

一种用于电-气互联系统运行优化的动态收缩凸松弛算法

陈雨薇¹, 项基¹, 李艳君²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙大城市学院 信息与电气工程学院, 浙江 杭州 310015)

摘要:提出了一种动态收缩凸松弛算法来解决电-气互联系统的运行优化问题。模型建立中,考虑了新能源与储能元件接入以及管存和气流方向等运行约束。所提算法利用了二阶锥松弛和凸包松弛的方法将非凸约束转换为凸约束,并通过动态收缩求解算法将电-气互联系统的运行优化问题转化为精确松弛域内的混合整数二阶规划问题加以求解。算例测试中,分别以修改的IEEE 39节点与IEEE 118节点电力系统和比利时20节点天然气系统组成的2个电-气互联系统为例,通过仿真验证了该算法有较佳的松弛精度和较快的计算速度。

关键词:电-气互联系统;二阶锥松弛;凸包松弛;动态收缩算法;混合整数规划

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202104018

0 引言

随着清洁能源及可持续能源的广泛应用,电力网络与天然气网络间的联系越来越紧密。与此同时,能源转换器件技术的飞速发展使得多种能源之间的协调运行成为可能^[1-2]。在电力网络和天然气网络的耦合运行中,启停灵活的燃气机组和将电力转换成天然气的设备的应用,提升了电力系统的灵活性,并提高了化石能源与可再生能源的利用效率。因此,在保证系统稳定安全运行的前提下,对电-气互联系统的能量流进行准确建模,对提升整个系统的经济性有着极其重要的意义^[3]。

在能源互联网的背景下,国内外许多学者针对电-气互联系统的建模与优化开展了一系列研究^[4-5]。文献[6]提出了采用近似线性化求解考虑天然气和电力网络特性及能量耦合约束的规划问题;文献[7]提出了采用遗传算法求解多能源网络规划问题;文献[8]提出了考虑不确定性的电-气网络规划的求解方法。在这些方法中,基于线性化的模型构造会因为忽略电力系统中的无功约束而造成求解中存在不可避免的误差;基于遗传算法等启发式算法进行求解会在计算中耗费大量的搜索时间和计算机存储空间。目前,绝大多数研究电-气互联系统优化的文献,包括上述文献[6-8]都没有考虑优化所得解是否

为全局最优解的问题。

为了获得全局最优解,很多学者将凸优化理论^[9]应用到能源系统的优化中。由于求解凸优化问题所得解一定是全局最优的,因此采用一定的松弛方法将模型表达成凸的形式备受青睐。针对本身非凸非线性的电-气互联系统的能流约束,一些基于凸松弛的模型被广泛研究。对于电网中的潮流,文献[10]提出了基于二阶锥松弛的模型,并证明了松弛的精确性。对于多时段的电网潮流优化,文献[11]提出了一种混合整数二阶锥规划的模型。二阶锥规划因为求解迅速,松弛的精确性可以得到保证,因而在电网潮流优化中被广泛应用。然而对于天然气网络中的气流模型,目前却鲜有精确松弛的凸模型表达形式:文献[12]提出了基于McCormick的凸包模型,但是松弛后求解域过大,所得到的最优解是松弛前问题的一个下界;文献[13]提出了基于半正定规划的气流模型,该松弛的精确性比较高,但是该模型忽略了运行中重要的管存约束,同时半定规划算法在系统矩阵比较庞大时,计算效率较低;文献[14]提出了基于二阶锥松弛规划的天然气网优化模型,该模型在求解上比半定规划速度快很多,但是该松弛下的求解域被进一步放大,二阶锥松弛难以确保精确,因此所得解的可行性值得商讨;为了使得所求解在松弛的边界上,文献[15]提出了一种基于凸凹规划的启发式算法,通过在求解中进行迭代完成泰勒近似,虽然该方法在迭代中使得最优解不断向边界靠近使其成为一个可行解,却难以保证其全局最优性。

为了寻求电-气互联系统优化的全局最优解,本文结合互联系统的实际特点,针对性地对网络中电-气能流约束进行建模,建立了以发电机和气源成本最低为目标的优化模型并提出了一种动态收缩算法寻求最优解。本文主要有以下创新点:①该优化模型同时考虑了具有新能源接入的电网运行约束及具

收稿日期:2020-09-02;**修回日期:**2021-01-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904800);国家自然科学基金资助项目(61773339,62073290);浙江省重点研发计划项目(2019C01150);浙江省自然科学基金资助项目(LY20F030003)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2018YFB0904800), the National Natural Science Foundation of China (61773339, 62073290), the Key R&D Program of Zhejiang Province (2019C011500) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY20F030003)

有管存和可变气流方向的气网约束,从而使之成为一个更加通用且适用于多种场合并符合实际的数学模型;②在模型的求解过程中,采用了二阶锥松弛和凸包松弛的方法将电-气互联系统优化模型进行紧的凸松弛处理,使之松弛为一个凸优化问题;③为了确保所求解的全局最优性,提出了一种新型动态收缩算法,该算法通过迭代收缩松弛域,实现了对可行域的动态遍历,同时通过对变量的定义域进行收缩处理,有效降低了松弛间隙。在2个由修改的IEEE 39节点和IEEE 118节点电力系统与比利时20节点天然气系统组成的电-气互联系统的算例上进行数值仿真,其结果表明了本文提出的模型及算法可以有效、正确地处理电-气互联系统的优化问题。

1 电-气互联系统的运行优化模型

电-气互联系统,顾名思义,由电力网络、天然气网络及其耦合网络组成。其中电转气装置和燃气机组组成了耦合网络,电转气装置可以实现将电能转换成天然气,燃气机组可以实现将天然气转换成电能。

本文的优化模型是基于电和气网络的运行约束,以发电机及气源总花费最低为目标的优化模型。在 $t \in T$ 时间段,该目标函数表示为:

$$\sum_{t \in T} \left(\sum_{i_g \in \Omega_E} C_{i_g}^E P_{i_g, t} + \sum_{r_s \in \Omega_G} C_{r_s}^G F_{r_s, t} \right) \quad (1)$$

