

考虑管存动态特性的电-气-热综合能源系统 低碳经济调度

周晟锐,刘继春,张浩禹,文杰

(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:电转气(P2G)和热电联产机组(CHP)作为综合能源系统耦合元件,是实现清洁低碳电力的重要途径。基于此,从P2G和CHP的协同机理着手,建立了考虑气管网储能特性的电-气-热互联综合能源日前调度模型。模型目标函数以日前调度成本、弃风成本和污染物治理成本之和最小,并计及了电网、气网约束条件,重点关注天然气系统管网的储气空间,以挖掘其管存动态特性。针对模型存在的非线性约束,采用二阶锥松弛和分段线性化将模型转化为混合整数凸优化问题进行求解。通过一个IEEE33节点电网和比利时20节点天然气网耦合的综合能源系统进行算例分析,结果验证了P2G和CHP的联合调度可以提升综合能源系统多项性能,管网动态特性对系统经济性具有积极作用。

关键词:电-气-热互联综合能源系统;管存动态模型;线性化方法;低碳经济调度

中图分类号:TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21213

Low-carbon Economic Dispatch of Electric-Gas-Heat Integrated Energy System Considering Dynamic Characteristics of Storage

ZHOU Shengrui, LIU Jichun, ZHANG Haoyu, WEN Jie

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: As the coupling units in the integrated energy systems, power to gas(P2G) and combined heat and power(CHP) units are important ways to realize clean and low-carbon power system. In this respect, starting with analyzing the synergetic mechanism of power to gas and combined heat and power, a day-ahead dispatch model for electricity-gas-heat integrated energy system considering storage characteristic of pipeline was proposed. This model sets the minimum sum of cost of day-ahead dispatch, wind shedding, and pollutant treatment as the target function, electricity and gas network constraints were also included in this model, the gas storage of pipeline was concerned to excavate the dynamic characteristic of pipeline storage. In the light of the nonlinear constraints, the second order cone relaxation and piecewise linearization were adopted to transform this model into a mixed integer convex optimization. An integrated energy system coupled with IEEE33-nodes power system and Belgium20-nodes natural-gas system was employed for analog simulation. Results show that the joint dispatch of P2G and CHP can promote multiple performances of integrated energy system, and the dynamic characteristic of pipeline storage can increase the economy of the system.

Key words: integrated electricity-gas-heat energy system; dynamic characteristic of pipeline storage; linearization method; low-carbon economic dispatch

大力发展风电等可再生能源逐渐成为解决化石能源耗竭危机的重要途径。风电规模日益扩大,但其间歇性出力特性带来了严峻的消纳问题,2017年全年平均弃风率高达16%,其中最

严重的甘肃省高达40%。综合能源系统概念的提出为消纳风电提供了新思路,天然气、热能等新的能源形式是实现弃风消纳的重要媒介^[1-3]。

电转气(power to gas, P2G)和热电联产机组

作者简介:周晟锐(1995—),男,硕士研究生,Email:452030553@qq.com

通讯作者:刘继春(1975—),男,博士,教授,Email:jichunliu@scu.edu.cn

(combined heat and power, CHP)作为能源转化的核心元件,可以有效实现电网和气网的深度耦合。文献[4]利用CHP和P2G将电力系统和天然气系统耦合,分析研究不同P2G过程对电网、气网的影响;文献[5]在模型中考虑了P2G的运行成本和碳原料成本,利用多目标优化方法协调风电消纳和经济成本的矛盾关系;文献[6]寻求热电解耦CHP的建模方法,与P2G的联合调度有利于提升系统经济性;文献[7]利用P2G和燃气轮机平抑净负荷峰谷差,提升系统风电消纳水平和经济性。利用P2G和CHP的协同合作,在谷荷时段消纳大量风电,峰荷时段弥补电能空缺,以天然气作为媒介实现源荷协调。

