

考虑电转气响应特性与风电出力不确定性的 电-气综合能源系统协调调度

高 晗^{1,2}, 李正烁^{1,2}

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要:未来可再生能源将在新型电力系统中占主导地位,风光消纳问题会日趋严峻,电转气技术可以应对风电波动,为解决这一问题提供了有效途径。现有研究在电-气综合能源系统调度过程中虽然考虑了电转气设备,但忽略了电转气设备的响应特性,这不仅夸大了风电消纳能力,而且难以保证调度结果的可行性。为解决上述问题,提出了在风电不确定条件下考虑电转气设备响应特性的电-气综合能源系统调度模型。首先,通过机会约束刻画风电出力不确定条件下系统安全运行要求;然后,考虑了电转气设备的响应特性及相应停启时间约束;最后,利用分段线性化和数值积分的方法将调度模型转换为混合整数线性规划模型。仿真结果表明考虑电转气响应特性对电-气综合能源系统的可靠、经济运行有重要意义。

关键词:电-气综合能源系统;电转气;响应特性;风电;不确定性;调度

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109020

0 引言

截至2020年底,我国可再生能源装机总量达 9.34×10^8 kW,其中风电装机 2.81×10^8 kW,光伏装机 2.53×10^8 kW。当年弃风、弃光量分别为 1.66×10^{10} 、 5.26×10^9 kW·h时^[1],弃风、弃光现象突出。此外,为了实现碳达峰、碳中和的目标,我国提出构建以新能源为主体的新型电力系统^[2],未来风、光等可再生能源装机占比将进一步提升,煤电机组等可调节资源占比将进一步降低,电力系统风光消纳能力面临严峻挑战。燃气机组运行效率高、具备快速调节能力,可以有效应对风电波动,因而得到快速发展;此外,电转气P2G(Power-to-Gas)设备可以将多余的电能转换为天然气,实现可再生能源消纳与能量的大规模存储运输^[3],国内外展开了一系列试点工程^[4];随着P2G设备与燃气机组的部署,电力、天然气系统实现紧密耦合。研究电力、天然气系统的协调调度对构建以新能源为主体的新型电力系统,实现碳达峰、碳中和目标具有重要意义。

传统优化调度中,天然气系统和电力系统相互独立,缺少数据和指令的交互^[5]。随着系统间耦合关系加强,实现系统间信息共享和协调调度有利于提升能源利用率和系统运行经济性、安全性。为充分发挥多能互补的优势,国内外学者围绕电-气综合

能源系统的协调调度开展了广泛研究。文献[6]基于混合整数线性规划,建立了电-气综合能源系统的最优能量流模型;文献[7]以天然气输气量为权重,利用最短路径原理评估天然气管道等效损耗,进而提出了电-气综合能源系统的静态等效模型;文献[8]考虑电力系统和天然气系统的网络耦合约束,研究了电-气综合能源系统的协调调度问题。但上述文献主要研究了确定性调度问题,没有考虑风电等可再生能源出力不确定性。文献[9-11]进一步考虑了风电出力不确定性,文献[9]考虑了电力系统与天然气系统间耦合关系,提出了一种联合市场模型,并设计了日前出清框架;文献[10]利用蒙特卡洛模拟生成各种风电预测场景,研究了风电不确定条件下的电-气综合能源系统协调调度;文献[11]建立了风电出力不确定性条件下的鲁棒调度模型,并在研究中考虑了P2G设备。但是,文献[11]直接采用了简单的无时延P2G模型,忽略了P2G设备响应特性。实际上,P2G设备包含电解制氢和甲烷化两部分,涉及复杂的物理化学过程^[3],设备运行受到爬坡速率与停启时间约束,具有响应延时^[12],上述简单模型难以保证调度结果的可行性、有效性。因此,需要进一步研究如何在电-气综合能源系统调度过程中考虑P2G设备响应特性,建立P2G设备精确模型,以保证系统的安全、经济运行。

本文在国内外研究基础之上建立了考虑P2G设备响应特性以及风电不确定性的电-气综合能源系统协调优化模型。利用机会约束刻画计及风电实际可用出力不确定性的系统安全运行要求,引入通用分布VPD(Versatile Probability Distribution)^[13]描述

收稿日期:2021-05-04;修回日期:2021-07-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007105);中国电机工程学会青年人才托举工程项目(JLB-2020-170)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52007105) and the Youth Talent Promotion Project of Chinese Society for Electrical Engineering(JLB-2020-170)

风电预测误差,进而将含有随机变量的机会约束转化为采用解析形式的确定性约束;采用分段线性化PWL(PieceWise Linearization)方法,将原问题转换为混合整数线性规划问题。通过24节点电力系统与24管道天然气系统构成的综合能源系统验证了所提模型的有效性。与已有研究相比,本文在确定性调度问题^[14]与不考虑响应特性的简单P2G模型^[15]的研究基础上,进一步研究了风电出力不确定条件下考虑响应特性的P2G设备对电-气综合能源系统优化运行的影响。

1 考虑风电不确定性及P2G设备的电-气综合能源系统调度模型

电-气综合能源系统由天然气系统、电力系统以及P2G设备构成。本文首先建立了电力系统及天然气系统模型,然后建立了P2G设备模型,最后建立了含P2G的电-气综合能源系统优化调度模型。