其中, $P_{i_g, t}$ 、 $F_{r_s, t}$ 分别为发电机节点 i_g 、气源节点 r_s 的发电功率和购气流量; $C_{i_g}^E$ 、 $C_{r_s}^G$ 分别为发电机节点 i_g 和气源节点 r_s 的成本系数; Ω_E 、 Ω_G 分别为所有发电机节点、气源节点的集合。在该目标函数中,仅考虑发电及购气成本。对于电-气互联系统的运行约束,本文将其分为电力和天然气系统网内约束及电-气系统网间耦合约束3个部分。

下文所有约束均在 $t \in T$ 运行时间段内,同时上标 max、min 分别表示相应变量的上、下限。

1.1 电力系统运行约束

1.1.1 电力网络潮流约束

电压和电流功率关系为:

$$S_{ij, t} = U_{i, t} I_{ij, t}^*, I_{ij, t} = (U_{i, t} - U_{j, t}) Y_{ij} \quad (2)$$

其中, $S_{ij, t}$ 、 $I_{ij, t}$ 分别为线路 ij 的复功率和电流; Y_{ij} 为线路 ij 导纳; $U_{i, t}$ 、 $U_{j, t}$ 分别为节点 i 、 j 电压; 上标“*”表示共轭。

1.1.2 电压约束

每个节点的电压幅值的上下限均有相应约束,同时相邻节点的相角差需要在一定范围内,平衡节点的电压相角被设定为 0° 。

$$U_i^{\min} \leq U_{i, t} \leq U_i^{\max}, |\theta_{i, t} - \theta_{j, t}| \leq \theta_{ij}^{\max}, \theta_0 = 0^\circ \quad (3)$$

其中, $\theta_{i, t}$ 、 $\theta_{j, t}$ 分别为节点 i 、 j 的电压相角; $\theta_{ij}^{\max}$ 为节点 i 与节点 j 电压相角差的最大值; θ_0 为平衡节点的电压相角。

1.1.3 功率约束

根据节点的类型以及其所连接的器件的不同,可以将其视为负荷节点或发电节点。将功率约束分别从以下5个方面进行建模。

(1) 对于连接电负荷的负荷节点,有:

$$S_i^{\min} \leq S_{i, t}^c \leq S_i^{\max} \quad \forall i \in \Omega_{EL} \quad (4)$$

其中, $S_{i, t}^c$ 为负荷节点 i 的复功率; Ω_{EL} 为电网中负荷节点的集合。

(2) 对于连接电转气装置的节点,有:

$$P_p^{\min} \leq P_{p, t}^c \leq P_p^{\max} \quad \forall p \in \Omega_p \quad (5)$$

其中, $P_{p, t}^c$ 为电转气节点 p 的有功功率; Ω_p 为电转气节点的集合。

(3) 对于连接传统发电机的发电节点,有:

$$S_{i_g}^{\min} \leq S_{i_g, t} \leq S_{i_g}^{\max} \quad \forall i_g \in \Omega_E \quad (6)$$

其中, $S_{i_g, t}$ 为发电节点 i_g 的复功率。

(4) 对于电网中连接燃气机组的节点,有:

$$P_g^{\min} \leq P_{g, t} \leq P_g^{\max} \quad \forall g \in \Omega_{GF} \quad (7)$$

其中, $P_{g, t}$ 为连接燃气机组的节点 g 的有功功率; Ω_{GF} 为所有连接燃气机组节点的集合。

(5) 风机和光伏发电单元的建模是基于恒功率因数控制策略的。对于连接风机、光伏发电单元的发电节点,有:

$$\begin{cases} (1 - \alpha_{i_{wg}}) \tilde{S}_{i_{wg}, t} P_{i_{wg}}^{\max} \leq P_{i_{wg}, t} \leq \tilde{S}_{i_{wg}, t} P_{i_{wg}}^{\max} \\ Q_{i_{wg}, t} = P_{i_{wg}, t} \tan \delta_{i_{wg}, t} \end{cases} \quad \forall i_{wg} \in \Omega_{WT} \quad (8)$$

$$\begin{cases} (1 - \beta_{i_{pv}}) \tilde{S}_{i_{pv}, t} P_{i_{pv}}^{\max} \leq P_{i_{pv}, t} \leq \tilde{S}_{i_{pv}, t} P_{i_{pv}}^{\max} \\ Q_{i_{pv}, t} = P_{i_{pv}, t} \tan \delta_{i_{pv}, t} \end{cases} \quad \forall i_{pv} \in \Omega_{PV}$$

其中, $\alpha_{i_{wg}}$ 、 $\beta_{i_{pv}}$ 分别为连接风机的节点 i_{wg} 、连接光伏发电单元的节点 i_{pv} 的削减率; $\delta_{i_{wg}, t}$ 、 $\delta_{i_{pv}, t}$ 分别为连接风机的节点 i_{wg} 、连接光伏发电单元的节点 i_{pv} 的功率因数角; $\tilde{S}_{i_{wg}, t}$ 、 $\tilde{S}_{i_{pv}, t}$ 分别为连接风机的节点 i_{wg} 、连接光伏发电单元的节点 i_{pv} 的发电因子; $P_{i_{wg}, t}$ 、 $Q_{i_{wg}, t}$ 分别为连接风机的节点 i_{wg} 的有功功率、无功功率; $P_{i_{pv}, t}$ 、 $Q_{i_{pv}, t}$ 分别为连接光伏发电单元的节点 i_{pv} 的有功功率、无功功率; Ω_{WT} 、 Ω_{PV} 分别为连接风机、光伏发电单元的节点的集合。

(6) 对于连接储能的节点,有:

$$\begin{cases} z_{s, t}^d + z_{s, t}^{\text{ch}} \leq 1 \\ S_{s, t}^{g/c} = S_{s, t-1}^{g/c} + P_s^{\text{ch}} \ell^{\text{ch}} \delta_t^{\text{ch}} - P_s^d \ell^d \delta_t^d \\ 0 \leq P_{s, t}^d \leq P_s^{\text{dmax}} z_{s, t}^d \\ 0 \leq P_{s, t}^{\text{ch}} \leq P_s^{\text{chmax}} z_{s, t}^{\text{ch}} \end{cases} \quad \forall s \in \Omega_{ES} \quad (9)$$

