

电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化

周任军,肖钧文,唐夏菲,郑权国,吕佳,曹俊波

(长沙理工大学 湖南省清洁能源与智能电网协同创新中心,湖南 长沙 410114)

摘要:电转气技术作为一种新型能源转换和储存方式为可再生能源消纳提供了新的途径,电转气技术生成甲烷所需的 CO₂ 可高效经济地取自碳捕集机组的捕集碳量。提出将电转气-碳捕集电厂作为整体系统,建立电转气-碳捕集电厂协调优化模型,以碳成本、燃料成本、弃风成本、电转气成本为目标,以碳捕集率、碳捕集电厂有功出力、电转气功率为决策变量。仿真结果表明,电转气-碳捕集电厂提高了风电消纳能力,减少了碳排放,提升了碳利用水平,降低了电转气运行成本。

关键词:电转气;消纳新能源;碳捕集;碳利用;优化运行;成本;模型

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.008

0 引言

大容量储能或源网荷协调运行是当前解决风电大规模接入及其消纳问题的主要途径^[1]。传统储能和新型储能方式各有优势,但仍存在建设周期长、地势要求高、存储容量小、经济成本高、难以大规模和长时间有效存储能量等不足^[2]。

电转气 P2G (Power-to-Gas) 技术的能源转换和时空平移特性为新能源消纳和负荷削峰填谷提供了有效途径。P2G 技术指利用电能将水电解成氢气后与 CO₂ 催化反应生成甲烷^[3]。P2G 作为连接电力系统和天然气系统的单元,兼具电力系统负荷和天然气气源 2 种功能,其响应速度快,调度特性灵活,可广泛应用于电力系统削峰填谷、消纳弃风、提供储能等辅助服务^[4]。德国已经将 P2G 技术列为利用可再生能源的一种重要储能技术,并应用于其能源转化计划。

当前,P2G 技术与新能源消纳、电力系统运行的相关研究主要集中在技术特性、运营模式、协同调度等方面^[5-6]。但作为 P2G 生产原料的 CO₂ 来源这一关键问题,暂未得到学界关注。而碳捕集电厂 CCPP (Carbon Capture Power Plant) 可为其提供良好的供应渠道。当前碳捕集与封存 CCS (Carbon Capture and Storage) 技术在捕集阶段耗能较高,矿石碳化、地质封存、深海封存等封存途径亦需额外耗能,使捕集技术未能广泛利用和推广。为了降低碳捕集能耗,文献^[7]选取了碳捕集系统最佳运行参数;为了有效刺激发电商参与碳捕集,文献^[8]建立了考虑售电损失成本的碳排放权交易模型,降低了由捕集能耗所产生的售电利润损失。捕集能耗使机组并网功率减少,但其调节可促进风电功率消纳,相当于碳捕集

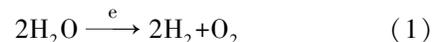
能耗利用了风电功率。当前研究表明,大规模风电功率可用于水解制氢^[9],因此,CCS 技术和 P2G 技术结合,既可消纳大容量风电功率,又能开发碳的新型再利用前景。

而 2 种技术结合的关键,是将 P2G 设备与 CCPP 作为整体后,提高碳利用,实现节能减排,从而降低各方成本,推动技术应用。因此,研究碳捕集后的碳利用和 P2G 中的新能源消纳,建立其协调优化模型,以碳捕集率、CCPP 有功出力和 P2G 功率为决策变量,以碳成本、燃料成本、弃风成本、P2G 成本等为目标函数。相比于单独 P2G 或 CCPP,电转气-碳捕集电厂 (P2G-CCPP) 系统可降低碳排放与碳封存量,减少弃风,降低 P2G 成本。

1 P2G-CCPP 系统框架

1.1 P2G 及其储能技术

P2G 技术由德国弗劳恩霍夫风能及能源系统技术研究所、德国巴符州太阳能和氢研究中心合作提出^[10]。其分为 2 个阶段,第一阶段如式(1)所示,将风电场弃风电力通过电解水产生氢气,该阶段简单易行,其能量转换效率可达 75%~85%,现有的碱性电解水制氢技术非常成熟,已经大规模应用。



第二阶段为甲烷化,如式(2)所示。该阶段是指在催化剂的作用下将电解水生成的氢气和 CO₂ 反应生成甲烷和水。这个过程能量转换效率约为 75%~80%^[11]。



P2G 技术不需要额外的储能设备,只需储气罐,与传统的飞轮储能、电池储能、压缩空气储能和抽水蓄能等储能技术及储能潜力比较如图 1 所示。P2G 技术在储存时间和容量两方面均优于其他 4 种储能技术。

收稿日期:2017-09-20;修回日期:2018-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277016,71331001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277016,71331001)