1.1 电力系统模型

电力系统主要由输电线路、发电机组以及用电负荷组成。本文采用直流潮流建立其数学模型,利用机会约束刻画风电出力不确定条件下的系统安全运行要求,电力系统模型介绍如下。

1) 直流潮流模型。

$$\sum_{f \in \Omega_F} P_f^t + \sum_{g \in \Omega_G} P_g^t + \sum_{w \in \Omega_W} P_w^t = \sum_{d \in \Omega_D} P_d^t + \sum_{p \in \Omega_P} P_p^t \quad (1)$$

$$\underline{P}_f \leq P_f^t \leq \bar{P}_f \quad f \in \Omega_F \quad (2)$$

$$\underline{P}_g \leq P_g^t \leq \bar{P}_g \quad g \in \Omega_G \quad (3)$$

$$0 \leq P_w^t \leq \bar{P}_w \quad w \in \Omega_W \quad (4)$$

$$R_f^{\text{dw}} \leq P_f^t - P_f^{t-1} \leq R_f^{\text{up}} \quad (5)$$

$$R_g^{\text{dw}} \leq P_g^t - P_g^{t-1} \leq R_g^{\text{up}} \quad (6)$$

$$-P_{\text{tra}} \leq H_g P_{g,t} - H_d P_{d,t} \leq P_{\text{tra}} \quad (7)$$

$$G_f^t = a_f P_f^t + b_f \quad f \in \Omega_F \quad (8)$$

$$G_g^t = a_g P_g^t + b_g \quad g \in \Omega_G \quad (9)$$

式中: Ω_F 、 Ω_G 、 Ω_W 、 Ω_D 、 Ω_P 分别为煤电机组、燃气机组、风电机组、电力负荷和P2G设备集合; P_f^t 、 P_g^t 、 P_w^t 分别为 t 时刻煤电机组 f 、燃气机组 g 和风电机组 w 的出力; P_d^t 、 P_p^t 分别为 t 时刻电力负荷 d 和P2G设备 p 负荷; $\underline{P}_f$ 、 $\bar{P}_f$ 分别为煤电机组 f 出力下限和上限; $\underline{P}_g$ 、 $\bar{P}_g$ 分别为燃气机组 g 出力下限和上限; $\bar{P}_w$ 为风电机组 w 允许最大出力; R_f^{dw} 、 R_f^{up} 分别为煤电机组 f 的向下和向上爬坡速率; R_g^{dw} 、 R_g^{up} 分别为燃气机组 g 的向下和向上爬坡速率; P_{tra} 为支路传输容量构成的列向量; H_g 、 H_d 分别为发电机组、节点负荷对应的功率转移分布因子; $P_{g,t}$ 、 $P_{d,t}$ 分别为 t 时刻机组出力和各类负荷构成的列向量; G_f^t 、 G_g^t 分别为 t 时刻煤电机组 f 发电成本和燃气机组 g 耗气量; a_f 、 b_f 为煤电机

组 f 成本系数; a_g 、 b_g 为燃气机组 g 能耗系数。

式(1)为电力系统功率平衡方程;式(2)~(4)为机组出力约束;式(5)、(6)为机组爬坡约束;式(7)为线路传输容量约束;式(8)、(9)分别为煤电机组能耗成本和燃气机组耗气量函数,近似为线性函数^[16]。

2) 机会约束。

风电出力具有不确定性,无法准确预测。为保证系统运行安全,机组要留有一定的旋转备用,以应对风电出力被高估的情况,其表达式如下:

$$0 \leq r_{u,m}^t \leq \min \{ \bar{P}_m - P_m^t, r_{u,m} \} \quad m \in \Omega_R \quad (10)$$

$$\Pr \left\{ \sum_{m \in \Omega_R} r_{u,m}^t \geq \sum_{w \in \Omega_W} (P_w^t - P_{a,w}^t) \right\} \geq c_u \quad (11)$$

式中: Ω_R 为煤电机组和燃气机组构成的火电机组集合; $r_{u,m}$ 为机组 m 向上旋转备用最大值; $\bar{P}_m$ 为机组 m 出力上限; $r_{u,m}^t$ 为 t 时刻机组 m 的向上旋转备用; P_m^t 为 t 时刻机组 m 出力; $\Pr\{\cdot\}$ 表示事件 $\{\cdot\}$ 发生概率; $P_{a,w}^t$ 为 t 时刻风电机组 w 的实际可用出力; c_u 为相应置信度。

式(10)为 t 时刻机组 m 所能提供的旋转备用范围约束;式(11)为风电机组最大出力的机会约束,以保证系统运行在安全区间内。

1.2 天然气系统模型

天然气系统主要由天然气管道、压缩机、气源、气负荷等组成,其数学模型介绍如下。

1) 天然气管道模型。

天然气管道流量与其两端节点气压以及管道长度、直径、粗糙程度等自身特性相关^[17],本文采用Weymouth方程描述管道流量与节点气压关系,具体如下:

$$G_{ij}^t | G_{ij}^t | = k_{ij} \left[(\pi_i^t)^2 - (\pi_j^t)^2 \right] \quad l \in \Omega_L; i, j \in \Omega_{Nl} \quad (12)$$

$$\underline{\pi}_i \leq \pi_i^t \leq \bar{\pi}_i \quad i \in \Omega_N \quad (13)$$