其中, $z_{s, t}^{\text{ch}}$ 、 $z_{s, t}^d$ 为二进制变量, $z_{s, t}^{\text{ch}} = 1$ 时表征储能 s 处于

充电过程, $z_{s,t}^d = 1$ 时表征储能 s 处于放电过程; $S_{s,t}^{g/c}$ 为储能 s 的充放电功率; $P_s^{\text{ch}}, P_s^{\text{d}}$ 分别为储能 s 的充、放电有功功率; $\ell^{\text{ch}}, \ell^{\text{d}}$ 分别为充、放电效率; $\delta_t^{\text{ch}}, \delta_t^{\text{d}}$ 分别为充、放电时间; Ω_{ES} 为所有连接储能节点的集合。

1.1.4 运行约束

对于线路有功和无功功率, 根据其线路的功率限制, 约束如下:

$$|P_{ij,t}| \leq P_{ij}^{\max}, |Q_{ij,t}| \leq Q_{ij}^{\max} \quad \forall ij \in \Omega_E^e \quad (10)$$

其中, $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$ 分别为线路 ij 上的有功功率和无功功率; Ω_E^e 为电力系统中所有线路的集合。

1.1.5 能量守恒约束

$$S_{i,t} = \sum_{ij \in \Omega_E^e} S_{ij,t} = \sum_{\forall i \in \Omega_{\text{EL}}, \forall i_g \in \Omega_E} S_{i_g,t} - S_{i,t}^c \quad (11)$$

其中, $S_{i,t}$ 为节点 i 的复功率。该能量守恒约束了有功功率及无功功率的平衡。

1.2 天然气网络运行约束

天然气网络主要由气源、加压器、负荷、储气元件组成。

1.2.1 天然气气流约束

$$\bar{F}_{mn,t} = \phi_{mn} \left(\sqrt{|\pi_{m,t} - \pi_{n,t}|} - 2z_{mn} \sqrt{|\pi_{m,t} - \pi_{n,t}|} \right) \quad (12)$$

其中, $\bar{F}_{mn,t}$ 为管道 mn 的平均气流, 采用 Weymouth 气流方程描述平均气流; ϕ_{mn} 为管道 mn 气流的传输参数, 该参数与管道长度、管道直径和温度有关, 对于特定管道其为定值; $\pi_{m,t}, \pi_{n,t}$ 分别为节点 m, n 的压强; z_{mn} 为表征管道 mn 气流传输方向的二进制变量。若 $\pi_{m,t} > \pi_{n,t}$, 则 $z_{mn} = 0$; 若 $\pi_{m,t} < \pi_{n,t}$, 则 $z_{mn} = 1$ 。对于长期规划优化问题, 需要考虑气流的方向; 对于短期优化问题, 由于气流方向不会改变, 在模型中常被固定。为了使提出的模型不失一般性, 本文对气流方向不加以固定。

对于气流和压强, 有如下相应的运行约束:

$$\begin{cases} \bar{F}_{mn,t} = \frac{1}{2} (F_{mn,t} - F_{nm,t}) \\ F_{mn}^{\min} \leq F_{mn,t}, F_{nm,t} \leq F_{mn}^{\max} \\ \pi_m^{\min} \leq \pi_{m,t} \leq \pi_m^{\max} \end{cases} \quad \forall m, n \in \Omega_N^g; mn \in \Omega_L^g \quad (13)$$

其中, $F_{mn,t}, F_{nm,t}$ 分别为从节点 m 传输到节点 n 、从节点 n 传输到节点 m 的气流; Ω_N^g, Ω_L^g 分别为天然气网络中节点、管道的集合。

1.2.2 天然气管存约束

在运行优化时, 管存是必须考虑的因素。

$$\begin{cases} L_{mn,t} = \frac{1}{2} k_{mn} (\pi_{m,t} + \pi_{n,t}) \\ \delta_t^g (F_{mn,t} + F_{nm,t}) = L_{mn,t} - L_{mn,t-1} \\ \sum L(mn, T) \geq L^{\min} \end{cases} \quad \forall m, n \in \Omega_N^g; mn \in \Omega_L^g \quad (14)$$

其中, $L_{mn,t}$ 为管道 mn 的管存; k_{mn} 为管道 mn 的管存系数; δ_t^g 为时间间隔; $\sum L(mn, T)$ 为时段 T 内管道 mn 的管存之和。

1.2.3 加压器约束

$$\begin{cases} F_{w_c,t} \ell_w = F_{w_{cc},t}, 0 \leq F_{w_c,t} \leq F_{w_c,t}^{\max} \\ \xi_w^{\min} \pi_{w,t}^{\text{in}} \leq \pi_{w,t}^{\text{out}} \leq \xi_w^{\max} \pi_{w,t}^{\text{in}} \end{cases} \quad \forall w, w_c, w_{cc} \in \Omega_{\text{GC}} \quad (15)$$

其中, ℓ_w, ξ_w 分别为加压器 w 的转换率、转换效率; $F_{w_c,t}, F_{w_{cc},t}$ 分别为节点 w_c 输入加压器 w 的气流、节点 w_{cc} 通过加压器 w 的输出气流; $\pi_{w,t}^{\text{in}}, \pi_{w,t}^{\text{out}}$ 分别为流入、流出加压器 w 的气流压强; Ω_{GC} 为加压器节点的集合。

1.2.4 气源和负荷约束

$$\begin{cases} F_{r_s}^{\min} \leq F_{r_s,t} \leq F_{r_s}^{\max} \\ F_{h_p,t}^{\min} \leq F_{h_p,t} \leq F_{h_p,t}^{\max} \end{cases} \quad \forall r_s \in \Omega_G, h_p \in \Omega_{\text{GL}} \quad (16)$$

