

ارائه مدل پخش بار بهینه خطی جهت برنامه ریزی همزمان شبکه های توزیع چندگانه انرژی هوشمند

حسین قاسمی^۱، دکتری؛ جمشید آقایی^۲، استاد؛ گئورگ قره پتیان^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران - hosein_ghasemi80@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران - aghaei@sutech.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران - grptian@aut.ac.ir

چکیده: برنامه ریزی همزمان شبکه های چندگانه انرژی جهت بهبود بهره وری زیرساخت انرژی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در سال های اخیر استفاده از گاز طبیعی و منابع تولید پراکنده گازی (GDG) در صنعت برق افزایش یافته است. در این مقاله جهت برآورده نمودن اهداف چندگانه برنامه ریزی، یک مدل پخش بار جریان متناوب برای شبکه های توزیع برق و گاز پیشنهاد شده است. استراتژی پیشنهادی برخلاف روش های ابتکاری و پخش بار جداگانه به یک پخش بار همزمان و بدون تکرار می پردازد. مدل مسئله، یک مدل برنامه ریزی غیرخطی و غیرمحدب است. با توجه به پیچیدگی فرمول بندی و ماهیت غیرخطی و غیرمحدب مسئله، دستیابی به پاسخ بهینه زمان بر، دشوار و گاهی غیرممکن است. بنابراین، پخش بار به صورت یک مدل خطی اصلاح شده است. این مدل می تواند با استفاده از روش های بهینه سازی ریاضی موجود و یک همگرایی مطلوب برای حل مسئله برنامه ریزی اجرا شود. مدل پیشنهادی بر روی یک سیستم آزمایشی اجرا شده است و نتایج عددی کارآمدی مدل پیشنهادی را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: پخش بار همزمان، شبکه های توزیع برق و گاز، برنامه ریزی یکپارچه، منابع تولید پراکنده گازی، سیستم های چندحاملی.

Linearized Optimal Power Flow Model for Co-planning of Smart Multi-energy Distribution Networks

Hossein Ghasemi¹, Ph.D; Jamshid Aghaei², Professor; Gevork .B. Gharehpetian³, Professor

1- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: hosein_ghasemi80@yahoo.com

2- Department of Electrical and Electronics Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: aghaei@sutech.ac.ir

3- Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: grptian@aut.ac.ir

Abstract: Co-planning of multi-energy networks is of utmost importance for improving the overall productivity of energy infrastructure. In recent years, the use of natural gas distributed generation (GDG) has increased in the electricity industry. In this paper, an AC optimal power flow model for electricity and gas distribution networks is developed in order to meet the multiple objectives of planning. Unlike heuristic methods and separate power flow, the proposed strategy deals with a simultaneous OPF and non-iterative. The problem model is a nonlinear programming model and nonconvex. Due to the formulation complexity and non-linear and non-convex nature of the problem, it is time-consuming, difficult, and sometimes impossible to achieve an optimum response. Therefore, the power flow is reformulated as a linear programming model. This model can be implemented using existing mathematical optimization methods and a desirable convergence to solve the planning problem. The proposed model is implemented on a test system and the numerical results show the efficiency of the proposed model.

Keywords: Simultaneous power flow, electricity and gas networks, integrated planning, natural gas distributed generation, multi-carrier systems.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۰۴/۱۲

تاریخ اصلاح مقاله : ۱۳۹۷/۰۷/۲۷، ۱۳۹۷/۱۲/۰۴ و ۱۳۹۸/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۰۵/۰۱

نام نویسنده ی مسئول : دکتر جمشید آقایی

نشانی نویسنده ی مسئول : دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران.

۱- مقدمه

با توجه به افزایش تقاضا و فرسودگی زیرساخت شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی نیاز به نو سازی و توسعه شبکه‌های موجود احساس می‌شود. وابستگی بیش از پیش نیازهای بشری به انواع صورت‌های انرژی و تلاش جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث افزایش استفاده از گاز طبیعی شده است [۱، ۲]. انتظار می‌رود در سال‌های آینده در سمت عرضه مقدار زیادی از ظرفیت تولید برق پیش‌بینی شده از طریق گاز طبیعی تأمین شود [۳]. از طرفی در سمت تقاضا رشد قیمت برق باعث تغییر نحوه استفاده مشترکین از انواع حامل‌های انرژی خواهد شد [۴]. بنابراین جهت از بین بردن شکاف‌های نظری و نیازهای عملی در آینده نیاز به برنامه‌ریزی توسعه یکپارچه و بلندمدت جهت تأمین انرژی پایدار و اقتصادی است. گزارش اخیر سازمان ملل نیز به برنامه‌ریزی همزمان شبکه‌های برق و گاز تاکید دارد [۵].

با توجه به مسائل اقتصادی و زیست محیطی و افزایش ظرفیت بخش‌های مختلف سیستم قدرت، توسعه شبکه با روش‌های سنتی جوابگو نمی‌باشد. از طرفی سیستم قدرت فعلی قادر به پاسخگویی رشد بار نمی‌باشد، بنابراین برنامه‌ریزی دقیق اقتصادی و فنی در این زمینه نیاز است. در برنامه‌ریزی‌های توسعه قدیمی، اغلب یک نوع انرژی را مدل می‌کنند. با توجه به امکان جایگزینی گاز طبیعی و انرژی الکتریکی و تبدیل حامل‌های مختلف انرژی، ارتباط نزدیکی بین این دو شبکه وجود دارد. به‌طور کلی ادغام و برنامه‌ریزی توسعه همزمان شبکه‌های توزیع برق و گاز از جهت هزینه سرمایه‌گذاری کمتر، منافع بیشتر برای مشترکین، تسهیل رقابت بازار، تضمین امنیت انرژی، کاهش آلاینده‌ها، سود بازار و ... از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶-۸].

در حوزه بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سیستم‌های چندگانه انرژی در شبکه‌های تولید و انتقال مقالات متعددی تاکنون منتشر شده است. مرجع [۹]، برنامه‌ریزی سیستماتیک در شبکه‌های انتقال برق و گاز را با در نظر گرفتن عدم قطعیت مورد بررسی قرار داده است. در مرجع [۱] به برنامه‌ریزی هاب‌های انرژی در سیستم‌های چندگانه انرژی در شبکه انتقال با هدف قابلیت اطمینان پرداخته شده است. یک مدل برنامه‌ریزی بلندمدت یکپارچه و چندناحیه‌ای در سیستم‌های چندگانه انرژی در مرجع [۱۰] ارائه شده است که زنجیره ارزش تأمین گاز از تولید تا مصرف نهایی از طریق خطوط لوله گاز را در نظر گرفته است. یک چارچوب یکپارچه‌ی چنددوره‌ای جهت گسترش شبکه‌های تولید و انتقال و شبکه گاز طبیعی در مقیاس بزرگ در مرجع [۱۱] ارائه شده است. در مرجع [۱۲] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح با در نظر گرفتن

قابلیت اطمینان و عدم قطعیت ارائه شده است. در این مقاله، از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات فازی جهت حل مسئله استفاده شده است. با این حال، در شبکه‌های توزیع برق و گاز به برنامه‌ریزی توسعه همزمان کمتر پرداخته شده است. مرجع [۱۳] وابستگی متقابل و تعامل بین ذخیره‌ساز حرارتی و شبکه گرمایش منطقه‌ای را از جنبه‌های اقتصادی در یک سیستم توزیع مقیاس کوچک مورد مطالعه قرار داده است. تعادل بین هاب‌های هوشمند در سیستم‌های چندگانه انرژی در مرجع [۱۴] مدل شده است. در این مقاله، بر مبنای سمت تقاضا به مدیریت انرژی پرداخته شده است. به‌منظور حداقل نمودن هزینه‌های شرکت توزیع و افزایش قابلیت اطمینان، برنامه‌ریزی توسعه سه‌مرحله‌ای با رویکرد هاب انرژی در مرجع [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات فوق در شبکه‌های توزیع بر مبنای هاب انرژی انجام شده است. علاوه بر این، در این مطالعات برنامه‌ریزی همزمان بدون در نظر گرفتن معادلات کامل پخش بار انجام شده است. جهت بررسی دقیق و برنامه‌ریزی همزمان نیاز به در نظر گرفتن محدودیت‌ها، قیود و توسعه دارایی‌های شبکه گاز است. منابع تولیدات پراکنده گازی نقش اساسی در پیوند زیرساخت‌های انرژی ایفا می‌کنند. مراجع [۱۶، ۱۷] به‌جایابی و ظرفیت بهینه‌CHPها در سیستم‌های چندگانه انرژی پرداخته‌اند. همچنین در مراجع [۱۸-۲۰] به تأثیر تولیدات پراکنده شامل کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و ... پرداخته شده است. در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه، منابع تولید پراکنده گازی به‌صورت تزیق توان مدل شده است و به مقدار گاز دریافتی از شبکه گاز و در نتیجه آن توسعه شبکه گاز توجهی نشده است. این عوامل می‌تواند باعث ایجاد مشکلات و محدودیت‌هایی برای شبکه گاز شامل: افت فشار، ذخیره‌سازی، اختلال در عرضه گاز و غیره و در نتیجه مشکلاتی برای شبکه برق گردد [۲۱، ۲۲]. مدل برنامه‌ریزی توسعه در این مطالعه، یک مدل MINLP است. غیرخطی و غیر محدب بودن مدل مذکور متناظر با معادلات هزینه بهره‌برداری، توان اکتیو و راکتیو عبوری خطوط، شارش گاز و گاز مورد نیاز DG است. در [۲۳] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای شبکه‌های برق و گاز ارائه شده است. در این مقاله از روش‌های فراابتکاری جهت حل مسأله‌ی بهینه‌سازی استفاده شده است. حل مسائل بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی توسعه همزمان به دلیل ادغام دو شبکه، تعداد زیاد متغیرهای باینری و پیوسته و مقیاس بزرگ شبکه به‌صورت برنامه‌ریزی غیرخطی، پیچیده و زمان‌بر است [۲۴]. در [۲۵] مسأله مشارکت واحدها برای سیستم‌های یکپارچه به‌عنوان یک مدل غیرخطی پیشنهاد شده است در حالی‌که انتقال گاز بر مبنای برنامه‌ریزی خطی متوالی^۱ ارائه شده است. حل مسائل