此外,P2G和CHP的引入势必会对电网、气网的潮流产生影响,上述文献均以瞬态建模的方式考虑电网、气网潮流约束和安全约束。但实际上,随着研究的不断深入,天然气传输慢特性的描述受到人们的重视。文献[8-9]建立考虑了天然气缓慢传输特性的电-气互联综合能源系统优化问题,对不同时间尺度天然气流进行详细描述。如何对天然气管存动态特性具体建模,并分析其对气网经济调度产生的影响将是关键问题。其次,为处理气网潮流非线性约束,文献[9-10]采用二阶锥松弛的方法对气网潮流边界条件进行线性化,但固定潮流方向的前提条件不适用于环状天然气网络。合理选择分段数,分段线性化能高效快速求解气网调度问题。

综上所述,本文建立了考虑气网管存动态特性的综合能源系统低碳经济调度模型。模型重点探讨了P2G和CHP的协同合作与管存动态特性对综合能源系统经济、环境、弃风消纳等多个方面的影响。考虑气网电网约束条件,并采用二阶锥松弛和分段线性化方法将模型转化为凸优化问题进行求解。在一个典型算例中进行仿真,结果分析了管存动态特性对调度结果的影响,验证了模型的有效性。

1 电-气-热互联综合能源系统结构

1.1 综合能源系统结构

设计的电-气-热互联综合能源系统如图1所示,其中能源转化元件主要包括P2G,CHP和燃气锅炉。P2G可以将电网多余电能转化为天然气注入天然气管网,天然气管网利用管存特性储存多余的天然气。CHP在峰荷时段再利用管存天然气

产生电能缓解负荷高峰压力,P2G和CHP的协调调度以天然气为媒介,一定程度上解决了风电反调峰特性带来的源荷不匹配问题。

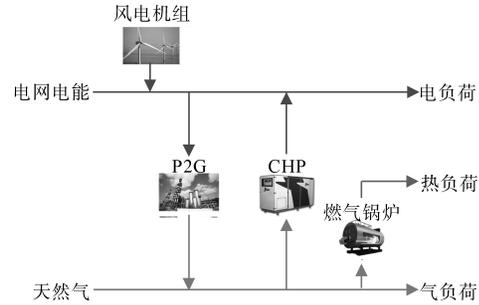


图1 综合能源系统结构

Fig.1 Structure of integrated energy system

1.2 P2G模型

电转气过程分为两个步骤:P2G将电网多余电能通过电解水产生大量氢气,再利用产生的氢气与二氧化碳在高温高压催化剂的条件下产生甲烷。通过两阶段的化学反应,将电能转化为天然气,其综合效率约为60%。具体的能源转化模型为^[11]

$$\varphi_{P2G,i,t} = \eta_{P2G} P_{P2G,i,t} / HGV \quad (1)$$

$$P_{P2G,i,\min} \leq P_{P2G,i,t} \leq P_{P2G,i,\max} \quad (2)$$

式中: $P_{P2G,i,t}$, $\varphi_{P2G,i,t}$ 分别为第*i*个P2G在*t*时段的输入电功率和天然气产量; η_{P2G} 为电转气的效率; $P_{P2G,i,\max}$, $P_{P2G,i,\min}$ 分别为第*i*个P2G输入电功率上、下限; HGV 为天然气高热值,取 $9.88 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

1.3 CHP模型

CHP通过燃气同时供给电能和热能,是一种较为清洁的供能方式,其电出力和热出力存在较为明显的耦合关系,具体表示为

$$P_{CHP,i,t}^e = \eta_{CHP}^e \varphi_{CHP,i,t} \cdot HGV \quad (3)$$

$$P_{CHP,i,t}^h = \eta_{CHP}^h \varphi_{CHP,i,t} \cdot HGV \quad (4)$$

$$0 \leq P_{CHP,i,t}^e \leq P_{CHP,i,\max} \quad (5)$$

式中: $P_{CHP,i,t}^e$, $P_{CHP,i,t}^h$, $\varphi_{CHP,i,t}$ 分别为第*i*个CHP在*t*时段的发电功率、产热功率和输入天然气流量; η_{CHP}^e , η_{CHP}^h 分别为CHP的电效率和热效率; $P_{CHP,i,\max}$ 为第*i*个CHP的发电功率上限。