其中, $F_{r_s,t}, F_{h_p,t}$ 分别为流过气源节点 r_s 、负荷节点 h_p 的气流; Ω_{GL} 为负荷节点集合。

1.2.5 储气约束

$$\begin{cases} F_{g_s}^{\min} \leq F_{g_s,t} \leq F_{g_s}^{\max} \\ G_{g_s}^{\min} \leq G_{g_s,t} \leq G_{g_s}^{\max} \\ G_{g_s,t} = G_{g_s,t-1} + F_{g_s,t} \end{cases} \quad \forall g_s \in \Omega_{\text{GSC}} \quad (17)$$

其中, $F_{g_s,t}$ 为注入到储气节点 g_s 的气流; $G_{g_s,t}$ 为储气节点 g_s 流出的气流; Ω_{GSC} 为储气节点集合。

1.2.6 天然气平衡约束

对于天然气管道, 所有流出气流与流入气流应相等, 则有:

$$\sum_{r_s \in \Omega_G} F_{r_s,t} - \sum_{h_p \in \Omega_{\text{GL}}} F_{h_p,t} - \sum_{w_{cc} \in \Omega_{\text{GC}}} F_{w_{cc},t} + \sum_{g_s \in \Omega_{\text{GSC}}} F_{g_s,t} + \sum_{mn \in \Omega_L^g} \bar{F}_{mn,t} = 0 \quad (18)$$

1.3 电-气耦合约束

1.3.1 电-气连接元件约束

对于耦合电网和气网的电转气元件和燃气机组, 根据能量关系可得:

$$F_{q,t} \tilde{t}_q = P_{g,t}, F_{o,t} = P_{p,t} \tilde{\tau}_o \quad o \in \Omega_{\text{PTG}}; q \in \Omega_{\text{GSC}} \quad (19)$$

其中, $F_{q,t}, F_{o,t}$ 分别为流过燃气机组 q 、电转气设备 o 的气流; $\tilde{t}_q, \tilde{\tau}_o$ 分别为燃气机组 q 、电转气设备 o 的转换效率; Ω_{PTG} 为连接电转气节点集合。

1.3.2 能量流约束

当考虑网路连接后, 气流平衡方程式 (18) 变为:

$$\begin{aligned} \sum_{h_p \in \Omega_{\text{GL}}} F_{h_p,t} + \sum_{w_{cc} \in \Omega_{\text{GC}}} F_{w_{cc},t} + \sum_{mn \in \Omega_L^g} \bar{F}_{mn,t} + \sum_{q \in \Omega_{\text{GSC}}} F_{q,t} = \\ \sum_{r_s \in \Omega_G} F_{r_s,t} + \sum_{o \in \Omega_{\text{PTG}}} F_{o,t} + F_{g_s,t} \end{aligned} \quad (20)$$

1.4 电-气互联系统的优化模型

本文的电-气互联系统的优化模型如式 (21) 所示。

$$\begin{cases} \min \text{ 式(1)} \\ \text{s.t. 式(2)---(11)、(12)---(17)、(19)、(20)} \end{cases} \quad (21)$$

由于电网中的潮流(满足基尔霍夫定律)约束式(2)和气网中的气流(满足Weymouth定律)约束式(12)使得该优化问题是一个非凸非线性的优化问题。对于这样的优化问题,只能通过启发式算法或者局部求解器获取相关的局部最优解。

2 电-气互联系统动态收缩凸松弛算法

2.1 凸松弛

为了获得全局最优解,首先将模型进行凸松弛。因此在约束式(2)、(12)中引入锥松弛和凸包松弛。

对于电力系统中的潮流约束,根据文献[14]提及的节点注入潮流模型进行改进,即引入节点电压的平方,并定义 $W_i = U_i^2$ 、 $W_j = U_j^2$,同时定义节点电压乘积 $W_{ij} = U_i U_j^*$ 。因此,潮流约束式(2)可改写为:

$$\begin{cases} S_{ij,t} = Y_{ij}^* W_i - Y_{ij}^* W_j \\ S_{ji,t} = Y_{ij}^* W_j - Y_{ij}^* W_i \end{cases} \quad (22)$$

新定义的变量之间存在如下二阶关系:

$$W_{ij}^2 = W_i W_j \quad (23)$$

为了将该约束凸化引入二阶锥松弛,将式(23)变为:

$$\left\| \begin{matrix} 2W_{ij} \\ W_i - W_j \end{matrix} \right\| \leq W_i + W_j \quad (24)$$

因此式(3)中对电压的约束相应地变为:

$$(U_i^{\min})^2 \leq W_i \leq (U_i^{\max})^2 \quad (25)$$

通过二阶锥松弛,式(2)、(3)将重新改写为式(22)、(24)、(25),从而将非凸潮流变成一个凸的约束。

对于气流平衡方程,由于气流方向的定义,通过引入逻辑变量将式(12)写成如下析取规划形式:

$$\left[\begin{matrix} z_{mn,t}^+ \\ \bar{F}_{mn,t}^2 = \phi_{mn}(\pi_{m,t}^2 - \pi_{n,t}^2) \end{matrix} \right] \vee \left[\begin{matrix} z_{mn,t}^- \\ \bar{F}_{mn,t}^2 = \phi_{mn}(\pi_{n,t}^2 - \pi_{m,t}^2) \end{matrix} \right] \quad (26)$$

其中, $z_{mn,t}^+$ 、 $z_{mn,t}^-$ 为二进制变量, $z_{mn,t}^+ = 1$ 时对应于管道的气流传输方向为从节点 m 到 n , $z_{mn,t}^- = 1$ 时对应于管道的气流传输方向为从节点 n 到 m ;" $\vee$ "表示析取逻辑符。

引入二阶锥松弛可以将式(26)变为:

$$\left[\begin{matrix} z_{mn,t}^+ \\ \left\| \begin{matrix} \bar{F}_{mn,t} \\ \sqrt{\phi_{mn}} \end{matrix} \right\| \leq \pi_{m,t} \\ \pi_{n,t} \end{matrix} \right] \vee \left[\begin{matrix} z_{mn,t}^- \\ \left\| \begin{matrix} \bar{F}_{mn,t} \\ \sqrt{\phi_{mn}} \end{matrix} \right\| \leq \pi_{n,t} \\ \pi_{m,t} \end{matrix} \right] \quad (27)$$