لوله‌ها بر مبنای قیود حاکم بر شبکه توزیع گاز با معادلات (۱) و (۲) بیان شده است.

$$G_{GS_{n,l}} - G_{DG_{n,l}} - \sum_{m \in \Omega_n} A_{L_{nm}}^g G_{P_{nm,l}} = G_{D_{i,l}} \quad (1)$$

$$\forall n \in \Omega_G, \forall l \in \{1, \dots, nL\}$$

$$G_{P_{nm,l}} = \left(\sum_{p \in \Omega_{TP}} (x_{IP_{nm,p}} + x_{EP_{nm,p}}) * C_{1_{nm,p}} \right) * \sqrt{(P_{n,l}^2 - P_{m,l}^2)} \quad (2)$$

$$\forall nm \in \Omega_P, \forall l \in \{1, \dots, nL\}$$

در معادله (۲)، C_l ثابت شارش گاز است که به مشخصات خط لوله نظیر طول، قطر، ارتفاع، دما، ضریب اصطکاک و غیره وابسته است. در روابط فوق G_P, G_D, G_{GS} و G_{DG} به ترتیب تقاضای گاز در گره n ، شارش گاز در لوله، گاز مصرفی DG و ایستگاه گاز شهری است.

۲-۲- مدل شبکه توزیع برق

تعادل توان اکتیو و راکتیو گره‌ها بر مبنای قیود حاکم بر شبکه توزیع برق با معادلات (۳) و (۴) بیان شده است.

$$P_{G_{i,l}} + P_{DG_{i,l}} - \sum_{j \in \Omega_i} A_{L_{ij}}^e P_{L_{j,l}} = P_{D_{i,l}} \quad (3)$$

$$Q_{G_{i,l}} + Q_{DG_{i,l}} - \sum_{j \in \Omega_i} A_{L_{ij}}^e Q_{L_{j,l}} = Q_{D_{i,l}} \quad (4)$$

$$\forall ij \in \Omega_F, \forall l \in \{1, \dots, nL\}$$

در روابط فوق P_G, Q_G, P_{DG}, Q_{DG} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو پست برق و DG است. همچنین توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط در هر لحظه با روابط (۵) و (۶) بیان شده است.

$$P_{L_{ij,l}} = \sum_{f \in \Omega_{TP}} \left(\begin{aligned} &G_{ij} (V_{i,t,l})^2 \\ &- V_{i,t,l} V_{j,t,l} \{ G_{ij} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \} \\ &+ B_{ij} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \} \end{aligned} \right) * (x_{IF_{ij,l}} + x_{EF_{ij,l}}) \quad (5)$$

غیرخطی در بیشتر موارد دارای پاسخ محلی و یا غیرممکن است. بدین معنی که معمولاً دستیابی به پاسخ بهینه‌ی سراسری تضمین نمی‌شود [۲۶]. روش‌های خطی جهت رفع چنین چالش‌هایی در مطالعات اخیر استفاده شده است [۲۷]. علاوه بر این، حل این مسائل با الگوریتم‌های فراابتکاری [۲۸، ۲۹] برخلاف روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک [۳۰] دارای معایبی هستند. هر چند روش‌های فراابتکاری قدرتمند و انعطاف‌پذیر هستند اما معایب این روش‌ها را می‌توان فاصله تا پاسخ بهینه سراسری، زمان محاسباتی بالا و تنظیم دقیق پارامترها را نام برد [۳۱، ۳۲]. جهت خطی‌سازی معادلات غیرخطی در این مقاله از روش‌های تکه‌ای خطی، بسط سری تیلور، خطی‌سازی قیود دایره‌ای و Big-M استفاده شده است.

مشارکت‌های اصلی مقاله به شرح زیر است:

۱- فرمول‌بندی غیرخطی جهت پخش بار بهینه همزمان شبکه‌های توزیع برق و گاز بسط داده شده است. روش پیشنهادی نسبت به برنامه‌ریزی‌های معمول که به صورت مستقل شبکه برق و گاز را در نظر می‌گیرند، هزینه توسعه کمتری دارد.

۲- در مطالعات برنامه‌ریزی معمول، منابع تولید پراکنده گازی به عنوان تزریق توان مدل شده است و به مقدار گاز دریافتی از شبکه گاز و در نتیجه توسعه شبکه گاز توجهی نمی‌شود. در این مطالعه، منابع تولید پراکنده و محدودیت‌ها که شبکه گاز با آن مواجه است به صورت خطی مدل شده است.

۳- یک مدل خطی برای برنامه‌ریزی همزمان هر دو شبکه پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی، همگرایی مسئله جهت دستیابی به پاسخ بهینه سراسری را تضمین می‌کند.

۲- فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی مستقل

مدل برنامه‌ریزی در این مسئله ضمن برآورده نمودن قیود بهره‌برداری، حداقل هزینه‌های توسعه و بهره‌برداری را برای برنامه‌ریزی آینده تعیین می‌نماید. المان‌های قابل توسعه در این برنامه‌ریزی شامل پست‌ها و خطوط برق، منابع تولید پراکنده، ایستگاه‌ها و خطوط لوله گاز است. مدل مذکور به صورت یک مدل غیرخطی آمیخته با عدد صحیح فرمول‌بندی شده است که در آن چند نوع جایگزین برای هر تجهیز در نظر گرفته شده است و بهترین جایگزین، مکان و زمان برای توسعه شبکه تعیین شده است.

۲-۱- مدل شبکه توزیع گاز

معمولاً شارش گاز در شبکه با روش حلقه-گره نیوتن^۲ مدل می‌شود. شارش گاز در لوله‌ها نیز از معادله برنولی^۳ اعمالی به شبکه گاز به دست می‌آید [۳۳، ۳۴]. تعادل شارش گره‌ای گاز و شارش گاز در

هزینه بهره‌برداری شبکه انتقال در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در این مقاله هزینه بهره‌برداری شبکه گاز در نظر گرفته نشده است.

$$OC_L = \left(\frac{1}{1+r} \right)^{nT} \sum_{l=1}^{nL} \sum_{ij \in \Omega_{ij}} \sum_{f \in \Omega_{if}} \left[\frac{(V_{i,t,l} - V_{j,t,l})^2}{Z_{ij,f,t}} \right] * (x_{IF_{ij,f}} + x_{EF_{ij,f}}) \quad (11)$$

هزینه سرمایه‌گذاری خطوط لوله گاز و ایستگاه‌های گاز شهری به‌ترتیب با معادلات (۱۲) و (۱۳) بیان شده است.

$$IC_P = \sum_{nm \in \Omega_{IP}} \sum_{p \in \Omega_{IP}} (IC_{IP_{nm,p}} x_{IP_{nm,p}}) + \sum_{nm \in \Omega_{EP}} \sum_{p \in \Omega_{EP}} (IC_{EP_{nm,p}} x_{EP_{nm,p}}) \quad (12)$$

$$IC_{GS} = \sum_{n \in \Omega_{GS}} \sum_{g \in \Omega_{GS}} (IC_{GS_{n,g}} x_{GS_{n,g}}) + \sum_{m \in \Omega_{EGS}} \sum_{g \in \Omega_{GS}} (IC_{EGS_{m,g}} x_{EGS_{m,g}}) \quad (13)$$

در معادلات (۸) الی (۱۰)، (۱۲) و (۱۳)، بخش اول مربوط به نصب دارایی‌های جدید و بخش دوم افزایش ظرفیت دارایی‌ها موجود است.