式中: Ω_L 为管道集合; Ω_{Nl} 为管道 l 两端的节点集合; Ω_N 为管道节点集合; G_{ij}^t 为 t 时刻通过天然气管道由节点 i 流经节点 j 的管道流量; π_i^t 为 t 时刻节点 i 处气压; k_{ij} 为连接节点 i 、 j 的管道 l 的管道系数,由管道自身特性决定; $\underline{\pi}_i$ 、 $\bar{\pi}_i$ 分别为节点 i 气压下限和上限。

2) 压缩机模型。

天然气在传输过程中与管道摩擦产生压力损失。因此,需增设压缩机,提升管道气压,补偿压力损失。压缩机消耗能量与压缩天然气流量近似成正比^[14],由流入压缩机的天然气提供。压缩机模型如下:

$$\underline{r}_c \pi_i^t \leq \pi_j^t \leq \bar{r}_c \pi_i^t \quad c \in \Omega_C; i, j \in \Omega_{Nc} \quad (14)$$

$$G_{m,c}^t = \alpha_c G_c^t \quad (15)$$

式中: Ω_C 为压缩机集合; Ω_{Nc} 为压缩机 c 两端连接的

管道节点集合; $\bar{L}_c, \bar{r}_c$ 分别为压缩机 c 的最小压缩比和最大压缩比; α_c 为压缩机 c 能耗系数; π_i^t, π_j^t 分别为压缩机 c 入口端和出口端所在管道节点处气压; $G_c^t, G_{m,c}^t$ 分别为 t 时刻流经压缩机 c 的天然气量与压缩机 c 消耗的天然气量。

式(14)为压缩机的压缩比约束,表示压缩机两端的气压关系;式(15)为压缩机的能耗表达式,由于压缩机可以改变气体压力,其两端气压与流量关系不受 Weymouth 方程式(12)约束,仅考虑能耗方程式(15)。

3) 节点流量平衡。

$$\sum_{s \in \Omega_{Sn}} G_s^t + \sum_{p \in \Omega_{Pn}} G_p^t + \sum_{c \in \Omega_{Cn}} s_{nc} G_c^t - \sum_{e \in \Omega_{En}} G_e^t - \sum_{j \in \Omega_{Nn}} G_{n,j}^t = \sum_{g \in \Omega_{Gn}} G_g^t + \sum_{e \in \Omega_{Dn}} G_e^t \quad \forall n \in \Omega_N \quad (16)$$

式中: $\Omega_{Sn}, \Omega_{Pn}, \Omega_{Cn}, \Omega_{Nn}, \Omega_{Gn}$ 分别为 $\Omega_S, \Omega_P, \Omega_C, \Omega_N, \Omega_G$ 中与节点 n 相连的元素的子集; Ω_{Cn} 为由节点 n 提供所需能耗的压缩机集合; Ω_{Dn} 为节点 n 处天然气负荷集合; G_p^t 为 t 时刻 P2G 设备 p 产气量; G_e^t 为 t 时刻负荷 e 的天然气需求量; s_{nc} 为方向标志,当节点 n 为压缩机 c 出口时取值为 1, 否则取值为 -1; G_s^t 为 t 时刻气源 s 产气量,其产气量取值范围如式(17)所示。

$$\underline{G}_s \leq G_s^t \leq \bar{G}_s \quad s \in \Omega_S \quad (17)$$

式中: Ω_S 为气源集合; $\underline{G}_s, \bar{G}_s$ 分别为气源 s 的最小和最大产气量。

1.3 P2G 设备运行模型

P2G 技术包括电解制氢和甲烷化 2 个过程,其流程如图 1 所示。

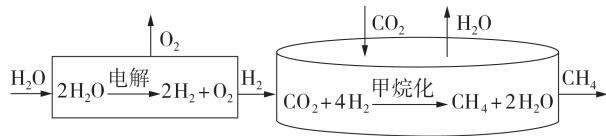


图1 P2G 技术流程图

Fig.1 Flowchart of P2G technology

1) 响应特性。

目前,电解技术已经可以在数分钟内实现停启^[18],但甲烷化反应停启仍需数小时^[3],因此 P2G 设备存在明显响应延时,需考虑设备停启时间约束。类似火电机组, P2G 设备需要一定爬坡时间来响应功率变化,但针对运行范围内的任意功率变化, P2G 设备通常可在 10 min 内完成响应^[19],故此处忽略其爬坡速率约束。考虑响应特性的 P2G 设备数学模型如下:

$$\sum_{k=t-T_{U,p}+1}^t v_p^k \leq u_p^k \quad t \in [T_{U,p}, T] \quad (18)$$

$$\sum_{k=t-T_{D,p}+1}^t w_p^k \leq 1 - u_p^k \quad t \in [T_{D,p}, T] \quad (19)$$

$$u_p^t - u_p^{t-1} = v_p^t - w_p^t \quad v_p^t, u_p^t \in [0, 1]; p \in \Omega_P \quad (20)$$

$$P_p^{\min} u_p^t \leq P_p^t \leq P_p^{\max} u_p^t \quad (21)$$

式中: T 为总的调度时间; $T_{U,p}, T_{D,p}$ 分别为 P2G 设备 p 最小开机时间和最小停机时间; u_p^t 为 t 时刻 P2G 设备 p 的运行状态变量,设备运行时取值为 1, 否则取值为 0; v_p^t 为 t 时刻 P2G 设备 p 的启动动作变量,启动时取值为 1, 否则取值为 0; w_p^t 为 t 时刻 P2G 设备 p 的停机动作变量,关闭时取值为 1, 否则取值为 0; $P_p^{\min}, P_p^{\max}$ 分别为 P2G 设备 p 的最小和最大运行功率。