为了将式(27)进一步松弛成凸的形式,采用凸包松弛。凸包松弛主要目的是将2个分离的析取区域用最小的凸区域包围起来,从而变为一个整体。

引入向量 $X_{mn,t}$,其组成元素为 $\bar{F}_{mn,t}$ 、 $\pi_{m,t}$ 、 $\pi_{n,t}$ 。引入函数 $f(X_{mn,t}) \leq 0$ 表示二阶锥关系。对于元素的取

值范围将其整合在向量中,即分别用向量 $X_{mn}^{\max}$ 、 $X_{mn}^{\min}$ 表示所有元素上、下限的集合。因此采用凸包松弛后,式(27)可描述为:

$$\begin{cases} X_{mn,t} = X_{1mn,t} + X_{2mn,t} \\ z_{mn,t}^+ X_{mn}^{\min} \leq X_{1mn,t} \leq z_{mn,t}^+ X_{mn}^{\max} \\ z_{mn,t}^- X_{mn}^{\min} \leq X_{2mn,t} \leq z_{mn,t}^- X_{mn}^{\max} \\ f(X_{mn,t}) \leq 0 \end{cases} \quad (28)$$

其中, $X_{1mn,t}$ 、 $X_{2mn,t}$ 分别为2个分离析取区域变量所组成的向量。采用凸包松弛后,当 $z_{mn,t}^+ = 1$ 时, $X_{mn,t}$ 将由 $X_{1mn,t}$ 决定;当 $z_{mn,t}^- = 1$ 时, $X_{mn,t}$ 将由 $X_{2mn,t}$ 决定。因此,原优化问题(式(21))被松弛后变为:

$$\begin{cases} \min \text{ 式(1)} \\ \text{s.t. 式(4)---(11)、(13)---(17)、(19)、} \\ \quad (20)、(22)、(24)、(25)、(28) \end{cases} \quad (29)$$

2.2 动态收缩可行域算法

将优化问题(式(29))简写为:

$$\begin{cases} \min F(Y) \\ \text{s.t. } G(Y) = 0, H(Y) \leq 0 \end{cases} \quad (30)$$

其中, Y 为由该优化问题中相关变量组成的向量; $G(Y)$ 为所有等式约束; $H(Y)$ 为所有不等式约束。值得注意的是,经过2.1节中的凸松弛数学变换, $G(Y)$ 为仿射的, $H(Y)$ 为凸的。

采用内点法等局部优化法求解式(21),求得初始解 (Y_0, F_0) 。通过求解凸优化问题(式(30)),获得最优解,记为 (Y_1, F_1) 。在松弛域内, Y 被上下界 $Y_{\min}$ 和 $Y_{\max}$ 约束。因此,可行域被不等分为3个区域。分别在这3个区域内求解优化问题(式(30)),可得到3个新的最优解。通过比较选出这3个最优解中最优的解,并保留其所在求解区域。在该求解区域内,基于最优的求解域进行缩小求解。通过式(31)缩小 Y 的上下界。

$$\begin{cases} \min / \max Y \\ \text{s.t. } G(Y) = 0, H(Y) \leq 0 \\ F_0 \leq F(Y) \leq F_1 \end{cases} \quad (31)$$

由于 F_0 是局部最优解, F_1 是松弛后的解,因此 $F_0 \leq F(Y) \leq F_1$,引入该约束确保了每次收缩的有效性。通过式(31),可以求得 Y 新的上下界,根据新的范围重复上述分区求解,若区域无法继续细分,则判断松弛的间隙是否满足要求,若满足则停止分区,反之则选取之前被废弃的最大区域重复上述分区优化过程。同时,在迭代中,记录每次最优值 F_{obj} 并不断更新,将约束 $F_0 \leq F(Y) \leq F_1$ 变为约束 $F_{\text{obj}} \leq F(Y) \leq F_1$ 写入 $H(Y)$ 中。

该方法原理共分为以下2步:第一步,通过分区完成区域内优化;第二步,在特定区域进行变量范围收缩完成区域间优化。即通过对大的松弛的求解域

进行分区再逐步缩小,同时在每一步缩小中保证向最优的方向进行。经过这样的反复迭代,可行域被逐步收缩,从而获得优化问题(式(21))的全局最优解。

以式(27)中 $z_{mn,t}^+ = 1$ 的Weymouth等式约束二阶锥松弛为例,该算法的迭代过程如图1所示。

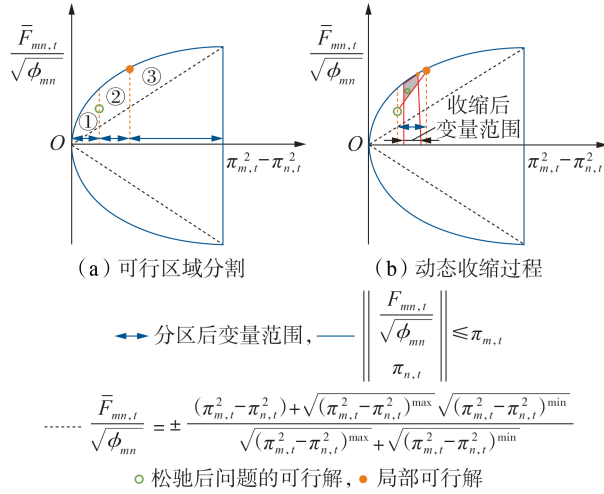


图1 以Weymouth等式约束为例的动态收缩算法示意图

Fig.1 Schematic diagram of dynamic-tightened algorithm taking Weymouth equality constraints as example