۲-۴- محدودیت‌های شبکه برق و گاز

قید فشار گاز در گره‌ها:

$$\underline{P}_n \leq P_{n,l} \leq \bar{P}_n \quad \forall n \in \Omega_G, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (14)$$

قید شارش گاز عبوری از خطوط لوله:

$$\underline{G}_P \leq G_{P_{nm,l}} \leq \bar{G}_P \quad \forall nm \in \Omega_P, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (15)$$

کران ظرفیت ایستگاه گاز شهری:

$$0 \leq G_{GS_{n,l}} \leq \sum_{g \in \Omega_{GS}} \bar{G}_{GS_g} * (x_{IGS_{n,g}} + x_{EGS_{n,g}}) \quad \forall n \in \Omega_{GS}, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (16)$$

کران دامنه ولتاژ گره‌ها:

$$\underline{V}_i \leq V_{i,l} \leq \bar{V}_i \quad \forall i \in \Omega_E, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (17)$$

$$Q_{L_{ij,f}} = \sum_{f \in \Omega_{if}} \left(\begin{aligned} &-B_{ij} (V_{i,t,l})^2 \\ &+ V_{i,t,l} V_{j,t,l} \{B_{ij} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})\} \\ &- G_{ij} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \} \end{aligned} \right) * (x_{IF_{ij,f}} + x_{EF_{ij,f}}) \quad \forall ij \in \Omega_F, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (6)$$

$$\theta_{j,t} = 0; \forall j = \text{Slack bus}, t$$

۳-۲- تابع هدف

تابع هدف در این مقاله، حداقل نمودن هزینه سرمایه‌گذاری دارایی‌های موجود شبکه و همچنین هزینه بهره‌برداری شبکه برق است (معادله (۷)).

$$Z = \sum_{t=1}^{nS} \left(\frac{1}{1+r} \right)^{(t-1)nT} \left(\begin{aligned} &IC_F + IC_{DG} \\ &+ OC_L + IC_{GS} \\ &+ IC_P + IC_S \end{aligned} \right) \quad (7)$$

تابع هدف از هزینه‌های سرمایه‌گذاری شامل؛ هزینه فیدرها (IC_F)، پست‌های برق (IC_S)، ایستگاه‌های گاز شهری (IC_{GS})، خطوط لوله گاز (IC_P)، DGها (IC_{DG}) و همچنین هزینه بهره‌برداری (OC_L) تشکیل شده است.

هزینه سرمایه‌گذاری فیدرها، پست‌های برق و DGها به‌ترتیب با روابط (۸) الی (۱۰) بیان شده است.

$$IC_F = \sum_{ij \in \Omega_{IF}} \sum_{f \in \Omega_{IF}} (IC_{IF_{ij,f}} x_{IF_{ij,f}}) + \sum_{ij \in \Omega_{EF}} \sum_{f \in \Omega_{EF}} (IC_{EF_{ij,f}} x_{EF_{ij,f}}) \quad (8)$$

$$IC_S = \sum_{i \in \Omega_S} \sum_{s \in \Omega_S} (IC_{IS_{i,s}} x_{IS_{i,s}}) + \sum_{j \in \Omega_{ES}} \sum_{s \in \Omega_S} (IC_{ES_{j,s}} x_{ES_{j,s}}) \quad (9)$$

$$IC_{DG} = \sum_{i \in \Omega_E} \sum_{m \in \Omega_M} (IC_{IDG_{i,m}} x_{IDG_{i,m}}) + \sum_{j \in \Omega_{GM}} \sum_{m \in \Omega_M} (IC_{EDG_{j,m}} x_{EDG_{j,m}}) \quad (10)$$

هزینه بهره‌برداری:

در این مدل تنها هزینه بهره‌برداری مربوط به شبکه‌توزیع برق در نظر گرفته شده است. برای جبران افت فشار در شبکه‌های گاز طبیعی نیاز به نصب ایستگاه‌های تقویت فشار گاز (کمپرسورها) است. معمولاً این ایستگاه‌ها جهت جبران افت فشار قابل ملاحظه در شبکه‌های فشار بالا نصب می‌شود و هزینه سوخت آن به‌عنوان

در افق برنامه‌ریزی نصب شود. معادله (۲۵) نیز قید مربوط به حداکثر تعداد منابع تولید پراکنده نصب‌شده در هر گره است.

۳- مدل برنامه‌ریزی یکپارچه

۳-۱- قیود مبتنی بر تولید پراکنده

در رویکرد برنامه‌ریزی همزمان جهت برقراری منافع هر دو شبکه، شرکت بهره‌بردار مستقل سیستم^۴ (ISO) مسئول ایجاد یک بازار یکپارچه و کارآمد برای هر دو شبکه است. این رویکرد مشابه با بازار انرژی استرالیا است. بهره‌بردار بازار انرژی استرالیا (AEMO) راه‌حل‌ها و مشاوره‌های لازم جهت تصمیم‌گیری در سرمایه‌گذاری را به صاحبان دارایی‌ها می‌دهد [۳۵]. در این بخش مدل خطی برنامه‌ریزی توسعه همزمان ارائه شده است که نسبت به برنامه‌ریزی مستقل پیچیده‌تر است.

شبکه‌های برق و گاز در نقاط مختلف از طریق تقاضاهای گوناگون و منابع تولید پراکنده گازی به هم مرتبط می‌شوند. مقدار گاز مصرفی منابع DG جهت تزریق توان به شبکه الکتریکی با استفاده از معادله (۲۶) بیان شده است [۲۶].

$$G_{DG_{n,l}} = \sum_{m \in \Omega_{nM}} \left(\omega_1 (P_{DG_{i,l}}) + \omega_2 (P_{DG_{i,l}})^2 + \omega_3 (x_{IDG_{i,m}} + x_{EDG_{i,m}}) \right) \quad \forall n \in \Omega_{GM}, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (26)$$

در این معادله، ω_1 و ω_2 و ω_3 ضرایب سوخت گاز اتوان الکتریکی DGها است.

۳-۲- خطی‌سازی مدل برنامه‌ریزی ریاضی

مدل پیشنهادی در این مطالعه، یک مسئلهی MINLP و غیرمحدب است. در این بخش معادلات به‌فرم خطی تبدیل شده است. روش‌های استفاده‌شده در این مسئله، روش‌های تکه‌ای خطی، سری تیلور، Big-M و خطی‌سازی قیود دایره‌ای است [۳۱، ۳۶، ۳۷].

الف- خطی‌سازی رابطه (۲)

معادله (۲) بر اساس روش‌های تکه‌ای خطی، Big-M و گسسته‌سازی معادلات درجه دوم با y بخش خطی تقریب زده شده است. برای بیان معادله خطی، رابطه (۲) به‌صورت رابطه (۲۷) بازنویسی شده است. عبارت π یک متغیر کمکی است که از رابطه (۲۸) قابل محاسبه است. روش Big-M در بخش پیوست توضیح داده شده است.

قید توان عبوری از خطوط:

$$(P_{L_{ij}})^2 + (Q_{L_{ij}})^2 \leq \sum_{f \in \Omega_F} \left(\bar{S}_{L_{ij}} \right)^2 * (x_{IF_{ij}} + x_{EF_{ij}}) \quad \forall ij \in \Omega_F, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (18)$$

حداکثر ظرفیت تمامی منابع تولید پراکنده (معادله (۱۹)) و پست‌ها (معادله (۲۰)).

$$(P_{DG_{i,l}})^2 + (Q_{DG_{i,l}})^2 \leq \sum_{m \in \Omega_{nM}} \left(\bar{S}_{DG_m} \right)^2 * (x_{IDG_{i,m}} + x_{EDG_{i,m}}) \quad \forall i \in \Omega_E, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (19)$$

$$(P_{G_{i,l}})^2 + (Q_{G_{i,l}})^2 \leq \sum_{s \in \Omega_{nS}} \left(\bar{S}_{G_s} \right)^2 * (x_{IG_{i,s}} + x_{EG_{i,s}}) \quad \forall i \in \Omega_S, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (20)$$

۵-۲- قیود توپولوژی شبکه برق و گاز

$$\sum_{g \in \Omega_{nGS}} (x_{IGS_{n,g}} + x_{EGS_{n,g}}) \leq 1 \quad \forall n \in \Omega_{GS} \quad (21)$$

$$\sum_{p \in \Omega_{nTP}} (x_{IP_{nm,p}} + x_{EP_{nm,p}}) \leq 1 \quad \forall nm \in \Omega_P \quad (22)$$

معادله (۲۱) تضمین می‌کند که در یک زمان تنها یک نوع پست گاز در هر گره می‌تواند در طول افق برنامه‌ریزی نصب شود. معادله (۲۲) نیز قید مربوط به حداکثر تعداد لوله‌های نصب‌شده بین دو گره است.

$$\sum_{s \in \Omega_{nS}} (x_{IG_{i,s}} + x_{EG_{i,s}}) \leq 1 \quad \forall i \in \Omega_S \quad (23)$$

$$\sum_{f \in \Omega_{nF}} (x_{IF_{ij}} + x_{EF_{ij}}) \leq 1 \quad \forall ij \in \Omega_F \quad (24)$$

$$\sum_{m \in \Omega_{nM}} (x_{IDG_{i,m}} + x_{EDG_{i,m}}) \leq 1 \quad \forall i \in \Omega_E \quad (25)$$

معادلات (۲۳) و (۲۴) به‌ترتیب تضمین می‌کنند که در یک زمان تنها یک هادی بین هر دو گره و یک نوع پست در هر گره می‌تواند

ب- تقریب خطی معادلات (۵) و (۶)

در این بخش از روش‌های تکه‌ای خطی و سری تیلور جهت خطی‌سازی استفاده شده است. در مدل خطی‌سازی شده، فرضیاتی در نظر گرفته شده است که معمولاً برای شبکه‌های توزیع معتبر است.

اختلاف زاویه ولتاژ ابتدا و انتهای خط مقدار کوچکی و تقریباً برابر با ۶ درجه (۰/۱۰۵ رادیان) است. بر این اساس $\sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})$ و $\cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t})$ به ترتیب برابر با ۱ و ۰ است.