1.4 燃气锅炉模型

除CHP外,燃气锅炉是另一种通过燃气供给热负荷的方式,用于弥补热能不足^[12],其能源转化模型为

$$P_{GB,i,t}^h = \varphi_{GB,i,t} \eta_{GB} \cdot HGV \quad (6)$$

$$0 \leq P_{GB,i,t}^h \leq P_{GB,i,\max}^h \quad (7)$$

式中: $P_{GB,i,t}^h$, $\varphi_{GB,i,t}$ 分别为第*i*个燃气锅炉在*t*时段的产热功率和输入天然气流量; η_{GB} 为燃气锅炉

的产热效率; $P_{GB,i,max}^h$ 为第*i*个燃气锅炉的产热功率上限。

2 综合能源系统的低碳经济调度模型

2.1 目标函数

目标函数中包含了分布式电源发电成本、变电站购电成本、弃风成本、天然气购买成本、污染物治理成本^[13]和P2G运行成本,如下式:

$$F = \min(C_1 + C_2 + C_3) \quad (8)$$

其中

$$C_1 = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_{bc}} [a_i P_{DG,i,t}^2 + b_i P_{DG,i,t} + c_i I_{DG,i,t}] + \sum_{k=1}^{N_s} \lambda_s P_{S,k,t} + \sum_{p=1}^{N_w} (P_{W,p,t}^{pre} - P_{W,p,t}) + \sum_{j=1}^{N_m} g_j \varphi_{N,j,t} \right\}$$

$$C_2 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_{bc}} P_{DG,i,t} \delta_{DG} + \sum_{i=1}^{N_{gb}} P_{GB,i,t}^h \delta_{GB} + \sum_{i=1}^{N_{chp}} P_{CHP,i,t}^e \delta_{CHP} \right)$$

$$C_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{p2g}} \lambda_{P2G} P_{P2G,i,t}$$

式中: C_1 为分布式电源运行成本、耗气成本和弃风成本总和; C_2 为污染物治理成本,其主要包括分布式电源和燃气锅炉及CHP产生的污染物; C_3 为P2G运行成本; T 为调度总时段,取24 h; N_{bc} , N_s , N_w , N_m , N_{gb} , N_{chp} , N_{p2g} 分别为分布式电源、变电站、风电机组、气源、燃气锅炉、CHP和P2G的个数; a_i , b_i , c_i 为第*i*个分布式电源的成本系数; $P_{DG,i,t}$ 为第*i*台火电机组在*t*时段的有功出力; $I_{DG,i,t}$ 为第*i*台分布式电源在时段*t*的开停机状态,为1表示开机,为0表示关机; g_j 为第*j*个天然气源的成本系数; $P_{W,p,t}^{pre}$ 为第*p*个风电机组在*t*时段的预测出力; $P_{W,p,t}$ 为第*p*个风电机组在*t*时段的实际出力; $\varphi_{N,j,t}$ 为第*j*个气源在*t*时段的天然气出力; λ_s 为变电站购电成本系数; $P_{S,k,t}$ 为第*k*个变电站在*t*时段的变电站有功出力; λ_{P2G} 为P2G的运行成本系数; δ_{DG} , δ_{GB} , δ_{CHP} 分别为分布式电源、燃气锅炉和CHP的单位污染物治理成本。

2.2 约束条件

文中综合能源系统的低碳经济调度模型约束条件包含:电网约束条件、气网约束条件和热能平衡约束,暂未考虑热能的传输过程和热量损耗。

2.2.1 电网约束条件

1)平衡条件如下式:

$$P_{S,i,t} + P_{DG,i,t} + P_{W,i,t} + P_{CHP,i,t}^e = P_{P2G,i,t} + P_{L,i,t} + P_{i,t} \quad (9)$$

$$Q_{S,i,t} + Q_{DG,i,t} = Q_{L,i,t} + Q_{i,t} \quad (10)$$

式中: $P_{i,t}$, $Q_{i,t}$ 分别为第*i*个节点在*t*时段的有功、无功注入功率; $P_{L,i,t}$, $Q_{L,i,t}$ 分别为*i*节点在*t*时段的有功、无功负荷; $P_{S,i,t}$, $P_{W,i,t}$ 分别为与节点*i*相连的变电站和风电在*t*时段的有功出力; $Q_{S,i,t}$, $Q_{DG,i,t}$ 分别为与节点*i*相连的变电站和分布式电源在*t*时段的无功出力。