由图1(a)可知, $z_{mn,t}^+ = 1$ 时,根据局部可行解和松弛问题的最优解,将松弛求解区域分为①—③这三个部分。根据寻优比较,选中区域②。对区域②进行求解域缩小,如图1(b)中灰色区域所示。在灰色区域中重复分区求解,便可结束可行域的缩小进程,同时求得最优解。变量的范围在分区缩小过程中逐渐被缩小,同时松弛求解域也逐渐缩小并靠近松弛边界。该算法的创新之处在于提出了一种减小松弛间隙的方法,实现了对定义域的分区处理,同时对变量的范围进行了处理。通过2步处理即可更快地使得松弛间隙得到有效的降低。该算法寻优的具体流程图如图2所示。

3 仿真分析

本文以修改的IEEE 39节点与IEEE 118节点电力系统^[16]和比利时20节点天然气系统^[17]组成的电-气互联系统为例,验证上述模型及算法的有效性,其中IEEE 39节点电力系统和比利时20节点天然气系统组成的电-气互联系统(简称IEEE 39-20系统)拓扑如附录中图A1所示。在修改的电力系统中增加了2台风机、1个光伏发电单元、2个气源、2个储气单元,其余机组和负荷情况保持不变。本文选取典型的24 h中发电和负荷情况作为仿真样本,其中光伏、风电出力以及天然气和电负荷情况如图3所示。图中,功率为标么值。

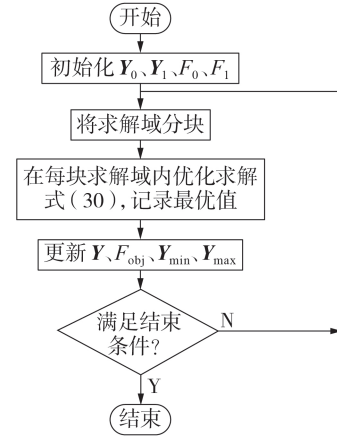
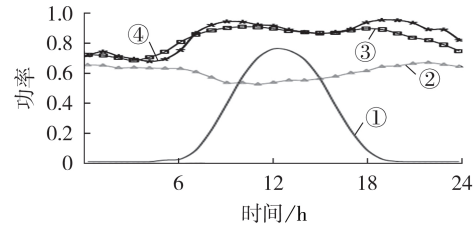


图2 动态收缩可行域算法流程图

Fig.2 Flowchart of dynamic-tightened feasible region algorithm



① 光伏出力, ② 风电出力, ③ 电力负荷, ④ 天然气负荷

图3 光伏、风电出力以及天然气和电负荷曲线

Fig.3 Curves of photovoltaic power, wind power, gas load and electricity load

设定电转气设备转换效率为0.7,最大出力为150 MW;燃气机组转换效率为0.85,最大出力为200 MW。将上文建立的松弛模型通过Yalmip^[18]写入MATLAB中,在迭代过程通过CPLEX^[19]进行凸优化求解。求解后得到互联系统电能和天然气流量的运行优化结果如附录中图A2所示。图中纵坐标数值大于0表示产生能量,小于0表示消耗能量。通过优化计算得到,IEEE 39-20系统的发电机和气源总花费为\$154 329,其中电力成本为\$57 321,天然气成本为\$97 008。

为了验证松弛的精确性,在每次迭代中记录电力系统支路潮流的松弛(式(24)与天然气系统中的气流松弛间隙(式(28)))。将间隙取绝对值相加后求平均得到平均间隙。首先采用本文提出的动态收缩算法,得到迭代过程中能量流的平均间隙变化如图4所示。

从图4可知,在迭代过程中,松弛域的收缩导致能流的松弛趋向精确。在电力系统中,经过7次以内迭代,其松弛可认定为精确;而在天然气系统中,其初始的松弛间隙较大,经过15次左右迭代,松弛间隙接近为0,从而使得松弛精确。因此,采用所提方法可以有效地降低松弛间隙。

同时采用空间分支定界法基于模型(式(29))进

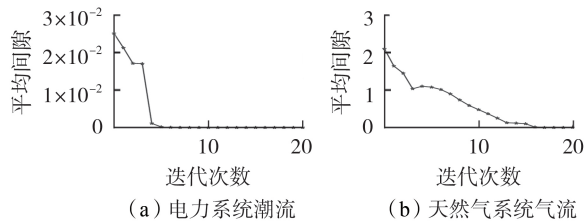


图 4 采用动态松弛算法的能量流松弛后的平均间隙

Fig.4 Average gap after energy flow relaxation by dynamic-tightened algorithm

行迭代求解,能量流的平均间隙变化如图 5 所示。

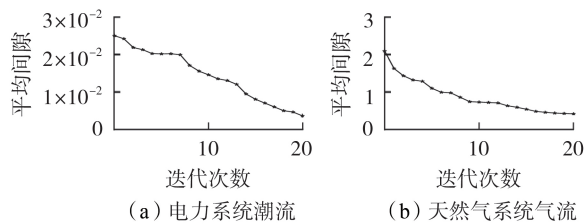


图 5 采用空间分支定界算法能量流松弛后的平均间隙

Fig.5 Average gap after energy flow relaxation by spatial branch and bound algorithm

从图 5 可知,采用空间分支定界算法时,在迭代过程中,能流的松弛间隙会逐渐减小但是很难趋向精确。在电力系统中,经过 20 次迭代,其松弛间隙依旧在 0.005 左右;而在天然气系统中,经过 20 次迭代,这个松弛间隙降低至 0.4 左右,并无法达到松弛精确。因此,采用分支定界法并不能降低气流平衡松弛间隙。

通过对比图 4 和图 5 可知,采用动态松弛算法可以有效地加快迭代速度,采用更少的迭代次数并可使松弛达到精确。

将互联系统松弛后凸优化模型(式(29))初始化后采用本文所提方法进行优化求解,将松弛前非凸模型(式(21))采用商业求解器 Baron 进行求解。通过进行 100 次求解,并将求解时间及最优值取平均可知:动态松弛计算时间为 9.74 s,Baron 为 16.89 s;动态松弛所求最优值为 \$654 329,Baron 为 \$659 375。因此,本文所提方法的求解速度更快,所得解更优。由于模型(式(29))是一个凸的模型,因此其在求解时降低了计算机对约束的处理;而模型(式(21))作为一个非凸非线性模型,在计算时需要调用大量运算而延长了处理时间。在求解过程中,本文提出的动态收缩方法是对全局解的一种搜寻,同时在迭代中根据前一次的最优解,可以将求解区域更快、更科学地进行分割。而面对非凸问题,求解器只能寻求到一个局部最优解,并且这个局部最优解是大于等于全局最优解的。该结果对比从计算效率和结果角度体现了所提算法的优越性。追求更快、更好地求出优化解也是该算法的原动力之一。