بر اساس روش تکه‌ای خطی، ولتاژ باس برابر با $V + \sum_{y=1}^{nY} \Delta V_y$ است.

بنابراین:

$$V^2 = V_-^2 + \sum_{y=1}^{nY} S_y^v \Delta V_y \quad (36)$$

$$V_i V_j = V_-^2 + V_- \sum_{y=1}^{nY} \Delta V_{i,y} + V_- \sum_{y=1}^{nY} \Delta V_{j,y} \quad (37)$$

در این روش از عبارت‌های ΔV^2 و $\Delta V(\theta_{i,j})$ و $\Delta V(\theta_{i,j})^2$ به دلیل ناچیز بودن $\theta_{i,j}$ و ΔV صرفه‌نظر شده است.

بر این اساس با جایگذاری روابط فوق و روش Big-M، معادلات خطی روابط (۵) و (۶) به صورت زیر است:

$$P_{L_{ij,t}} - \left(G_{ij} \left(\sum_{y \in \Omega_p} (S_y^v - V_-) \Delta V_{i,t,l,y} - V_- \Delta V_{j,t,l,y} \right) - (V_-)^2 B_{ij} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right) \leq M \left(1 - \sum_{f \in \Omega_{Tf}} (x_{IF_{f,t}} + x_{EF_{f,t}}) \right) \\ P_{L_{ij,t}} - \left(G_{ij} \left(\sum_{y \in \Omega_p} (S_y^v - V_-) \Delta V_{i,t,l,y} - V_- \Delta V_{j,t,l,y} \right) - (V_-)^2 B_{ij} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right) \geq -M \left(1 - \sum_{f \in \Omega_{Tf}} (x_{IF_{f,t}} + x_{EF_{f,t}}) \right) \quad (38)$$

$$-P_{L_{ij,t}} \left(\sum_{f \in \Omega_{Tf}} (x_{IF_{f,t}} + x_{EF_{f,t}}) \right) \leq P_{L_{ij,t}} \\ -P_{L_{ij,t}} \left(\sum_{f \in \Omega_{Tf}} (x_{IF_{f,t}} + x_{EF_{f,t}}) \right) \leq \bar{P}_{L_{ij,t}} \quad (39)$$

$$-M \left(1 - \sum_{p \in \Omega_{Tp}} (x_{IP_{nm,p}} + x_{EP_{nm,p}}) \right) \leq G_{P_{nm,l}}$$

$$-(C_{1_{nm,p}} * \pi_{nm,l}) \leq M$$

$$\left(1 - \sum_{p \in \Omega_{Tp}} (x_{IP_{nm,p}} + x_{EP_{nm,p}}) \right)$$

$$0 \leq G_{P_{nm,l}} \leq \bar{G}_{P_{nm}} \left(\sum_{p \in \Omega_{Tp}} (x_{IP_{nm,p}} + x_{EP_{nm,p}}) \right)$$

$$\forall nm \in \Omega_P, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (27)$$

$$\pi_{nm,l}^2 = (P_{n,l}^2 - P_{m,l}^2) \quad (28)$$

در ادامه، مشابه با قبل (روش تکه‌ای خطی) به خطی‌سازی معادلات به شرح ذیل پرداخته شده است:

$$\sum_{y=1}^{nY} S_y^v \Delta \pi_{nm,l,y} = \sum_{y=1}^Y S_y^p (\Delta P_{n,l,y} - \Delta P_{m,l,y}) \quad (29)$$

$$\pi_{nm,l} = \sum_{y=1}^{nY} \Delta \pi_{nm,l,y}$$

$$\forall nm \in \Omega_P, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (30)$$

$$P_{n,l} = P_n + \sum_{y=1}^{nY} \Delta P_{n,l,y}$$

$$\forall n \in \Omega_G, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (31)$$

محدودیت‌های مربوط به متغیرهای گسسته‌سازی با روابط زیر بیان می‌شود:

$$0 \leq \Delta \pi_{nm,l,y} \leq \frac{\bar{\pi}_{nm}}{Y}$$

$$\forall nm \in \Omega_P, \forall l \in \{1, \dots, nL\}, \forall y \in \{1, \dots, nY\} \quad (32)$$

$$0 \leq \Delta P_{n,l,y} \leq \frac{\bar{P}_n}{Y}$$

$$\forall n \in \Omega_G, \forall l \in \{1, \dots, nL\}, \forall y \in \{1, \dots, nY\} \quad (33)$$

$$S_y^p = \frac{\left[y^2 - (y-1)^2 \right] \left(\frac{\bar{\pi}_{nm}}{Y} \right)^2}{\frac{\bar{\pi}_{nm}}{Y}} = \frac{(2y-1) \bar{\pi}_{nm}}{Y} \quad (34)$$

$$S_y^p = \frac{(2y-1) \bar{P}_n}{Y} \quad (35)$$

در روابط فوق، S_y^p و S_y^π معرف شیب هر تکه خطی برای متغیرهای π و P است.

د- خطی‌سازی معادله (۲۶)

معادله (۲۶) براساس روش‌های تکه‌ای خطی، Big-M و گسسته‌سازی معادلات درجه دوم با y بخش خطی تقریب زده شده است.

$$-M \left(1 - \sum_{m \in \Omega_{DG}} (x_{IDG_{i,m}} + x_{EDG_{i,m}}) \right) \leq G_{DG_{n,l}} - \sum_{y=1}^Y M_y^{P_{dg}} (\Delta P_{n,l,y}^{dg}) \quad (45)$$

$$+\omega_{3_{n,h}} \leq M \left(1 - \sum_{m \in \Omega_{DG}} (x_{IDG_{i,m}} + x_{EDG_{i,m}}) \right) \\ 0 \leq G_{DG_{n,l}} \leq \bar{G}_{DG} \sum_{m \in \Omega_{DG}} (x_{IDG_{i,m}} + x_{EDG_{i,m}})$$

$$P_{DG_{n,l}} = \sum_{y=1}^Y \Delta P_{n,l,y}^{dg} \quad (46)$$

$$\forall n \in \Omega_{GH}, \forall l \in \{1, \dots, nL\}$$

$$M_y^{P_{dg}} = P_{DG_{n,l}} \omega_{2_{n,h}} + \omega_{1_{n,h}} \quad (47)$$

$$0 \leq \Delta P_{n,l,y}^{dg} \leq \frac{\bar{P}_{DG_{n,l}}}{Y} \quad (48)$$

$$\forall n \in \Omega_{GH}, \forall l \in \{1, \dots, nL\}, \forall y \in \{1, \dots, nY\}$$

فلوچارت روش پیشنهادی در بخش پیوست ارائه شده است.

۴- سیستم مورد مطالعه و نتایج عددی

۴-۱- سیستم مورد مطالعه

در این مقاله، روش پیشنهادی بر روی یک سیستم توزیع برق و گاز آزمایشی (شکل ۱) اعتبارسنجی شده است. شبیه‌سازی‌ها در این مطالعه تحت نرم‌افزار GAMS انجام شده است. تعداد و علائم المان‌های شبکه برق و گاز موجود و جدید در جدول ۱ بیان شده است. گره‌های موجود نیز در صورت دارا بودن تقاضای برق و گاز به سیستم متصل می‌گردند. افق برنامه‌ریزی ۱۰ ساله است. جهت شرح بهتر مدل بهره‌برداری یک منحنی گسسته تداوم بار در نظر گرفته شده است. سطوح بار با ضرایب ۱۰۰٪، ۶۵٪، ۳۵٪ پیک تقاضای برق با مدت زمان‌های ۱۰۷۵، ۵۴۹۰ و ۲۱۹۵ ساعت به ترتیب در نظر گرفته شده است. نرخ تخفیف و رشد سالانه تقاضای انرژی به ترتیب برابر با ۷٪ و ۶٪ فرض شده است. در این مطالعه، برای هر المان چندین ظرفیت متفاوت (چند نوع) در نظر گرفته شده است.