式(18)、(19)分别为 P2G 设备运行时间约束和停机时间约束;式(20)为不同状态间关联约束;式(21)为 P2G 设备运行范围。

2) 耦合关系。

P2G 设备利用电解水和甲烷化反应,将多余电能转换为天然气进行存储、运输,实现电力与天然气系统的耦合。目前电解制氢效率可达 60%, 甲烷化效率约为 81.8%, 综合能效可达 50%^[20], 天然气产出与所耗电能耦合关系如下:

$$G_p^t = \eta_p P_p^t \quad p \in \Omega_P \quad (22)$$

式中: η_p 为 P2G 设备 p 的能量转换系数。

1.4 目标函数

本文目标函数为最小化运行成本以及风电惩罚成本,其表达式如下:

$$\min f_{\text{obj}} = \sum_{t \in [1, T]} (F_f^t + F_s^t + F_d^t + F_u^t + F_p^t) \quad (23)$$

$$\begin{cases} F_f^t = \sum_{f \in \Omega_F} G_f^t \\ F_s^t = \sum_{s \in \Omega_S} b_s G_s^t \\ F_d^t = \sum_{w \in \Omega_W} \rho_d \int_{P_w^t}^{\bar{P}_w^t} |P_w^t - P_{a,w}^t| f(P_{a,w}^t) dP_{a,w}^t \\ F_u^t = \sum_{w \in \Omega_W} \rho_u \int_0^{P_w^t} |P_w^t - P_{a,w}^t| f(P_{a,w}^t) dP_{a,w}^t \\ F_p^t = \sum_{p \in \Omega_P} (C_p^{\text{st}} v_p^t + C_p^{\text{sd}} w_p^t) \end{cases} \quad (24)$$

式中: f_{obj} 为目标函数; F_f^t 为 t 时刻所有煤电机组运行成本; F_s^t 为 t 时刻所有气源产气成本; F_d^t, F_u^t 分别为 t 时刻风电低估和高估惩罚成本; F_p^t 为 t 时刻 P2G 设备停启成本, P2G 设备停启无法在一瞬间完成,需要加热、吹气等操作^[3], 故考虑其停启成本; b_s 为气源 s 产气成本; ρ_d, ρ_u 分别为风电低估和高估惩罚因子; $f(\cdot)$ 为风电出力的概率密度函数,其表达式如式(25)所示; $C_p^{\text{st}}, C_p^{\text{sd}}$ 分别为 P2G 设备 p 的开启成本和停机成本。

2 求解方法

上述模型为非凸的随机规划问题,机会约束式(11)中存在随机变量难以直接求解,非凸非线性的

天然气管道流量方程式(12)进一步增加了模型的复杂程度。相比于高斯分布和贝塔分布等经典理论分布,VPD可以更好地拟合风电预测误差,在不同时间尺度与置信度下,VPD分布均能较好地拟合实际风电分布,提升了调度决策的准确性,且根据VPD的分布函数可直接得出其分布函数逆函数的解析形式^[13],因此VPD被广泛应用于刻画风电出力的不确定性。为了解决上述问题,本文引入VPD,其概率密度函数 $f(x)$ 与分布函数 $F(x)$ 表达式分别如下:

$$f(x) = \frac{\alpha \beta e^{-\alpha(x-\gamma)}}{[1 + e^{-\alpha(x-\gamma)}]^{\beta+1}} \quad (25)$$

$$F(x) = [1 + e^{-\alpha(x-\gamma)}]^{-\beta} \quad (26)$$

式中: x 为随机变量; α, β, γ 为分布函数的形状参数,可由历史数据拟合得到^[15]。

VPD分布拟合及数据处理流程如附录A表A1所示。分布函数的逆函数如下:

$$F^{-1}(c_v) = \gamma - \frac{1}{\alpha} \ln(c_v^{1/\beta} - 1) \quad (27)$$

式中: c_v 为置信度。

基于VPD,将式(11)转化为确定性约束,过程如下:

$$\left\{ \begin{aligned} & \Pr \left\{ \sum_{m \in \Omega_R} r_{u,m}^t \geq \sum_{w \in \Omega_W} (P_w^t - P_{a,w}^t) \right\} = \\ & 1 - \Pr \left\{ \sum_{w \in \Omega_W} P_{a,w}^t \leq \sum_{w \in \Omega_W} P_w^t - \sum_{m \in \Omega_R} r_{u,m}^t \right\} = \\ & 1 - F \left(\sum_{w \in \Omega_W} P_w^t - \sum_{m \in \Omega_R} r_{u,m}^t \right) \\ & \Pr \left\{ \sum_{m \in \Omega_R} r_{u,m}^t \geq \sum_{w \in \Omega_W} (P_w^t - P_{a,w}^t) \right\} \geq c_u \\ & F \left(\sum_{w \in \Omega_W} P_w^t - \sum_{m \in \Omega_R} r_{u,m}^t \right) \leq 1 - c_u \\ & \sum_{w \in \Omega_W} P_w^t - \sum_{m \in \Omega_R} r_{u,m}^t \leq F^{-1}(1 - c_u) \end{aligned} \right. \Rightarrow \quad (28)$$