2)潮流约束条件为

$$P_{j,t} = \sum_{k \in s(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \zeta(j)} (P_{ij,t} - r_{ij} I_{ij,t}^2) + g_j V_{j,t}^2 \quad (11)$$

$$Q_{j,t} = \sum_{k \in s(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \zeta(j)} (Q_{ij,t} - x_{ij} I_{ij,t}^2) + b_j V_{j,t}^2 \quad (12)$$

$$V_{j,t}^2 = V_{i,t}^2 - 2(P_{ij,t} r_{ij} + Q_{ij,t} x_{ij}) + I_{ij,t}^2 (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (13)$$

其中

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} \quad (14)$$

$$I_{ij,\min} \leq I_{ij,t} \leq I_{ij,\max} \quad (15)$$

$$V_{j,\min} \leq V_{j,t} \leq V_{j,\max} \quad (16)$$

$$P_{ij,\min} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,\max} \quad (17)$$

$$Q_{ij,\min} \leq Q_{ij,t} \leq Q_{ij,\max} \quad (18)$$

式中: r_{ij} , x_{ij} 分别为支路*ij*的电阻值和电抗值; g_j , b_j 分别为节点*j*的电导和电纳; $I_{ij,t}$ 为支路*ij*在*t*时段的电流; $V_{j,t}$ 为节点*j*在*t*时段的电压; $P_{ij,t}$, $Q_{ij,t}$ 分别为支路*ij*在*t*时段的有功、无功功率; $P_{jk,t}$, $Q_{jk,t}$ 分别为支路*jk*在*t*时段的有功、无功功率; $s(j)$ 为以节点*j*为首节点的支路集合; $\zeta(j)$ 为以节点*j*为末节点的支路集合; $I_{ij,\max}$, $I_{ij,\min}$ 分别为支路*ij*的电流上、下限; $V_{j,\max}$, $V_{j,\min}$ 分别为节点*j*的电压上、下限; $P_{ij,\max}$, $P_{ij,\min}$ 分别为支路*ij*的有功功率上、下限; $Q_{ij,\max}$, $Q_{ij,\min}$ 分别为支路*ij*的无功功率上、下限。

3)电源出力约束条件为

$$P_{S,i,\min} \leq P_{S,i,t} \leq P_{S,i,\max} \quad (19)$$

$$Q_{S,i,\min} \leq Q_{S,i,t} \leq Q_{S,i,\max} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{W,i,t} \leq P_{W,i,t}^{pre} \quad (21)$$

$$P_{DG,i,\min} I_{DG,i,t} \leq P_{DG,i,t} \leq P_{DG,i,\max} I_{DG,i,t} \quad (22)$$

$$Q_{DG,i,\min} I_{DG,i,t} \leq Q_{DG,i,t} \leq Q_{DG,i,\max} I_{DG,i,t} \quad (23)$$

$$\begin{cases} P_{DG,i,t} - P_{DG,i,t-1} \geq R_i^D \\ P_{DG,i,t} - P_{DG,i,t-1} \leq R_i^U \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{S,i,\max}$, $P_{S,i,\min}$ 分别为第*i*个变电站的有功出力上、下限; $Q_{S,i,\max}$, $Q_{S,i,\min}$ 分别为第*i*个变电站的无功出力上、下限; $P_{DG,i,\max}$, $P_{DG,i,\min}$ 分别为第*i*个分布式电源的有功出力上、下限; $Q_{DG,i,\max}$, $Q_{DG,i,\min}$ 分别为第*i*个分布式电源的无功出力上、下限; R_i^U , R_i^D 分别为第*i*个分布式电源的爬坡、滑坡上限。