$$Q_{L_{ij}} - \left(-B_{ij} \left(\sum_{y \in \rho_y} (S_y^v - V) \Delta V_{i,t,l,y} - V \Delta V_{j,t,l,y} \right) - (V)^2 G_{ij} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right)$$

$$\leq M \left(1 - \sum_{f \in \Omega_F} (x_{IF_{ij,f}} + x_{EF_{ij,f}}) \right)$$

$$Q_{L_{ij}} - \left(-B_{ij} \left(\sum_{y \in \rho_y} (S_y^v - V) \Delta V_{i,t,l,y} - V \Delta V_{j,t,l,y} \right) - (V)^2 G_{ij} (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \right)$$

$$\geq -M \left(1 - \sum_{f \in \Omega_F} (x_{IF_{ij,f}} + x_{EF_{ij,f}}) \right) \quad (40)$$

$$-\bar{Q}_{L_{ij}} \left(\sum_{f \in \Omega_F} (x_{IF_{ij,f}} + x_{EF_{ij,f}}) \right) \leq Q_{L_{ij,l}}$$

$$\leq \bar{Q}_{L_{ij}} \left(\sum_{f \in \Omega_F} (x_{IF_{ij,f}} + x_{EF_{ij,f}}) \right)$$

$$\forall ij \in \Omega_F, \forall l \in \{1, \dots, nL\} \quad (41)$$

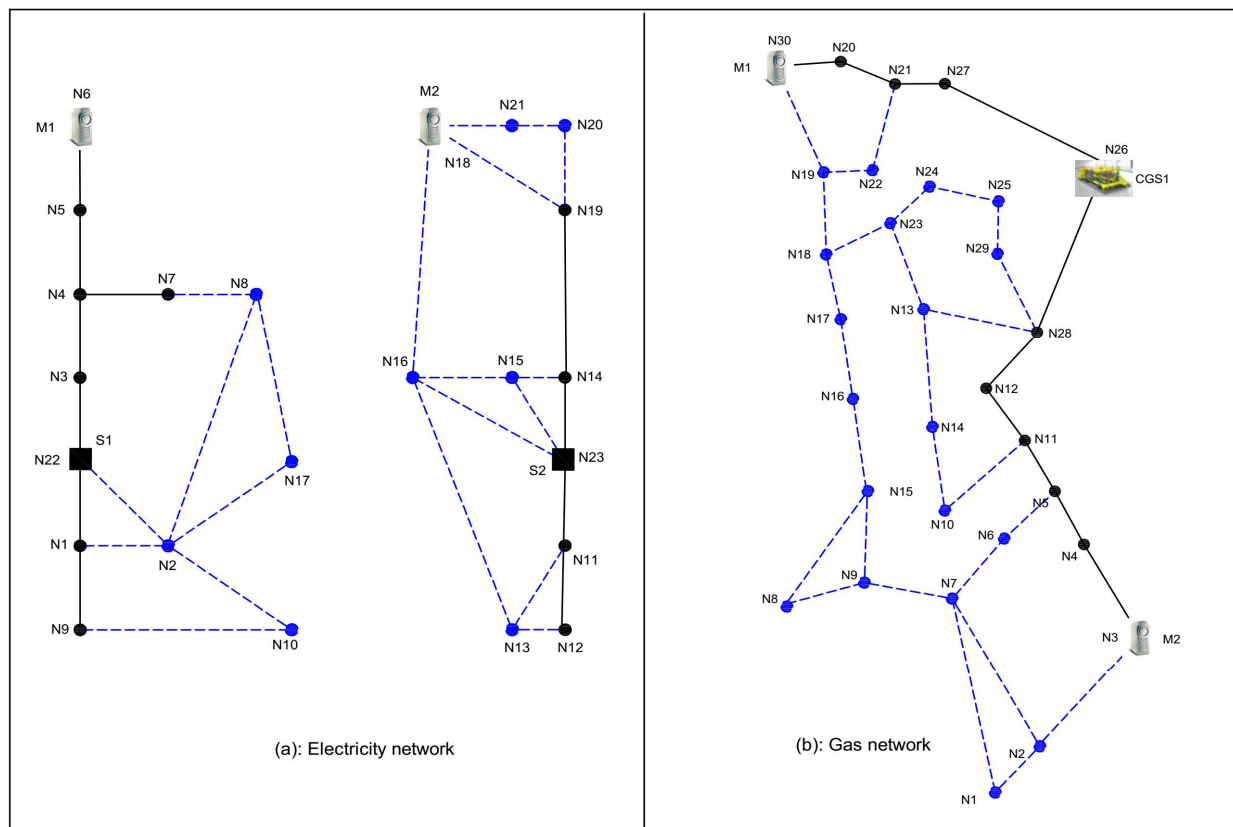
ج- خطی‌سازی محدودیت‌های توان

قیود (۱۸) الی (۲۰) غیرخطی و به صورت صفحه دایره‌ای در مختصات PQ هستند. قیود دایره‌ای را می‌توان از اشتراک صفحات مربعی به صورت تقریب خطی به دست آورد. معادلات خطوط در این صفحات از خطوط مماس بر دایره در نقاط مختلف به دست می‌آید [۳۸].

$$\sum_{y=1}^Y (\cos(y \Delta \alpha) P_{L_{ij,l}} + \sin(y \Delta \alpha) Q_{L_{ij,l}}) \leq \sum_{f \in \Omega_F} \bar{S}_{L_{ij}} * (x_{IF_{ij,f}} + x_{EF_{ij,f}}) \quad (42)$$

$$\sum_{y=1}^Y (\cos(y \Delta \alpha) P_{DG_{i,l}} + \sin(y \Delta \alpha) Q_{DG_{i,l}}) \leq \sum_{m \in \Omega_{DG}} \bar{S}_{DG_i} * (x_{IDG_{i,m}} + x_{EDG_{i,m}}) \quad (43)$$

$$\sum_{y=1}^Y (\cos(y \Delta \alpha) P_{G_{i,l}} + \sin(y \Delta \alpha) Q_{G_{i,l}}) \leq \sum_{s \in \Omega_{GS}} \bar{S}_{G_i} * (x_{IG_{i,s}} + x_{EG_{i,s}}) \quad (44)$$



شکل ۱: توپولوژی شبکه توزیع برق و گاز مورد مطالعه

مورد ۳: برنامه‌ریزی یکپارچه و همزمان شبکه برق و گاز با در نظر گرفتن منابع DG. تفاوت این مورد با مورد ۲ این است که یک پخش بار همزمان اجرا می‌شود و DG در این حالت یک متغیر تصمیم‌گیری است. در این مورد استفاده از منابع DG جهت تزریق توان به شبکه وابسته به توسعه شبکه گاز و قیود بهره‌برداری هر دو شبکه است.

۴-۲- نتایج عددی

الف- مقایسه نتایج مدل خطی و غیرخطی:

جهت نشان دادن کارآمدی و سودمندی مدل برنامه‌ریزی خطی پیشنهادی، متغیرها و نتایج به دست آمده از مدل خطی و غیرخطی با یکدیگر مقایسه شده است. همانگونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، اختلاف بین فشار، دامنه و زاویه ولتاژ در مدل خطی نسبت به مدل غیرخطی به ترتیب حدود ۰/۱۳٪، ۰/۳۸٪ و ۰/۴۳٪ است. در جدول ۳ مقایسه‌ای بین هر دو مدل از جهت زمان محاسباتی، هزینه کلی سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری انجام شده است. همان‌طور که در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده است، مدل خطی دقت بالایی در به دست آوردن متغیرهای مسئله دارد. از طرفی مسئله

جدول ۱: راهنمای علائم و تعداد المان‌های شبکه توزیع برق و گاز

Elements/Number	Existing (number)	New (number)	Symbols (Existing)	Symbols (New)
Electricity nodes	۱۳	۱۰		
Gas nodes	۱۱	۱۹		
Substations	۲	-		
Feeders	۱۱	۲۰		
City gate Station	۱	-		-
Pipe lines	۱۰	۲۷		
DG	-	۲	-	

دیگر داده‌های مورد نیاز در مرجع [۳۳] و www.researchgate.net/publication/32835800_SMED_N در دسترس است.

در این مطالعه، سه مورد مختلف جهت نشان دادن کارآمدی روش ارائه شده مورد مطالعه قرار گرفته است.

مورد ۱: برنامه‌ریزی شبکه برق و گاز به صورت مجزا از هم

مورد ۲: برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق و گاز به صورت مستقل با در

نظر گرفتن منابع DG

افزایش یافته‌است (نوع B). همچنین نیاز به نصب فیدرها و لوله‌های گاز جدید و در بعضی نقاط افزایش ظرفیت آن‌ها می‌باشد. در مورد ۲ با توجه به استفاده از منابع تولیدپراکنده در گره‌های ۶ و ۱۸، بخشی از توسعه شبکه توزیع برق به تعویق می‌انجامد و از این‌رو مقداری از توان مورد تقاضا از طریق DGها تأمین می‌شود. در واقع در مورد ۲ در مقایسه با مورد ۱، منابع DG جدید نصب شده است و در نتیجه پست‌های شبکه اولیه به همراه منابع DG قادر به تأمین تقاضای شبکه برق است و نیاز به افزایش ظرفیت پست‌ها نمی‌باشد. اما نصب منابع DG باعث افزایش ظرفیت (نوع B) ایستگاه گاز شده است. از دیگر تفاوت‌های برجسته مورد ۱ و ۲ می‌توان به استفاده از فیدرها با ظرفیت پایین‌تر (نوع A) و خطوط لوله گاز با ظرفیت بالاتر (نوع B) اشاره کرد. این حالت در فیدرهای شماره L3 و L8 و L29 و خطوط لوله گاز P7 و P9 قابل مشاهده است. همچنین وجود DG باعث شده که تقاضای برق بعضی گره‌ها از DG نزدیک به خود تأمین گردد و نیاز به نصب خطوط جدید نباشد. این حالت در گره ۲۱ قابل مشاهده است. به عبارت دیگر، در مورد ۱ جهت تأمین توان گره ۲۱ از پست S2 نیاز به نصب خطوط جدید L19 و L20 است، در صورتی که در مورد ۲ با توجه به اینکه گره ۲۱ در نزدیکی DG می‌باشد، تنها نیاز به نصب خط جدید L21 است.

مورد ۳ شبکه برق مشابهی با مورد ۲ دارد اما نسبت به مورد ۲ نیاز به توسعه شبکه گاز کمتری دارد. به طور خاص، در مورد ۳ خط لوله L9 ظرفیت آن افزایش یافته است در صورتی که در مورد ۲ خطوط لوله گاز L7 و L9 افزایش ظرفیت داشته‌اند. همچنین در مورد ۳ نیاز به افزایش ظرفیت ایستگاه‌های گاز موجود نمی‌باشد. هزینه توسعه شبکه برق و گاز حاصل از توپولوژی‌های مختلف در هر سه مورد مطالعاتی در جدول ۵ به تفکیک قابل مشاهده است.