针对式(12),首先引入 $\pi_{s,i}^t$ 代替 $(\pi_i^t)^2$,并对式(13)、(14)进行变换消除气压平方项,仅保留管道流量平方项 $G_{ij}^t | G_{ij}^t |$,得到表达式如下:

$$G_{ij}^t | G_{ij}^t | = k_{ij} (\pi_{s,i}^t - \pi_{s,j}^t) \quad (29)$$

$$(\underline{\pi}_i)^2 \leq \pi_{s,i}^t \leq (\bar{\pi}_i)^2 \quad i \in \Omega_N \quad (30)$$

$$(\underline{c}_c \pi_i^t)^2 \leq \pi_{s,j}^t \leq (\bar{c}_c \pi_i^t)^2 \quad c \in \Omega_C \quad (31)$$

然后,进一步利用PWL将式(29)线性化,根据管道流量范围选取 N_1 个离散点,得到表达式如下:

$$y_{ij}^{n'} = G_{ij}^{n'} | G_{ij}^{n'} | \quad \forall n' \quad (32)$$

$$y_{ij}^t = k_{ij} (\pi_{s,i}^t - \pi_{s,j}^t) \quad (33)$$

$$G_{ij}^t = \sum_{n'=1}^{N_1} \eta_{ij}^{n',t} G_{ij}^{n'}, \quad \sum_{n'=1}^{N_1} \eta_{ij}^{n',t} = 1 \quad (34)$$

$$y_{ij}^t = \sum_{n'=1}^{N_1} \eta_{ij}^{n',t} y_{ij}^{n'} \quad (35)$$

式中: $G_{ij}^{n'}$ 为管道 ij 流量在第 n' 个离散点处的值, $y_{ij}^{n'}$ 为该点处对应的流量平方项; y_{ij}^t 为线性化后 t 时刻管道 ij 流量平方项取值; $\eta_{ij}^{n',t}$ 属于第二类特殊有序集^[15]。

式(33)为PWL后的Weymouth方程。式(34)、(35)保证了 G_{ij}^t, y_{ij}^t 均为2个相邻离散点的凸组合。

针对目标函数中的风电惩罚成本,采用数值积分方法,将其转换为线性函数,具体过程如下:

$$\begin{aligned} & \int_{P_{a,w}^t}^{\bar{P}_w} |P_w^t - P_{a,w}^t| f_w(P_{a,w}^t) dP_{a,w}^t = \\ & \int_0^{\bar{P}_w} \max(P_{a,w}^t - P_w^t, 0) f_w(P_{a,w}^t) dP_{a,w}^t = \\ & \frac{1}{N'} \sum_{z=1}^{N'} b_{w,z} f_w(P_{a,w}^{t,z}) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^{P_w^t} |P_w^t - P_{a,w}^t| f_w(P_{a,w}^t) dP_{a,w}^t = \\ & \int_0^{\bar{P}_w} \max(P_w^t - P_{a,w}^t, 0) f_w(P_{a,w}^t) dP_{a,w}^t = \\ & \frac{1}{N'} \sum_{z=1}^{N'} c_{w,z} f_w(P_{a,w}^{t,z}) \end{aligned} \quad (37)$$

式中: N' 为取样点数目; $P_{a,w}^{t,z}$ 为 t 时刻风电机组 w 实际可用出力在取样点 z 处的取值; $b_{w,z}, c_{w,z}$ 分别为风电机组 w 在取样点 z 处的低估偏差和高估偏差,其分别满足式(38)和式(39)。

$$b_{w,z} \geq P_{a,w}^{t,z} - P_w^t \geq 0 \quad (38)$$

$$c_{w,z} \geq P_w^t - P_{a,w}^{t,z} \geq 0 \quad (39)$$

化简后的模型为混合整数线性规划模型,可直接用商业求解器求解,模型整体求解流程如图2所示。

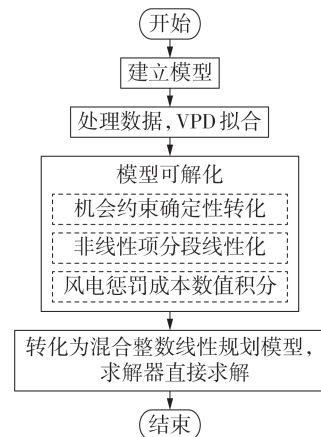


图2 模型求解流程图

Fig.2 Flowchart of model solution

3 算例分析

为验证本文所提方法的有效性,以文献[21]构造的电-气综合能源系统为基础,增加1台装机容量为150 MW的风电机组与3台功率为20 MW的P2G设备构成的P2G场站,构建了含P2G的电-气综合能源系统。其中,将压缩机入口与管道连接处视为一个节点,气井及气井处压缩机视为气源,VPD形状参数由文献[22]中风电出力数据拟合,P2G设备参数根据文献[19]进行设置,风电机组参数、VPD分布拟合参数和P2G设备参数分别如附录A表A2—A4所示。仿真环境为MATLAB R2020a,求解器为Gurobi 9.0.3。为研究风电出力不确定条件下P2G设备对电-气综合能源系统协调调度的影响,设置了4种不同场景,具体如下:场景1,考虑P2G设备响应特性,P2G设备名称为 a_1 — a_3 ;场景2,采用文献[11]中无响应特性P2G模型,设备名称为 b_1 — b_3 ;场景3,考虑P2G响应特性,参考文献[23]中模型,将场站内所有的P2G设备看成一个整体,相应的设备名称为 c_1 ;场景4,P2G设备不工作,即不考虑P2G设备。