同时,针对该系统,采用分段线性化方法进行求

解,得到不同分段数下该系统的仿真结果见表 1。

表 1 分段线性化求解方法下的仿真结果对比

Table 1 Comparison of simulative results under piecewise linearization method

分段数	平均能流间隙	优化值 / \$	计算时间 / s
6	0.08	654 431	3.11
8	0.06	654 430	4.00
20	0.03	653 999	7.94
40	0.014 2	653 964	15.27

从表 1 可以看出,当分段数比较小(分段数为 6 或 8)时,该方法计算速度较快但是平均能流间隙误差大于 5%;当分段数变多时,求解速度显著降低,但是平均能流间隙减小。与动态凸松弛方法相比,该方法下优化值略大,平均能流间隙较大。

本文采用由修改的 IEEE 118 节点电力系统与比利时 20 节点天然气系统组成的电-气互联系统(简称 IEEE 118-20 系统)进行仿真实验。在修改的 IEEE 118 节点系统中,其燃气机组、风机、光伏发电单元所在节点及数量与修改的 IEEE 39 节点保持一致。该系统共有 51 台传统发电机、3 台燃气机组、2 台风机、1 个光伏发电单元,其余负荷参数保持不变。在修改的比利时 20 节点天然气系统中有 2 个气源、2 个储气单元。

由于该算法分为 2 步,分别为分区优化和区域内更改变量范围进行优化,因此,在仿真中做 4 组对比实验:实验 1 是在松弛求解域内仅分区优化;实验 2 是在松弛求解域内仅更改变量范围进行优化;实验 3 是采用本文所提算法即 2 步优化共同进行;实验 4 是采用商业求解器 Baron 进行求解。其仿真结果对比见表 2。

表 2 IEEE 118-20 系统优化仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulative results for IEEE 118-20 system

实验	平均能流间隙	优化值 / \$	计算时间 / s
1	2.03	1 870 923	12.23
2	1.92	1 923 491	16.32
3	0.000 04	1 945 130	24.26
4	—	1 965 129	57.29

由表 2 可知,单独进行实验 1 和 2 其平均能流间隙较大,即所求解为松弛问题的优化解。而采用动态松弛法可以有效地降低松弛间隙从而获得原问题的可行解。在计算时间上,虽然实验 3 所用的时间小于实验 1、2 时间的和却达到了更好的实验效果。比较实验 3、4 知,动态松弛法计算速度更快,当系统规模变大时,运算效率的优势更明显。

根据以上一系列仿真实验可知,本文提出的动态凸松弛方法可以有效地应用于电-气互联系统中。同时根据与空间分支定界算法和商业求解器 Baron

的求解结果对比可知,该方法提高了松弛后所得结果的精度,加快了计算速度。与分步优化仿真实验结果对比可知,将2步优化组合为本文所提方法,可以有效地降低松弛间隙,提高优化计算的准确性。

4 结论

本文针对电-气互联系统运行优化中需要考虑的运行约束进行建模,提出了以发电机及气源总花费最低为目标的优化模型。同时,基于该模型提出了一种动态收缩凸松弛算法。该算法将非凸约束进行紧的松弛数学处理,以克服非凸非线性约束在优化求解中的困难。通过所提松弛方法可将模型转换为混合整数二阶锥松弛规划模型,易于获得全局最优解。通过对修改的IEEE 39节点与IEEE 118节点电力系统和比利时20节点天然气系统组成的电-气互联系统进行建模与求解,说明了所提方法的可行性、高效性和精确性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3292-3305.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305.
- [2] 王璟,王利利,林济铿,等. 能源互联网结构形态及技术支撑体系研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):1-10.
WANG Jing, WANG Lili, LIN Jikeng, et al. Energy internet morphology and its technical support system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 1-10.
- [3] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.
DU Lin, SUN Liang, SUN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.
- [4] 程浩忠,胡泉,王莉,等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):2-13.
CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 2-13.
- [5] 黄子硕,何桂雄,闫华光,等. 园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):10-18.
HUANG Zishuo, HE Guixiong, YAN Huagang, et al. Overview and prospect of optimization model function for community-scale integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 10-18.
- [6] QIU J, YANG H, DONG Z Y, et al. A linear programming approach to expansion co-planning in gas and electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3594-3606.
- [7] ALIEHYAEI M, YAZDI B A, EHYAEI M A, et al. Optimization of micro combined heat and power gas turbine by genetic algorithm[J]. Thermal Science, 2015, 19(1): 207-218.
- [8] 张思德,胡伟,卫志农,等. 基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统随机最优潮流[J]. 电力自动化设备,2018,38(9): 121-128.
- [9] ZHANG Side, HU Wei, WEI Zhinong, et al. Stochastic optimal power flow of integrated power and gas energy system based on chance-constrained programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 121-128.
- [10] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 207-273.
- [11] CHEN Y, XIANG J, LI Y. SOCP relaxations of optimal power flow problem considering current margins in radial networks[J]. Energies, 2018, 11: 3164-3181.
- [12] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2575-2583.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [13] SANCHEZ C B, BENT R, BACKHAUS S, et al. Convex relaxations for gas expansion planning[J]. Inform Journal on Computing, 2016, 28(4): 645-656.
- [14] MANSHADI S D, KHODAYAR M E. A tight convex relaxation for the natural gas operation problem[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5467-5469.
- [15] SANCHEZ C B, BENT R, BACKHAUS S, et al. Convex optimization for joint expansion planning of natural gas and power systems[C]//2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences(HICSS). Hawaii, USA: IEEE, 2016: 2536-2545.
- [16] HE Y, YAN M, SHAHIDEHPOUR M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity-natural gas flows based on cone reformulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4531-4542.
- [17] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2012: 26-60.
- [18] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3347-3355.
- [19] LÖFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China: IEEE, 2004: 284-289.
- [20] SHINANO Y, TETSUYA F, CAPPELLO F, et al. ParaLEX: a parallel extension for the CPLEX mixed integer optimizer[C]//European Conference on Recent Advances in Parallel Virtual Machine and Message Passing Interface. Paris, France: Springer-Verlag, 2007: 97-106.