جدول ۴: هزینه کلی برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های برق و گاز (\$)

Case/Costs	Expansion (Elec)	OC_L	Expansion (Gas)	Total Cost
۱	۲۲۶۳۵۰۹	۱۸۰۱۰۴۷	۴۵۸۷۴۶	۴۵۲۳۳۰۲
۲	۱۹۶۵۰۰۶	۷۱۹۰۲۱	۱۶۵۱۵۷۶	۴۳۳۵۶۰۳
۳	۱۹۶۵۰۰۶	۷۴۹۷۷۰	۵۲۶۴۷۶	۳۲۴۱۲۵۲

جدول ۵: هزینه سرمایه‌گذاری توسعه شبکه‌های برق و گاز (\$)

Case	IC_S	IC_F	IC_{DG}	IC_{GS}	IC_P
۱	۴۱۳۲۰۰	۱۸۵۰۳۰۹	۰	۰	۴۵۸۷۴۶
۲	۰	۱۴۴۸۴۰۶	۵۱۶۶۰۰	۹۶۴۴۰۰	۶۸۷۱۷۶

خطی، زمان محاسباتی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری پایین‌تری نسبت به مدل غیرخطی دارد. در [۳۹] یک مدل غیرخطی ارائه شده است که ممکن است پاسخ بهینه سراسری نباشد. در [۴۰] پخش بار غیرخطی در شبکه‌های گاز با استفاده از یک روش جایگزینی رو به جلو سریع حل شده است. این روش جهت حل از تعداد تکرار زیاد و یک پاسخ محلی بهره گرفته است. هر دو مرجع مذکور برای مسأله‌ی پخش کوتاه‌مدت طراحی شده‌اند که نیاز به مدل پیچیده‌ی شبکه گاز طبیعی با تخمین دقیق پارامترها دارند. از طرفی در مقایسه با تحقیقات اخیر [۹، ۱۲، ۳۹] مدل‌های غیرخطی پیچیده هستند و نیاز به زمان محاسباتی بالایی دارند؛ همچنین دستیابی به پاسخ بهینه سراسری تضمین نمی‌شود. بنابراین بر اساس زمان محاسباتی سریع مدل خطی پیشنهادی (در مقایسه با مدل غیرخطی) و دقت قابل قبول، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی رضایت‌بخش و کاربردی است.

جدول ۲: مقایسه متغیرها در مدل خطی و غیرخطی

	Nonlinear Model	Linear Model	Percent Deviation
Mean of pressure (pu)	۰/۹۴	۰/۹۴۱۳	۰/۱۳٪
Mean of voltage (pu)	۰/۹۷۹	۰/۹۸۲۸	۰/۳۸٪
Mean of angle (pu)	-۰/۰۰۷	-۰/۰۰۶۹۷	۰/۴۳٪

	Models	Case 1	Case 2	Case 3
Computation Time (s)	Nonlinear Linear	۷۳۱ ۲۴/۳	۷۶۴ ۲۵/۱	۸۴۸ ۳۱/۴
Investment Cost (\$)	Nonlinear Linear	۲۷۴۳۱۴۱ ۲۷۲۲۲۵۵	۳۷۰۸۰۹۳ ۳۶۱۶۵۸۲	۲۵۰۹۸۸۰ ۲۴۹۱۴۸۲
Operative Cost (\$)	Nonlinear Linear	۱۹۳۲۷۶۳ ۱۸۰۱۰۴۷	۷۴۰۹۶۴ ۷۱۹۰۲۱	۷۷۱۹۳۳ ۷۴۹۷۷۰

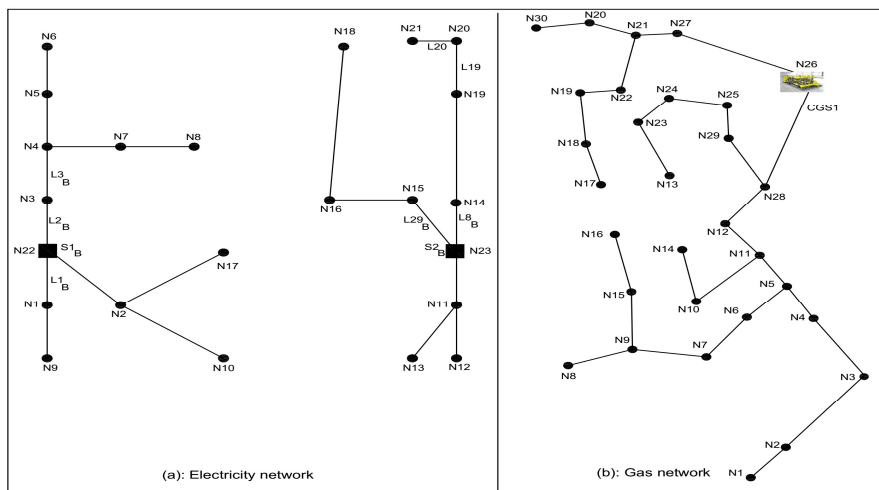
جدول ۳: مقایسه نتایج مدل خطی و غیرخطی

ب- مقایسه و بحث:

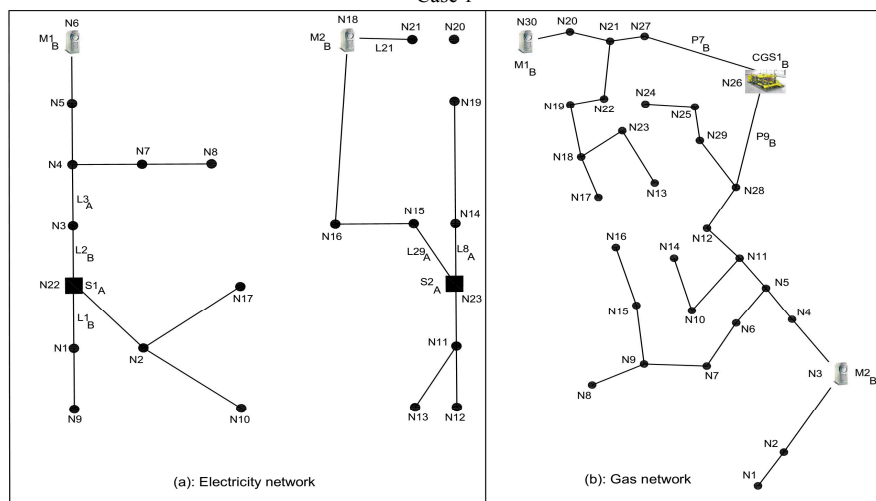
نتایج حاصل از سه مورد مطالعاتی از جهت هزینه سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و استفاده بهینه از ظرفیت‌های موجود دارایی‌های شبکه در این بخش مقایسه شده است. مطابق با نتایج جدول ۴، مورد ۳ یعنی برنامه‌ریزی یکپارچه دارای کمترین هزینه سرمایه‌گذاری توسعه و مورد ۱ دارای بیشترین هزینه توسعه است. از این جهت همان‌گونه که انتظار می‌رفت، مدل برنامه‌ریزی یکپارچه از سودمندی بالاتری برخوردار است.

شکل (۲) توپولوژی شبکه برق و گاز را برای سه مورد مطالعاتی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مورد ۱ با توجه به رشد بار و تأمین تقاضای نقاط جدید، ظرفیت پست‌های S1 و S2 (نوع A)

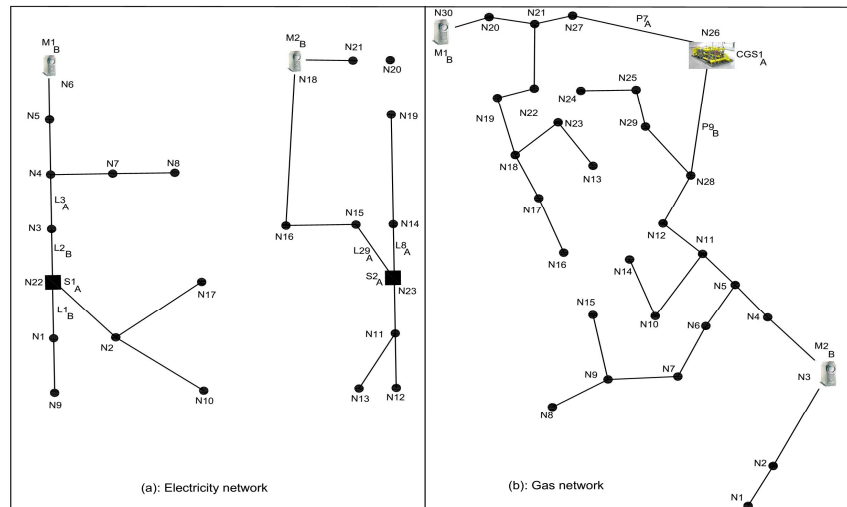
۳	۰	۱۴۴۸۴۰۶	۵۱۶۶۰۰	۰	۵۲۶۴۷۶
---	---	---------	--------	---	--------