对上述4种场景进行仿真,不同场景下的调度结果如表1所示。不同场景下的风电机组出力如图3所示。P2G设备运行状态图如图4所示。

由表1及图3可知,与场景4中无P2G设备的情景相比,场景1—3中P2G设备的使用可以提升风电消纳水平,有效减少弃风量,降低系统运行成本。这是由于一方面P2G设备的投入减少了弃风,降低了

表1 不同场景下的调度结果对比

Table 1 Comparison of scheduling results under different scenarios

场景	总成本 / \$	风电发电量 / (MW·h)	弃风成本 / \$	P2G能耗 / (MW·h)	P2G成本 / \$
1	2.0880×10^6	1587.2	13622.5	227.4	580
2	2.0861×10^6	1613.5	13564.1	239.6	0
3	2.0889×10^6	1589.5	13991.7	219.6	870
4	2.1002×10^6	1384.8	25611.1	0	0

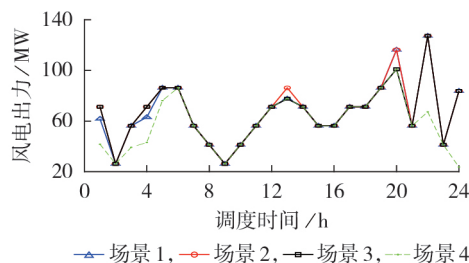


图3 不同场景下的风电出力

Fig.3 Wind power output under different scenarios

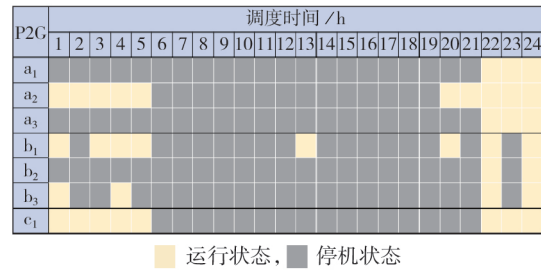


图4 P2G设备运行状态图

Fig.4 Operation state of P2G facilities

风电惩罚成本,另一方面P2G设备可以生成甲烷注入到天然气管道,降低能源消耗成本。但不同P2G模型产生的调度结果存在明显差异。

由表1及图3、4可知,场景2忽略了P2G设备响应特性,调度方案给出的P2G设备运行状态违反物理上的最小停启时间约束。因此,该调度方案虽然成本更低,但夸大了风电消纳能力以及系统运行经济性,实际上不可行。场景1考虑了P2G设备的响应特性及相应的停启时间约束。首先,在部分零弃风时刻,例如调度时间为2、21、23 h时,系统无需运行P2G设备就可以完全消纳风电,但是由于最小运行时间约束,此时P2G设备仍要继续运行,风电出力却无法进一步提升,并且由于电能到甲烷的转换过程中会产生能量损失,系统总运行成本增加。其次,在部分弃风量较小的时刻,由于响应特性以及停启成本,启动P2G设备也不再具有经济性。例如,调度时间为13 h时仅有少量弃风,P2G设备运行将导致总成本增加,此时P2G设备处于停机状态;调度时间为1、4 h时,启动1台P2G设备基本可以消纳大部分风电,而启动2台设备反而会增加总成本,故仅有1台设备启动。此外,由图3和图4可知,场景3忽略了不同P2G设备间的组合,简单地将P2G场站看成整体进行调度,虽然调度结果满足设备运行的物理约束,但无法发挥P2G消纳风电的灵活性。例如调度时间为20 h时,弃风量较低,且相邻时刻无弃风,由于场景3简单地将P2G设备视为整体,其最小运行功率远大于场景1中单台设备,在弃风量较小的情况下,由于转换过程中能量损失,此时启动P2G设备不再具有经济性,产生弃风。

不同场景下的P2G设备出力如图5所示。场景1、2下的火电机组出力如图6所示。

由图5与图6可知,场景2下的火电机组调度出力小于场景1,这是由于场景2认为P2G设备可在弃风时刻立刻启动,没有考虑设备停启时间约束及连续运行过程中产生的电能需求。例如当调度时间为2、21、23 h时,风电可完全消纳,P2G运行无法进一步提升风电出力,但由于P2G设备的响应特性,它们仍应处于停机状态,所以火电机组需增加出力提供