2.2.2 气网约束条件

1)管存。由于天然气传输速度较慢且具备压缩性,天然气管道本身的储存空间可以将其储

存并为天然气系统调度提供缓冲。实际上,任意管道的注入流量和输出流量可以不同,其差值表现为在管道内存储天然气或利用已有的储存量。天然气动态管存特性可以有效实现P2G出力和天然气负荷的平移和削峰填谷,平抑其不确定性波动。管存建模与储能系统类似,管存并不直接提供或消耗天然气,为合理调度需将一个调度周末的管存还原为初始值。具体数学模型如下:

$$M_{ij,t} = M_{ij,t-1} + \varphi_{ij,t}^{\text{in}} - \varphi_{ij,t}^{\text{out}} \quad (25)$$

$$0 \leq M_{ij,t} \leq M_{ij,\text{max}} \quad (26)$$

$$\bar{\pi}_{ij,t} = (\pi_{i,t} + \pi_{j,t})/2 \quad (27)$$

$$\sum_{ij \in IG} M_{ij,0} = \sum_{ij \in IG} M_{ij,T} \quad (28)$$

式中: $M_{ij,t}$ 为管道 ij 在 t 时段的存储量; $\varphi_{ij,t}^{\text{in}}, \varphi_{ij,t}^{\text{out}}$ 分别为管道 ij 在 t 时段的注入和流出的流量; $\pi_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时段的气压; $\bar{\pi}_{ij,t}$ 为管道 ij 在 t 时段的平均气压; IG 为所有天然气管道的集合。

2)气源约束条件为

$$0 \leq \varphi_{N,i,t} \leq \varphi_{N,i,\text{max}} \quad (29)$$

式中: $\varphi_{N,i,\text{max}}$ 为第 i 个气源的天然气出力上限。

3)平衡条件为

$$\varphi_{N,i,t} + \varphi_{P2G,i,t} - \varphi_{L,i,t} = \sum_{j \in U_j \neq i} (\varphi_{ij,t}^{\text{in}} - \varphi_{ij,t}^{\text{out}}) + \varphi_{\text{CHP},i,t} \quad (30)$$

式中: $\varphi_{ij,t}^{\text{in}}$ 为从节点 i 流入管道 ij 的流量; $\varphi_{ij,t}^{\text{out}}$ 为从管道 ij 流入节点 j 的流量; $\varphi_{L,i,t}$ 为节点 i 在 t 时段的气负荷。

4)潮流约束。为实现天然气系统安全运行,流过管道的平均流量和两端的气压具有耦合关系,如下式:

$$\bar{\varphi}_{ij,t} \left| \bar{\varphi}_{ij,t} \right| = K_{ij}^2 (\pi_{i,t}^2 - \pi_{j,t}^2) \quad (31)$$

其中 $\bar{\varphi}_{ij,t} = (\varphi_{ij,t}^{\text{in}} + \varphi_{ij,t}^{\text{out}})/2$

式中: $\bar{\varphi}_{ij,t}$ 为在 t 时段流经管道 ij 的平均流量; K_{ij} 为管道 ij 的Weymouth常数。

2.3 供热约束

模型中热负荷的供应由CHP和燃气锅炉共同实现,为简化模型暂不考虑热能传输约束和损耗^[6]:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{GB}}} P_{\text{GB},i,t} + \sum_{i=1}^{N_{\text{CHP}}} P_{\text{CHP},i,t} = P_{L,t}^{\text{h}} \quad (32)$$

式中: $P_{L,t}^{\text{h}}$ 为系统 t 时段的热负荷。

2.4 线性化过程

2.4.1 二阶锥松弛

利用二阶锥松弛技术对电网潮流边界条件线性化处理,首先定义辅助变量 $\tilde{I}_{ij,t} = I_{ij,t}^2, \tilde{V}_{j,t} = V_{j,t}^2$,

并用 $\tilde{I}_{ij,t}, \tilde{V}_{j,t}$ 替换掉式(11)~式(18)中的电流、电压平方项。其中式(14)将被转化为

$$\tilde{I}_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{\tilde{V}_{j,t}} \quad (33)$$