Case 1



Case 2



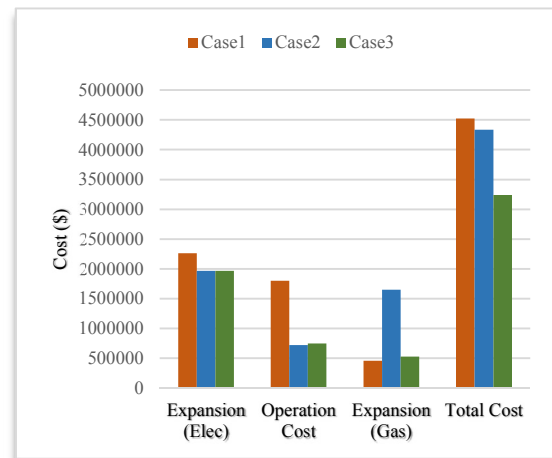
Case 3

شکل ۲: توپولوژی به‌دست‌آمده از توسعه شبکه‌های توزیع برق و گاز

شده است. از این جهت مورد ۳ به‌دلیل یکپارچگی شبکه و برنامه‌ریزی یکپارچه از نظر هزینه برنامه‌ریزی کلی هر دو شبکه دارای کمترین هزینه و مناسب‌ترین راه‌حل پیشنهادی در این مطالعه جهت برنامه‌ریزی توسعه شبکه برق و گاز می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدل‌سازی و برنامه‌ریزی توسعه یکپارچه شبکه‌های توزیع برق و گاز پرداخته شده است. در این مدل‌سازی معادلات کامل پخش بار هر دو شبکه جهت برنامه‌ریزی توسعه در نظر گرفته شده است و منابع تولید پراکنده گازی نیز به‌عنوان نقطه اشتراک دو شبکه مدل‌سازی شده است. در مقالات اخیر به‌دلیل ادغام دو شبکه و پیچیدگی محاسباتی، کمتر به برنامه‌ریزی توسعه همزمان پرداخته شده است. یکی از چالش‌های اساسی در این سیستم‌ها فرمول‌بندی غیرخطی و غیرمحدب و عدم تضمین پاسخ سراسری است. در این مقاله جهت رفع پیچیدگی محاسباتی و دستیابی به پاسخ بهینه سراسری یک مدل MILP جدید ارائه شده است. دقت خطی‌سازی پارامترها و نتایج حاصله با نتایج مدل غیرخطی مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان از دقت قابل‌قبول مدل ارائه شده است. علاوه بر این، روش خطی می‌تواند در مدت زمان محاسباتی کمتر نسبت به مدل غیرخطی به پاسخ بهینه دست یابد. برنامه‌ریزی توسعه پیشنهادی، زمان، مکان و نوع عناصر شبکه‌های توزیع برق و گاز را به‌صورت بهینه مشخص می‌نماید. از طرفی، برنامه‌ریزی همزمان شبکه‌های توزیع برق و گاز نسبت به برنامه‌ریزی مستقل مزایایی همچون کاهش هزینه‌های توسعه برای هر دو شبکه به‌همراه دارد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از کارآمدی روش پیشنهادی است. ضرورت مدل خطی و برنامه‌ریزی یکپارچه در شبکه‌های



شکل ۳: مقایسه هزینه توسعه و بهره‌برداری سه مورد مطالعاتی

بنابراین با توجه به توپولوژی‌های توسعه‌یافته و مطابق با نتایج عددی به‌دست‌آمده، نتایج زیر حاصل می‌شود. مطابق با شکل ۳ هزینه کلی توسعه شبکه برق (سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری) در مورد ۱ بیشترین مقدار و در مورد ۲ کمترین مقدار و همچنین هزینه توسعه شبکه گاز در مورد ۲ بیشترین مقدار و در مورد ۱ کمترین مقدار را در بین سه مورد مطالعاتی دارند. مشاهده می‌شود که مورد ۲ هزینه بهره‌برداری کمتری نسبت به مورد ۳ دارد. در واقع به‌دلیل این‌که شبکه توزیع برق در مورد ۲ نسبت به مورد ۳ توسعه کمتری داشته است، هزینه بهره‌برداری پایین‌تری نیز دارد. بنابراین با جمع‌بندی نتایج فوق به این نتیجه می‌رسیم که هر چند شبکه برق در مورد ۳ هزینه کلی توسعه و بهره‌برداری بالاتری نسبت به مورد ۲ داشته است، اما پایین‌بودن هزینه کلی توسعه شبکه گاز و نصب منابع DG کمتر در مورد ۳، باعث جبران افزایش هزینه توسعه برق

رابطه (۵۱)، Z برابر با g است و کران آن با توجه به رابطه (۵۲) رعایت می‌شود.

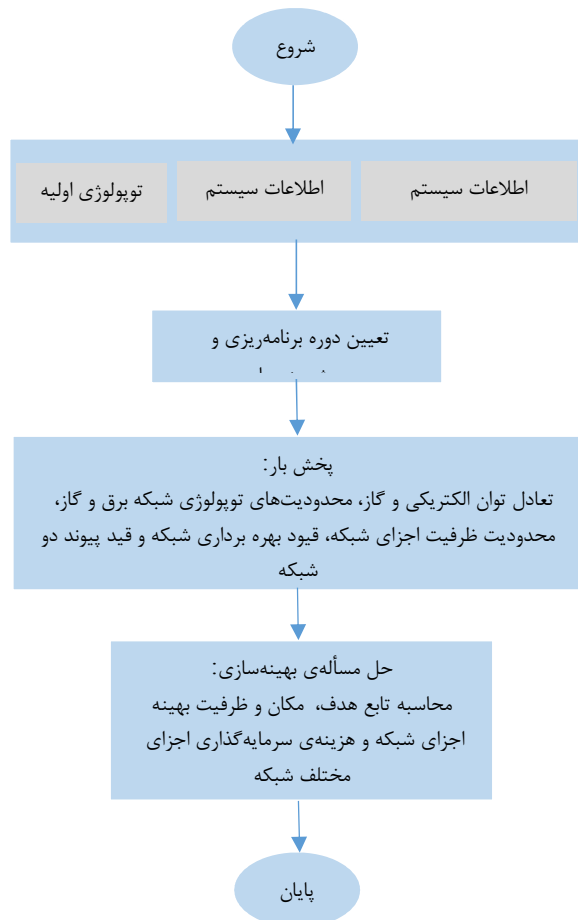
فهرست علائم

ولتاژ و زاویه ولتاژ	θ_i, V_i
اختلاف ولتاژ و زاویه ولتاژ	$\Delta\theta_i, \Delta V_i$
فشار گاز در گره n	P_n
ماتریس اتصال بین دو گره در شبکه گاز، الکتریکی	$A_{L_g}^e, A_{L_m}^g$
توان اکتیو و راکتیو خطوط	Q_L, P_L
رسانایی، سوسپانانس، امپدانس، مقاومت و طول خط	$L_{ij}, R_{ij}, Z_{ij}, B_{ij}, G_{ij}$
قیمت انرژی برق (سال)	EP_y
افق برنامه‌ریزی (سال)	NY
سطح بار (ساعت)	H_l
متغیر تصمیم‌گیری باینری نصب المان‌های جدید و توسعه ظرفیت المان‌های موجود	x_E, x_I
متغیر گسسته‌سازی	$\Delta(\bullet)_y$
شیب خط	S
متغیر کمکی در خطی سازی	$M_y^{P_{dg}}$
قید DG	M
عدد مثبت بزرگ	Ω_n, Ω_i
مجموعه گره‌های الکتریکی متصل به گره i ، گره‌های گازی متصل به گره n	$\Omega_{GM}, \Omega_E, \Omega_G$
مجموعه گره‌های گازی، گره‌های الکتریکی، گره‌های گازی با DG	$\Omega_{TS}, \Omega_{TF}, \Omega_{TM}, \Omega_{TGS}, \Omega_{TP}$
مجموعه انواع لوله‌های گاز، ایستگاه‌های گاز، DGها، فیدرها، پست‌های برق	$\Omega_S, \Omega_F, \Omega_{GS}, \Omega_P$
مجموعه لوله‌های گاز، ایستگاه‌های گاز، فیدرها، پست‌های برق نصب‌شده جدید و موجود	$\Omega_{E(\bullet)}, \Omega_{I(\bullet)}$
مجموعه المان‌های جدید، موجود	$(\bullet)_F, (\bullet)_{GS}, (\bullet)_P, (\bullet)_S$
لوله گاز، ایستگاه گاز، فیدرها، پست‌های برق	$(\bullet)^e, (\bullet)^g$
شبکه گاز، شبکه الکتریکی	$(\bullet)_{i,j}, (\bullet)_{n,m}$
شمارنده گره‌های گاز، برق	

مقیاس بزرگ بیشتر احساس می‌شود. این موضوع بر مبنای هاب انرژی و ایجاد یک بازار یکپارچه با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مناسب به‌عنوان کار بعدی ما در حال انجام است.