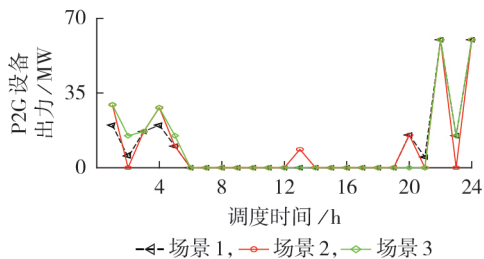


图5 不同场景下的P2G设备出力

Fig.5 Output of P2G facilities under different scenarios

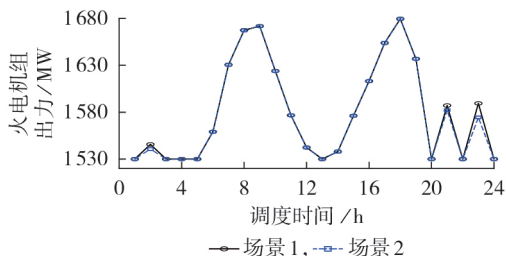


图6 场景1、2下的火电机组出力

Fig.6 Output of thermal power units under Scenario 1 and Scenario 2

P2G所需电能。显然,由于场景2忽略响应特性,火电机组调度结果小于实际运行要求,这会导致系统功率不平衡,甚至引发频率稳定问题。

由上述对比分析可知,P2G设备可以有效提升风电消纳水平,降低系统运行成本,但模型不精确无法反映P2G设备实际运行特性,会导致调度结果不可行或低估P2G设备灵活性,引发一系列问题。忽略响应特性会导致P2G设备频繁停启违反实际的运行约束,而由这种违反实际运行约束的调度方案得来的更低运行成本实际上也很难达到。简单地P2G场站看成整体进行调度,忽略其内部不同P2G设备之间的组合,使得调度范围小于P2G设备实际运行范围,无法充分发挥P2G设备的灵活性,降低了系统运行的经济性。

4 结论

本文在电力、天然气系统紧密耦合的背景之下,针对现有含P2G设备的电-气综合能源系统模型的不足,基于P2G设备响应特性,构建了含P2G的电-气综合能源系统优化调度模型,研究了风电出力不确定条件下综合能源系统的优化调度问题。

不同场景下的仿真结果表明考虑P2G响应特性对电-气综合能源系统的可靠、经济运行有重要意义。忽略P2G设备响应特性会夸大系统风电消纳能力,调度结果与实际设备运行状态有较大偏差,无法满足P2G设备实际运行条件,增加了系统实际运行成本,且会导致火电机组出力低于实际需求,引发功率不平衡及频率问题。将P2G场站简单视为整体进

行调度,则无法发挥P2G设备灵活性,低估了P2G设备风电消纳能力与运行经济性。本文仅考虑电力与天然气系统之间的耦合关系,随着热电联产机组装机容量不断增加,电、气、热之间耦合关系不断加深,在本文研究基础之上,未来还有必要进一步构建考虑P2G的电-气-热综合能源系统调度模型。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家能源局. 国家能源局2021年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. [2020-04-05]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c_139708580.htm.
- [2] 李鹏飞,李霞林,王成山,等. 中低压柔性直流配电系统稳定性分析模型与机理研究综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(5): 3-21.
LI Pengfei, LI Xialin, WANG Chengshan, et al. Review of stability analysis model and mechanism research of medium- and low-voltage flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 3-21.
- [3] 余娟,时权妍,杨知方,等. 考虑电解水与甲烷化运行特性的电转气系统日前调度方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(18): 18-25.
YU Juan, SHI Quanyan, YANG Zhifang, et al. Day-ahead scheduling method of power-to-gas system considering operation characteristics of water electrolysis and methanation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 18-25.
- [4] MANUEL G, LFEVBRE J, MÖRS F, et al. Renewable power-to-gas: a technological and economic review[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 1371-1390.
- [5] GEIDL M, KOEPEL G, FAVREPERRO D P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [6] DING T, XU Y, WEI W, et al. Energy flow optimization for integrated power-gas generation and transmission systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(3): 1677-1687.
- [7] DAI W, YU J, YANG Z, et al. A static equivalent model of natural gas network for electricity-gas co-optimization[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1473-1482.
- [8] XU Y, DING T, QU M, et al. Adaptive dynamic programming for gas-power network constrained unit commitment to accommodate renewable energy with combined-cycle units[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 2028-2039.
- [9] CHEN R, WANG J, SUN H. Clearing and pricing for coordinated gas and electricity day-ahead markets considering wind power uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2496-2508.
- [10] QADRAN M, WU J, JENKINS N, et al. Operating strategies for a GB integrated gas and electricity network considering the uncertainty in wind power forecasts[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 128-138.
- [11] 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.
- [12] 马亦耕,张峰,丁磊. 弃风参与电网调频的电转气-储气-燃气轮机容量优化配置[J]. 电力系统自动化,2020,44(7): 79-86.
MA Yigeng, ZHANG Feng, DING Lei. Optimal capacity configuration of power-to-gas, gas tank and natural gas generation unit with participation of curtailed wind power in frequency regu-