可以对式(33)进行二阶锥松弛转化^[14],具体过程为

$$\tilde{I}_{ij,t} \geq (P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2)/\tilde{V}_{j,t} \quad (34)$$

$$(\tilde{I}_{ij,t} + \tilde{V}_{j,t})^2 - (\tilde{I}_{ij,t} - \tilde{V}_{j,t})^2 \geq 4P_{ij,t}^2 + 4Q_{ij,t}^2 \quad (35)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{V}_{j,t} \end{matrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{V}_{j,t} \quad (36)$$

2.4.2 分段线性化

文中采用分段线性化处理气网潮流边界条件,令 $f(\bar{\varphi}_{ij,t}) = \bar{\varphi}_{ij,t} \left| \bar{\varphi}_{ij,t} \right|, g(\pi_{i,t}) = \pi_{i,t}^2$ 。利用分段线性化可以将它们表示为

$$f(\bar{\varphi}_{ij,t}) = \sum_{k \in \zeta} (x_{ij,k,t} \bar{\varphi}_{ij,t} + y_{ij,k,t} \tau_{ij,k,t}) \quad (37)$$

$$g(\pi_{i,t}) = \sum_{k \in \zeta} (m_{i,k,t} \pi_{i,k,t} + n_{i,k,t} \theta_{i,k,t}) \quad (38)$$

式中: $x_{ij,k,t}, y_{ij,k,t}$ 分别为管道 ij 的天然气流量函数被分段线性化在第 k 段对应的斜率和截距; $m_{i,k,t}, n_{i,k,t}$ 分别为气网节点 i 的气压函数被分段线性化在第 k 段对应的斜率和截距; ζ 为分段总数,为协调线性化精度和计算速度,均取4段; $\tau_{ij,k,t}, \theta_{i,k,t}$ 为辅助变量,取值0~1。

具体的分段线性化图例如图2所示。

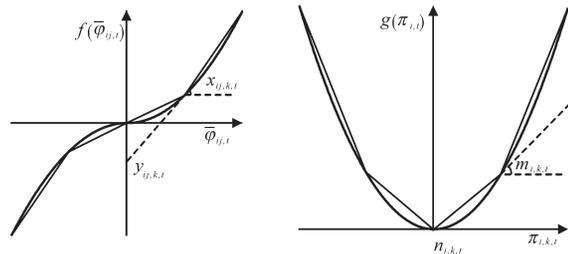


图2 分段线性化图例

Fig.2 Figure of piecewise linearization

此时,式(31)被转化为

$$f(\bar{\varphi}_{ij,t}) = K_{ij}^2 [g(\pi_{i,t}) - g(\pi_{j,t})] \quad (39)$$

限定管道流量和气压在同一时段只能选择唯一的分段数:

$$\tau_{ij,k,t} \varphi_{ij,k,\text{min}} \leq \bar{\varphi}_{ij,t} \leq \tau_{ij,k,t} \varphi_{ij,k,\text{max}} \quad (40)$$

$$\theta_{i,k,t} \pi_{i,k,\text{min}} \leq \pi_{i,t} \leq \theta_{i,k,t} \pi_{i,k,\text{max}} \quad (41)$$

$$\begin{cases} \sum_{k \in \zeta} \bar{\varphi}_{ij,k,t} = \bar{\varphi}_{ij,t} \\ \sum_{k \in \zeta} \pi_{i,k,t} = \pi_{i,t} \end{cases} \quad (42)$$

$$\begin{cases} \sum_{k \in \zeta} \tau_{ij,k,d} = 1 \\ \sum_{k \in \zeta} \theta_{i,k,d} = 1 \end{cases} \quad (43)$$

式中: $\varphi_{ij,k,max}$, $\varphi_{ij,k,min}$ 分别为管道 ij 在第 k 段对应的天然气流量上、下限; $\pi_{i,k,max}$, $\pi_{i,k,min}$ 分别为气网节点 i 在第 k 段对应的气压上、下限。

3 算例分析

算例系统由标准 IEEE33 节点电网和比利时 20 节点气网耦合组成。电网中唯一变电站位于 1 节点,有功和无功出力上限分别为 3 MW 和 3 Mvar。两个风电机组分别位于 5 和 8 节点,其装机容量分别为 2.5 MW 和 3 MW。两个分布式电源分别位于 6 和 14 节点,有功出力上限分别为 1 MW 和 1.5 MW。IEEE33 节点电网结构如图 3 所示。