پیوست‌ها

فلوچارت رویکرد پیشنهادی در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۴: فلوچارت پیشنهادی

روش Big-M:

به‌صورت کلی جهت خطی‌سازی معادله (۵۰) می‌توان با استفاده از روش Big-M روابط (۵۱ و ۵۲) را جایگزین رابطه (۵۰) نمود. با توجه به معادله کلی زیر:

$$Z = g(x)y \quad (50)$$

$$-M(1-y) \leq Z - g \leq M(1-y) \quad (51)$$

$$-yZ^{\max} \leq Z \leq yZ^{\max} \quad (52)$$

در این روابط، M یک مقدار مثبت بزرگ و y متغیر باینری است. در صورتی که y برابر با صفر باشد در این صورت با توجه به معادله (۵۲)، Z برابر صفر است و در صورتی که y برابر ۱ باشد، مطابق با

- distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 6, pp. 899–911, Jun. 2009.
- [16] A. Sheikhi, M. Rayati and A. M. Ranjbar, "Energy Hub optimal sizing in the smart grid; machine learning approach," in 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), pp. 1–5, 2015.
- [17] X. Zhang, G. G. Karady and S. T. Ariaratnam, "Optimal Allocation of CHP-Based Distributed Generation on Urban Energy Distribution Networks," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 246–253, Jan. 2014.
- [18] M. Ahmadigorji and N. Amjadi, "Optimal dynamic expansion planning of distribution systems considering non-renewable distributed generation using a new heuristic double-stage optimization solution approach," *Appl. Energy*, vol. 156, pp. 655–665, 2015.
- [19] A. Soroudi, "Possibilistic-Scenario Model for DG Impact Assessment on Distribution Networks in an Uncertain Environment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1283–1293, Aug. 2012.
- [20] M. Esmaili, E. C. Firozjaee and H. A. Shayanfar, "Optimal placement of distributed generations considering voltage stability and power losses with observing voltage-related constraints," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1252–1260, 2014.
- [21] M. Shahidehpour, Yong Fu and T. Wiedman, "Impact of Natural Gas Infrastructure on Electric Power Systems," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 1042–1056, May 2005.
- [22] S. D. Manshadi and M. E. Khodayar, "A Tight Convex Relaxation for the Natural Gas Operation Problem," *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–1, 2018.
- [23] C. A. Saldarriaga, R. A. Hincapié and H. Salazar, "A Holistic Approach for Planning Natural Gas and Electricity Distribution Networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4052–4063, Nov. 2013.
- [24] Z. Li and Y. Xu, "Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes," *Appl. Energy*, vol. 210, no. August, pp. 974–986, 2018.
- [25] C. Liu, M. Shahidehpour and J. Wang, "Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow," *Chaos An Interdiscip. J. Nonlinear Sci.*, vol. 21, no. 2, pp. 1–12, Jun. 2011.
- [26] X. Zhang, G. G. Karady and S. T. Ariaratnam, "Optimal Allocation of CHP-Based Distributed Generation on Urban Energy Distribution Networks," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 246–253, Jan. 2014.

[۲۷] مجید حروفیانی، علی زنگنه و رضا قندهاری، «مدل چندهدفه

قیمت‌گذاری تزریق توان راکتیو منابع تولید پراکنده در شبکه

توزیع»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۳، جلد ۴۶،

صفحات ۱۵۹–۱۴۹، ۱۳۹۵.

- [28] V. Vahidinasab and S. Jadid, "Multiobjective environmental/techno-economic approach for strategic bidding in energy markets," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 4, pp. 496–504, 2009.

انواع فیدرها، پست‌های برق،

لوله‌های گاز، ایستگاه‌های گاز،

مقدار ماکزیمم و مینیمم

$$\begin{aligned} & \left(\bullet \right)_p, \left(\bullet \right)_s, \left(\bullet \right)_f \\ & \left(\bullet \right)_m, \left(\bullet \right)_g \\ & \left(\bullet \right), \left(\bullet \right) \end{aligned}$$

مراجع

- [1] X. Zhang, L. Che, M. Shahidehpour, A. S. Alabdulwahab and A. Abusorrah, "Reliability-Based Optimal Planning of Electricity and Natural Gas Interconnections for Multiple Energy Hubs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1658–1667, Jul. 2017.
- [2] A. Movahednasab, M. Rashidinejad and A. Abdollahi, "Dynamic Analysis of Natural Gas Role on Capacity Expansion in Power Market," *Int. J. Power Energy Syst.*, vol. 37, no. 1, 2017.
- [3] Annual Energy Outlook. [Online]. Available: <http://www.eia.gov>. 2014.
- [4] S. Bahrami and A. Sheikhi, "From Demand Response in Smart Grid Toward Integrated Demand Response in Smart Energy Hub," *IEEE Trans. Smart Grid*, pp. 1–1, 2015.
- [5] Kozulj R, "Documento de proyecto La participación de las fuentes renovables en la generación de energía eléctrica: inversiones y estrategias empresariales en América Latina y el Caribe," 2010. [Online]. Available: http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/5/41115/lc_w331e.pdf.
- [6] M. Chaudry, N. Jenkins, M. Qadrdan and J. Wu, "Combined gas and electricity network expansion planning," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1171–1187, 2014.
- [7] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-ivatloo, M. Hosseinzadeh, H. Yousefi and S. T. Khorasani, "Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, pp. 33–50, 2018.
- [8] A. Sheikhi, S. Bahrami and A. M. Ranjbar, "An autonomous demand response program for electricity and natural gas networks in smart energy hubs," *Energy*, vol. 89, pp. 490–499, 2015.
- [9] J. Qiu, Z. Y. Dong, J. H. Zhao, Y. Xu, C. Li and K. P. Wong, "Multi-Stage Flexible Expansion Co-Planning Under Uncertainties in a Combined Electricity and Gas Market," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 4, pp. 2119–2129, Jul. 2015.
- [10] C. Unsuhay-Vila, J. W. Marangon-Lima, A. C. Z. De Souza, I. J. Perez-Arriaga and P. P. Balestrassi, "A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of natural gas systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 1154–1168, 2010.
- [11] F. Barati, H. Seifi, M. S. Sepasian, A. Nateghi, M. Shafie-Khah and J. P. S. Catalao, "Multi-Period Integrated Framework of Generation, Transmission, and Natural Gas Grid Expansion Planning for Large-Scale Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2527–2537, 2015.
- [12] J. Qiu, Z. Y. Dong, J. H. Zhao, K. Meng, Y. Zheng and D. J. Hill, "Low Carbon Oriented Expansion Planning of Integrated Gas and Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 1035–1046, Mar. 2015.
- [13] A. Rieder, A. Christidis and G. Tsatsaronis, "Multi criteria dynamic design optimization of a small scale distributed energy system," *Energy*, vol. 74, pp. 230–239, Sep. 2014.
- [14] A. Sheikhi, M. Rayati, S. Bahrami and A. Mohammad Ranjbar, "Integrated Demand Side Management Game in Smart Energy Hubs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 675–683, Mar. 2015.
- [15] M. S. Nazar and M. R. Haghifam, "Multiobjective electric

- distribution pipeline network,” Appl. Math. Model., vol. 33, no. 3, pp. 1584–1600, Mar. 2009.
- [34] J.M. Campbell, The Equipment Modules. Gas Conditioning and Processing. Norman, Okla., 7 edition, 1992.
- [35] Australian Energy Market Operator (AEMO). [Online]. Available: <https://www.aemo.com.au/>.
- [36] S. P. Bradley, A. C. Hax and T. L. Magnanti, Applied mathematical programming. Addison-Wesley Pub. Co, 1977.
- [37] M. V. Pereira, S. Granville, M. H. C. Fampa, R. Dix and L. A. Barroso, “Strategic bidding under uncertainty: A binary expansion approach,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 1, pp. 180–188, 2005.
- [38] R. P. O’Neill, A. Castillo and M. B. Cain, “The IV formulation and linear approximations of the AC optimal power flow problem (OPF Paper 2),” FERC Staff Tech. Pap., no. December, pp. 1–18, 2012.
- [39] M. Geidl, G. Andersson, M. Geidl and G. Andersson, “Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 1, pp. 145–155, 2007.
- [40] C. Liu, M. Shahidehpour, Y. Fu and Z. Li, “Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, pp. 1523–1535, Aug. 2009.
- [۲۹] نرگس پرهیزی، موسی مرزبند، سیدمازیا میرحسینی مقدم، بهنام محمدی ایواتلو و فاطمه آذری‌نژادیان، «پایه‌سازی عملی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه متصل به شبکه سراسری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری چندبعدی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۱، جلد ۴۶، صفحات ۴۰–۲۵، ۱۳۹۵.
- [۳۰] محمدرضا کریمی، جمشید آقایی و امین رحیمی رضایی، «به‌کارگیری بهینه‌سازی استوار جهت مقابله با عدم قطعیت نیروگاه‌های بادی در برنامه‌ریزی توسعه تولید»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۲، جلد ۴۷، صفحات ۶۶۵–۶۷۶، ۱۳۹۶.
- [31] G. L. Nemhauser and L. A. Wolsey, Integer and combinatorial optimization. Wiley, 1999.
- [32] A. Kavousi-Fard, A. Zare and A. Khodaei, “Effective Dynamic Scheduling of Reconfigurable Microgrids,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 8950, no. c, pp. 1–1, 2018.
- [33] A. Herrán-González, J. M. De La Cruz, B. De Andrés-Toro and J. L. Risco-Martín, “Modeling and simulation of a gas

زیرنویس‌ها

³ Bernoulli equation

⁴ Independent system operator (ISO)

¹ Successive

² Newton loop-node method