- lation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 79-86.
- [13] ZHANG Z, SUN Y, LIN J, et al. Versatile distribution of wind power output for a given forecast value[C]//Power & Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2012: 1-7.
- [14] GAO H, LI Z. A Benders decomposition based algorithm for steady-state dispatch problem in an integrated electricity-gas system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3817-3820.
- [15] GAO H, LI Z. Effect of power to gas on integrated electricity-gas system with uncertain wind generation[C]//2020 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS). Jinan, China: IEEE, 2020: 164-168.
- [16] 卫志农, 梅建春, 孙国强, 等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 41-47.
- WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47.
- [17] 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.
- 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.
- [18] 李佳蓉, 林今, 邢学韬, 等. 主动配电网中基于统一运行模型的电制氢(P2H)模块组合选型与优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4021-4033.
- LI Jiarong, LIN Jin, XING Xuetao, et al. Technology portfolio selection and optimal planning of Power-to-Hydrogen (P2H) modules in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4021-4033.
- [19] VANDEWALLE J, BRUNINX K, D'HAESELEER W. A mixed-integer linear operational model of a coupled electricity, natural gas and carbon energy system with power to gas[EB/OL]. [2021-04-05]. http://www.mech.kuleuven.be/en/tme/research/energy_environment/Pdf/wpen2014-16.pdf.
- [20] 李佳蓉, 林今, 肖晋宇, 等. 面向可再生能源消纳的电化工(P2X)技术分析及其能耗水平对比[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 86-96.
- LI Jiarong, LIN Jin, XIAO Jinyu, et al. Technical and energy consumption comparison of Power-to-Chemicals (P2X) technologies for renewable energy integration[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 86-96.
- [21] ROALD L A, SUNDAR K, ZLOTNIK A, et al. An uncertainty management framework for integrated gas-electric energy systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2020, 108(9): 1518-1540.
- [22] Renewables.Ninja[EB/OL]. [2020-04-05]. <https://www.renewables.ninja/>.
- [23] 周任军, 肖钧文, 唐夏菲, 等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 61-67.
- ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 61-67.

作者简介:



高 晗

高 晗(1996—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统优化运行(E-mail: gaohan@mail.sdu.edu.cn);

李正烁(1988—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士研究生导师, 通信作者, 主要研究方向为可再生能源系统的分布式自治协同(E-mail: zslis@sdu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Coordinated scheduling of integrated electricity-gas energy system considering response characteristic of power-to-gas and wind power uncertainty

GAO Han^{1,2}, LI Zhengshuo^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Renewable energy will play a leading role in future power systems, and the problem of accommodating wind and solar power production represents a critical issue. P2G(Power-to-Gas) technology contributes to alleviating the fluctuation of wind power, which provides an effective way to solve this problem. Many existing studies consider the P2G facilities in the dispatching process of the integrated electricity-gas energy system, but ignore the response characteristics of P2G facilities. As a result, the ability of wind power accommodation is over-estimated, and the feasibility of operating decisions cannot be ensured. To solve this issue, an operation model of an integrated electricity-gas energy system that considers the response characteristics of P2G facilities is proposed, in which the intermittent wind power production is addressed. Firstly, the chance constraint programming approach is adopted to provide secure operating decisions under stochastic wind power output. Then, the response characteristics of P2G facilities and the corresponding downtime and uptime are considered. Finally, the operation model is transformed into a mixed integer linear programming problem by using piecewise linearization and numerical integration approaches. Case studies demonstrate that the consideration of P2G response characteristic ensures the reliable and economic operation of integrated electricity-gas energy system.

Key words: integrated electricity-gas energy system; power-to-gas; response characteristic; wind power; uncertainty; scheduling

附录 A

表 A1 VPD 分布拟合及数据处理流程
Table A1 Versatile probability distribution fitting and data processing flow

Input:	历史风电预测出力以及实际可用出力。
Output:	不同区间中各置信度对应风电出力以及取样点对应概率。
Step1:	将同一时刻的风电预测出力和实际可用出力组成一个数据对。
Step2:	以风电机组最大允许出力为基准，对数据对进行归一化处理。
Step3:	将预测范围均匀划分为[0,0.1],...,[0.9,1] 10 个区间，根据数据对中预测出力取值，将数据对划分到相应区间。
Step4:	将每个区间中所含数据对的风电实际可用出力构成一个新的数据集，对每个数据集进行 VPD 分布拟合，得到每个预测区间内对应的风电实际可用出力的概率密度函数、分布函数，以及分布函数逆函数。
Step5:	计算各区间中置信度 c_u 对应的风电实际可用出力取值，以及各取样点 $P_{a,w}^{L,z}$ 处对应的概率。

表 A2 风电机组参数 Table A2 Parameters of wind turbine			
装机容量/MW	节点位置	风电高估惩罚成本/ [\$ \cdot (MW \cdot h)^{-1}]\$	风电低估惩罚成本/ [\$ \cdot (MW \cdot h)^{-1}]\$
150	15	75	75

表 A3 VPD 分布拟合参数 Table A3 Parameters of VPD				
区间	形状参数			$F^{-1}(1-c_u)$
	α	γ	β	
[0,0.1]	29.571	30.719	-0.101	0.000
[0.1,0.2]	30.349	2.651	0.105	0.081
[0.2,0.3]	30.316	1.349	0.235	0.166
[0.3,0.4]	31.687	0.900	0.353	0.249
[0.4,0.5]	28.701	1.078	0.442	0.348
[0.5,0.6]	33.695	0.711	0.560	0.436
[0.6,0.7]	37.829	0.629	0.665	0.539
[0.7,0.8]	53.550	0.422	0.777	0.644
[0.8,0.9]	50.461	0.554	0.863	0.755
[0.9,1]	118.332	0.187	0.979	0.844

表 A4 P2G 设备参数 Table A4 Parameters of P2G facility						
P2G	最大功率/MW	最小功率/MW	最小运行 时间/h	最小停机 时间/h	最小开机 成本/\$	最小关机 成本/\$
a ₁	20	5	4	2	145	0
a ₂	20	5	4	2	145	0
a ₃	20	5	4	2	145	0
c ₁	60	15	4	2	435	0