRC Press.

Nunes,J. B. Mahmoudi,N. Saha,T. K. and Chattopadhyay,D.(2018), "A stochastic integrated planning of electricity and natural gas networks for Queensland, Australia considering high renewable penetration," *Energy,* vol. 153, pp. 539-553.

Odetayo,B. MacCormack,J. W. Rosehart,D. and Zareipour,H.(2017), "A sequential planning approach for Distributed generation and natural gas networks," *Energy,* vol. 127, pp. 428-437.

Ojeda-Esteybar,D. M. Rubio-Barros,R. Añó,G. O. and Vargas,A.(2014), "Integration of electricity and natural gas systems-identification of coordinating parameters," in *Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA), 2014 IEEE PES*, pp. 1-8.

Qiu,J. Z. Dong, Y. Zhao, J. H. Xu,Y. Zheng,Y. Li C.(2015),"Multi-stage flexible expansion co-planning under uncertainties in a combined electricity and gas market," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 30, pp. 2119-2129.

Qiu,J. Yang, H. Dong,Z. Y. Zhao,J. H. Meng, K .F. Luo, J.*(2016),* "A linear programming approach to expansion co-planning in gas and electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 31, pp. 3594-3606.

Saldarriaga, C. A. Hincapié,R. A. and Salazar,H.(2013), "A holistic approach for planning natural gas and electricity distribution networks," *IEEE transactions on power systems,* vol. 28, pp. 4052-4063.

Shao, C., Shahidehpour, M., Wang,X. Wang, X. and Wang, B.(2107), "Integrated Planning of Electricity and Natural Gas Transportation Systems

for Enhancing the Power Grid Resilience," *IEEE Transactions on Power Systems.*

Seyedi H. and Sanaye-Pasand, M.(2009),"New centralised adaptive load-shedding algorithms to mitigate power system blackouts," *IET generation, transmission & distribution,* vol. 3, pp. 99-114.

Unsihuay-Vila, C. Marangon-Lima, J. A. de Souza,Z. I. Perez-Arriaga, J. and Balestrassi,P. P.(2010), "A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 25, pp. 1154-1168.

Zhou,X. Guo,C. Wang,Y. and Li,W.(2017), "Optimal Expansion Co-Planning of Reconfigurable Electricity and Natural Gas Distribution Systems Incorporating Energy Hubs," *Energies,* vol. 10, p. 124.

Zhang,X. Shahidehpour,M. Alabdulwahab,A. S. and Abusorrah, A. (2015), "Security-constrained co-optimization planning of electricity and natural gas transportation infrastructures," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 30, pp. 2984-2993.

Zhao, B. Conejo,A. J. and Sioshansi,R.(2017), "Coordinated Expansion Planning of Natural Gas and Electric Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems.*

Zeng,Q. Zhang,B. Fang,J. and Chen,Z.(2017), "A bi-level programming for multistage co-expansion planning of the integrated gas and electricity system," *Applied energy,* vol. 200, pp. 192-203, 2017.

پیوست: اختصارات استفاده شده در تحقیق

i,j	گره‌های شبکه گاز
m,n	باس‌های شبکه برق
t	دوره زمانی سطوح مختلف بار
d	روز
y	سال
g	واحدهای تولیدی
T	دوره برنامه‌ریزی
N^{Gas}, N^{Elec}	مجموعه باس‌های شبکه گاز و برق
$\mathcal{TL}$	مجموعه خطوط انتقال
$\mathcal{PL}, \mathcal{PL}^{Active}, \mathcal{PL}^{passive}$	مجموعه خطوط لوله، خطوط لوله اکتیو، خطوط لوله پسیو
GU, GU^{gas}	مجموعه واحدهای تولیدی، واحدهای تولیدی گازسوز