作者简介:



陈雨薇

陈雨薇(1994—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,研究方向为电力系统与综合能源系统运行优化(E-mail: chenyuwei@zju.edu.cn);

项基(1975—),男,浙江温州人,教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为电网控制优化与稳定性分析(E-mail: jxiang@zju.edu.cn);

李艳君(1973—),女,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为微电网控制与优化(E-mail: liyanjun@zucc.edu.cn)。

(编辑 李玮)

(下转第21页 continued on page 21)

Optimal operation of electricity-heating integrated energy system based on stochastic economic model predictive control

LIU Yuqi^{1,2,3}, ZANG Chuanzhi^{1,2,3}, WANG Yue⁴, LIU Ding^{1,3,5}, ZENG Peng^{1,3}, HU Bo⁶

- (1. Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;
4. Liaoning Lightning Protection Technical Service Center, Shenyang 110010, China;
5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
6. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: In the northern heating area, there are a large number of combined heat and power units, of which the operating characteristics of “power determined by heat” restrict the peak load regulation capacity of these units. At the same time, with the proposal of energy substitution and the increasing penetration of wind power in China, the establishment of an electricity-heating integrated energy system including wind power is an important means to reduce the electricity-heating coupling and operating cost of system. Therefore, the model of the electricity-heating integrated energy system is developed. On the basis of satisfying consumers’ demand for both electric and heating, the stochastic economic model predictive control strategy is proposed, which considers the wind power uncertainty and the operating cost during the dynamic process of system. Specifically, an improved nonlinear transformation method is proposed to establish a non-Gaussian distribution model of wind power, which can reduce the impact of intermittent wind power production and the difficulty of accurately representing the variability of wind power. Moreover, an explicit expression structure that describes the variation of wind power based on scenario tree structure is established, which ensures the robustness of algorithm and reduces the impact of wind power variability. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is verified by the compound single-step growth rate index of cumulative cost saving.

Key words: electricity-heating integrated energy system; stochastic economic model predictive control; scenario tree structure; wind power; non-Gaussian distribution model

(上接第 13 页 continued from page 13)

Dynamic-tightened convex relaxation algorithm of operation optimization for integrated electricity and natural gas system

CHEN Yuwei¹, XIANG Ji¹, LI Yanjun²

- (1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. School of Information and Electrical Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China)

Abstract: A dynamic-tightened convex relaxation algorithm is proposed to solve the operation model of an integrated electricity and natural gas system. The proposed model considers the operating constraints of renewable energy and storage in the power system and the operating constraints of the line-pack and gas flow directions. The proposed model employs second-order cone relaxation and convex hull relaxation to convexify the non-convex natural gas flow model. Using the dynamic-tightened algorithm, the operation model becomes a mixed-integer second-order cone programming problem in the constructed relaxed solution region. Computational results of two test systems, which are composed of modified IEEE 39-bus and IEEE 118-bus power system and Belgium 20-node natural gas system, verify the accuracy, feasibility and efficiency of the proposed algorithm.

Key words: integrated electricity and natural gas system; second-order cone relaxation; convex hull relaxation; dynamic-tightened algorithm; mixed-integer programming

附录

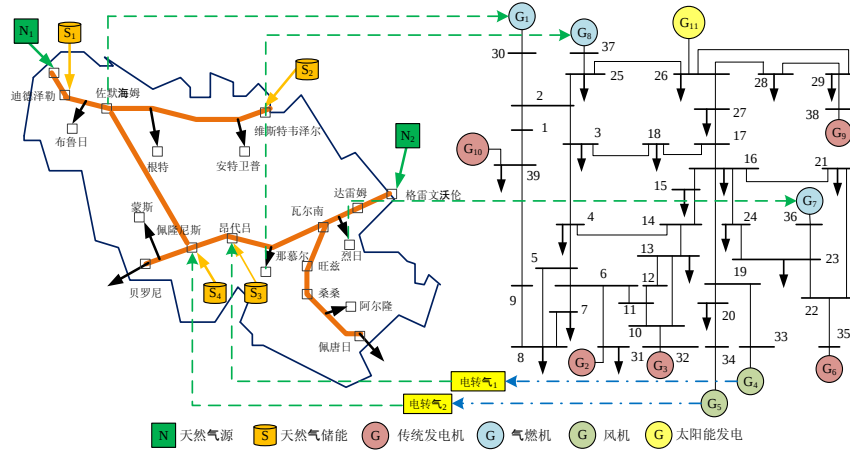


图 A1 39 节点电力系统-20 节点天然气系统的互联结构
Fig.A1 Integrated structure of 39-bus power system and 20-node natural gas system

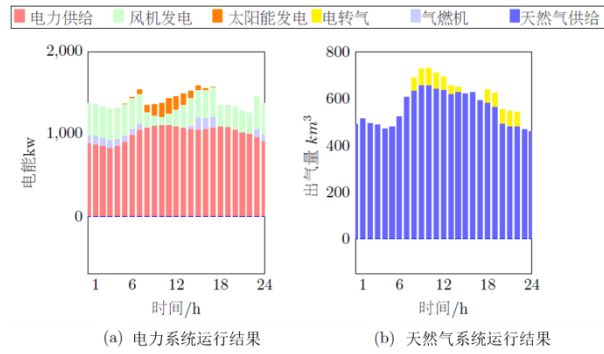


图 A2 运行优化后电力、天然气的出力分布
Fig.A2 Operation optimization results of generated power flow and gas flow