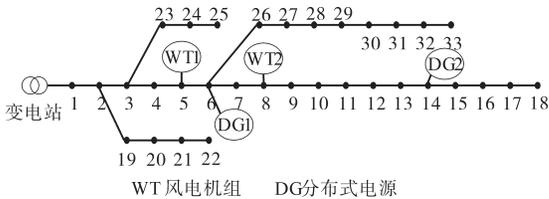


图3 IEEE33节点电网结构

Fig.3 Structure of IEEE33-nodes power system

比利时 20 节点系统结构和数据详见文献 [15],电-气-热互联综合能源系统耦合元件数据如表 1 所示。

表1 耦合元件参数

Tab.1 Parameters of coupling units

设备	功率上限/MW	电网节点	气网节点	效率
P2G	0.55	5	16	0.6
	0.75	8	20	0.6
CHP	0.8	6	3	0.6/0.4
	0.8	13	5	0.6/0.4
燃气锅炉	0.5	-	10	0.5
	0.4	-	15	0.55

为验证 P2G 和 CHP 的协调调度作用,设置 3 个场景:

场景 1:模型中不考虑 P2G,考虑 CHP;

场景 2:模型中不考虑 CHP,考虑 P2G;

场景 3:模型中既含 CHP 也含 P2G。

3 个不同场景下的综合成本、发电成本、污染物治理成本和弃风成本具体如表 2 所示,不同场景下各设备的电功率和供热出力总量如表 3、表 4 所示。

表2 不同场景下的调度结果

Tab.2 Dispatch results under different scenarios

运行模式	发电成本/ 万元	环境成本/ 万元	弃风功率/ MW	综合成本/ 万元
场景 1	0.80	2.88	7.04	15.48
场景 2	1.44	5.61	0.00	12.18
场景 3	0.88	2.79	0.24	10.04

表3 不同场景下各设备的日前总电功率

Tab.3 Day-ahead gross power of equipment under different scenarios

运行模式	变电站/ MW	分布式 电源/MW	风电/ MW	CHP/ MW	P2G/ MW
场景 1	6.52	3.60	81.33	18.18	-
场景 2	11.54	12.43	88.37	-	3.65
场景 3	7.22	2.50	88.13	18.91	7.3

表4 不同场景下日前总气源出力和产热功率

Tab.4 Day-ahead gross gas source output and heat power under different scenarios

运行模式	气源/m ³	CHP产热/MW	燃气锅炉/MW
场景 1	32 660.52	12.12	11.84
场景 2	30 268.19	-	23.96
场景 3	32 022.05	12.61	11.35

由表 2~表 4 可知,在系统中引入 P2G 可以促进风电消纳,降低综合成本,提升环境效益。场景 3 比场景 1 风电出力增加 8.36%,综合成本降低 35.14%,环境成本降低 3.13%。在系统中引入 CHP 可以降低发电成本和环境成本。场景 2 与场景 3 相比较,发电成本降低 38.89%,环境成本降低 50.27%,这是因为燃气发电是一种经济环保的方式,通过燃气发电向电网供电,可以减小污染物治理成本较高的燃煤发电,变电站和分布式电源出力总共减少 59.45%,但由于 P2G 的存在风电出力不会受到较大影响。因此,在综合能源系统中利用 CHP 和 P2G 的协同合作,可以实现电力系统的低碳经济调度。