متغیرها

S_{iyd}^{Gas}	حجم گاز تولیدی در گره i بر حسب میلیون متر مکعب در روز
OC_{ydt}	هزینه سوخت نیروگاه‌های گازسوز شبکه برق در دوره زمانیt بـار بر حسب دلار
C_{yd}^{Elec}	هزینه بهره‌برداری از شبکه برق
C_{yd}^{Gas}	هزینه خرید گاز از گره i بر حسب دلار بر میلیون متر مکعب
f_{ijyd}^{Gas}	فلوی گاز در لوله بین گره‌های i و j از گره i به گـره j بـر حسـب میلیون متر مکعب در روز
s_{iyd}^{l}	حجم گاز مصرفی غیر نیروگاهی در گره i بر حسب میلیـون متـر مکعب در روز
pr_{iyd}^{g}	فشار گره i بر حسب بار
PF_{mnyd}	توان جاری در خط انتقال از باس m به باس n بر حسب مگاوات
X_{mgyd}^{Elec}	سوخت مصرفی نیروگاه‌های متصل به باس m بر حسـب میلیـون مترمکعب در دوره زمانی t
X_{iyd}^{gas}	حجم گاز مصرفی نیروگـاهی در گـره i بـر حسـب میلیـون متـر مکعب در روز در شبکه گاز

p_{mgydt}^{Gen}	توان تولیدی واحد تولیدی شماره gu در باس m در دوره زمانی t بر حسب مگاوات
θ_{mydt}	زاویه ولتاژ باس m بر حسب رادیان
bin_{ij}^{Pipe} / bin_{mn}^{Trans} / bin_{mg}^{Gen}	یک متغیر باینری است که در صورت نیاز به احداث واحد تولیدی gu در باس m / خط انتقال mn/ خط لوله ij مقدار آن یک خواهد بود.
$P_{mydt}^{E_load}$	بار مؤثر باس m در دوره t بر حسب مگاوات
$P_{DR_{mydt}}^{-}/P_{DR_{mydt}}^{+}$	کاهش/افزایش بار باس m در برنامه پاسخگویی بار
$u_{DR_{mydt}}^{-}/u_{DR_{mydt}}^{+}$	متغیر باینری بیان کننده حالت کاهش/افزایش بار در باس m

پارامترها

K_{ij}^{pipe}	ثابت مربوط به خط لوله ij که بر اساس شرایط محیطی و طول و قطر خط لوله تعیین می‌شود.
λ_{iyd}^{Gas}	قیمت گاز
λ^{Gas_r}	قیمت بار تأمین نشده شبکه گاز
L_{ij}^{Pipe}	طول خط لوله ij
A_{ij}^{Pipe}	قطر خط لوله ij
P_{mg}^{rated}	توان نامی واحد تولیدی باس m
P_{mydt}^{load}	بار هر باس در شبکه برق
λ_{m}^{X}	قیمت سوخت شبکه برق
λ^{Elec_r}	قیمت بار تأمین نشده شبکه برق
λ_{mydt}^{DR}	هزینه پرداخت شده به بار در ازای شرکت در برنامه پاسخگویی بار
y_{mn}	ادمیتانس خط انتقال از باس m به باس n
p_b	توان مبنا بر حسب مگاوات
GHV	ضریب تبدیل ارزش حرارتی سوخت مصرفی به گاز مصرفی
$cost_{ij}^{Pipe}$ / $cost_{mn}^{trans}$ / $cost_{mg}^{Gen}$	هزینه احداث خط لوله، خط انتقال/ واحد تولیدی
r	نرخ بهره

A Comparative Study on Optimization Methods for Expansion of Electricity and Gas Networks in Khorasan

Vahid Khaligh
Ph.D Student of Electrical Engineering Ferdowsi University of Mashhad,
Vahid.khaligh@mail.um.ac.ir

Majid Oloomi Buygi[1]
Associate Professor of Electrical Engineering Ferdowsi University of Mashhad,
m.oloomi@um.ac.ir
Received: 2018/09/01 Accepted: 2018/11/10

Abstract

Simultaneous planning for expansion of electricity and gas networks is a way to minimize investment costs of both networks. In our research we study different methods of expansion planning for the electricity and gas networks in a real-world case study of the Khorasan province of Iran. The results of the proposed methods show that both integrated and alternative direction method of multipliers (ADMM) provide similar results. However, the operational independence of operators in the ADMM method leads to higher expansion costs for the entire network, given the likely inconsistency between electricity and gas networks. The results of modelling in the Leader-Follower method indicate that when the gas network acts as a follower, it will face higher costs than under the integrated method. The load response program can also reduce the expansion cost in both gas and electricity networks.

JEL Classification: C61, L94, L95

Keywords: Gas network, expansion planning of electricity network, Khorasan.

1. Corresponding Author