为探究管道存储能力对系统经济调度的影响,考虑管存模型与否的优化结果如表 5 所示。由表 5 可知,系统考虑管道存储模型后综合成本降低 10.36%。

表5 管道存储能力对优化结果的影响

Tab.5 Comparison of optimum results with/without modeling of pipe storage

模式	考虑管存模型	不考虑管存模型
综合成本/万元	10.04	11.20

为具体分析管道存储空间利用,管道天然气总储存量如图 4 所示,管道平均流量如图 5 所示。

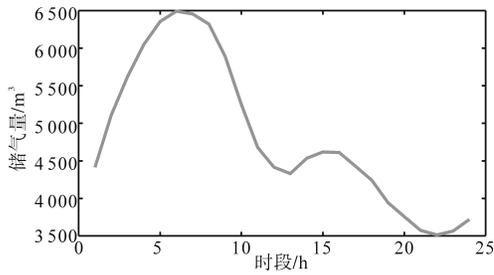


图4 管道总储气量

Fig.4 Total gas storage of pipeline

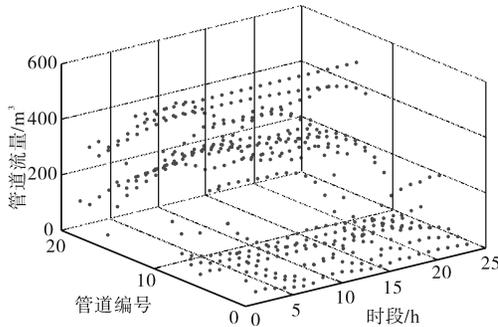


图5 管道平均流量

Fig.5 Average gas flow of pipeline

由图4、图5可知,P2G在多风时段(1~7 h)将大量风电转化为天然气注入天然气系统,但此时没有足够的气负荷消纳多余的天然气,管道存储空间具有一定缓冲能力将天然气储存起来再在后续的时段释放。因此,利用管存空间可以为天然气系统调度提供缓冲,减少气源传输压力,均衡管道平均流量增加了管道利用率。

4 结论

在电-气-热互联综合能源系统的框架下提出了考虑管网动态特性的低碳经济调度模型,具体分析三个不同场景下系统在经济、环境和弃风等方面的表现,研究了管网存储空间对调度结果的影响,得到以下结论:1)P2G和CHP的协同合作能提高系统经济性、环境效益和风电消纳水平;2)管道空间可以将P2G在多风时段产生的大量天然气存储起来,提高管道利用率为天然气系统调度提供缓冲。

参考文献

[1] 郭创新,王惠如,张伊宁,等.面向区域能源互联网的“源-网-荷”协同规划综述[J].电网技术,2019,43(9):3071-3080.

[2] 周一凡,胡伟,闵勇,等.热电联产参与电网调峰补偿定价与利益分配方法[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5325-5335,5579.

[3] 李军徽,张嘉辉,穆钢,等.储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J].电网技术,2019,43(11):3961-3970.

[4] Clegg S, Mancarella P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.

[5] 董帅,王成福,梁军,等.计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J].电力系统自动化,2018,42(11):14-21,127.

[6] 魏震波,黄宇涵,高红均,等.含电转气和热电解耦热电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J].电网技术,2018,42(11):3512-3520.

[7] 卫志农,张思德,孙国强,等.计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究[J].中国电机工程学报,2017,37(16):4601-4609,4885.

[8] He C, Wu L, Liu T, et al. Robust co-optimization scheduling of electricity and natural gas systems via ADMM[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 658-670.

[9] 张伊宁,何宇斌,晏鸣宇,等.计及需求响应与动态气潮流的电-气综合能源系统优化调度[J].电力系统自动化,2018,42(20):1-10.

[10] He Yubin, Yan Mingyu, 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.

[11] 刘天琪,曾红,何川,等.考虑电转气设备和风电场协同扩建的气电互联综合能源系统规划[J].电力自动化设备,2019,39(8):144-151.

[12] 施锦月,许健,曾博,等.基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J].电网技术,2016,40(10):2959-2966.

[13] 魏震波,黄宇涵.计及需求侧管理的多电-气互联综合能源系统分散协调调度[J].电力自动化设备,2019,39(8):277-285.

[14] 陆秋瑜,夏天,朱誉,等.基于有载调压变压器线性化模型的配电网无功优化二阶锥松弛建模及仿真[J].智慧电力,2019,47(9):91-96.

[15] Zhang Y, Hu Y, Ma J, et al. A mixed-integer linear programming approach to security-constrained co-optimization expansion planning of natural gas and electricity transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6368-6378.

收稿日期:2019-12-04
修改稿日期:2019-12-16