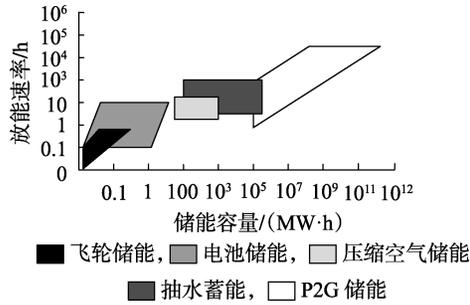


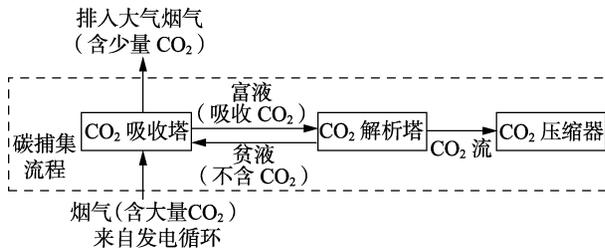
图 1 储能技术比较

Fig.1 Comparison among energy storage technologies

1.2 CCS 技术及 CCPP

CCS 技术包括捕集与封存 2 个环节,在传统火力发电厂中引入 CCS 技术,则成为 CCPP,将大量 CO_2 从电厂排放的烟气中分离出来,经一系列处理流程后形成高纯度的 CO_2 ,并通过矿石碳化、地质封存、深海封存等途径实现与大气隔绝,从而显著降低火电厂的碳排放强度^[12]。

CCPP 主要分为 3 类:燃烧后碳捕集、燃烧前碳捕集与富氧燃烧碳捕集。其中,燃烧后碳捕集技术的应用较为广泛,技术成熟度、商业化程度较高,如图 2 所示。CCPP 将 CO_2 捕集到解析塔之后,一部分提供给 P2G 碳利用,通过搭建 CO_2 输送管道传输 CO_2 至 P2G 设备,由于输送距离较近,此过程 CO_2 及功率损耗可以忽略;另一部分流入 CO_2 压缩机进行封存处理。文中 CCPP 均默认采用燃烧后碳捕集技术。

图 2 CCPP 吸收技术的 CO_2 分离原理Fig.2 CO_2 separation principle for CCPP absorption technology

1.3 P2G-CCPP 系统框架

现有关于 P2G 的文献中没有针对 CO_2 的来源进行研究,而碳捕集的 CO_2 作为 P2G 的原料,既高效又环保。因此考虑碳利用,在 CCPP 中引入 P2G 技术,建立 P2G-CCPP 系统,框架如图 3 所示。图中, P_G 为 CCPP 发电功率; Q_1 为碳捕集量; Q_2 为碳排放量; P_{CO_2} 为碳捕集技术所消耗的捕集能耗,称为碳捕集消耗功率^[13],由 CCPP 和风电场弃风电力共同提供; P_W 为风电场实际出力; P_{P2G} 为 P2G 消耗功率; P_e 为负荷功率; Q_{CO_2} 为捕集到的 CO_2 送入 P2G 设备的碳量, $Q_1 - Q_{\text{CO}_2}$ 表示封存碳量。CCPP 将捕集到的部分 CO_2 提供给 P2G 设备,利用 P2G 消纳风电

场弃风功率。

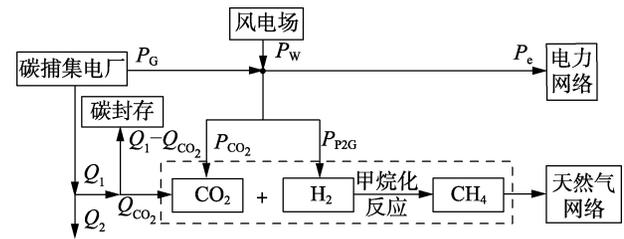


图 3 P2G-CCPP 系统框架

Fig.3 P2G-CCPP system framework

2 考虑碳利用的 P2G-CCPP 系统模型

2.1 P2G-CCPP 系统捕集能耗与碳利用量

a. 碳捕集系统能耗与运行能耗。

碳捕集系统的能耗主要分为 2 类:一类为系统基本能耗 P_B^{CCS} ,主要是由于碳捕集系统的引入使常规电厂的结构和运行工况发生变化,而引起发电效率损失所带来的能耗,该部分能耗与碳捕集系统的运行状态无关,在电厂运行中可认为恒定不变;另一类为系统运行能耗 P_R^{CCS} ,主要来自碳捕集系统对 CO_2 进行吸附、分解、压缩等过程中的能量损耗,该部分能耗与碳捕集系统的运行状态相关^[13]。

以单时段功率表达运行时段 t 的碳捕集系统能耗 $P_{\text{CO}_2,t}$ 为:

$$P_{\text{CO}_2,t} = P_{R,t}^{\text{CCS}} + P_B^{\text{CCS}} \quad (3)$$

t 时段系统运行能耗 $P_{R,t}^{\text{CCS}}$ 为:

$$P_{R,t}^{\text{CCS}} = e_G \lambda_{\text{GE}} \eta_t \sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i,t} \quad (4)$$

该能耗所捕集的 CO_2 量 $Q_{1,t}$ 为:

$$Q_{1,t} = e_G \eta_t \sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i,t} \quad (5)$$

其中, e_G 为单位碳排放强度; λ_{GE} 为捕集单位 CO_2 所消耗的电功率,可视为常数; η_t 为 t 时段碳捕集率; $P_{G_i,t}$ 为 P2G-CCPP 系统第 i 台发电机组在 t 时段的发电功率; N_G 为系统火电机组的台数。

b. CO_2 利用量与甲烷合成量。

式(5)所捕集 CO_2 中,有部分用于 P2G,实现碳的再利用,该部分为利用量 Q_{CO_2} 。由式(2)可知, CO_2 和甲烷的体积相等,因此,一时段内:

$$Q_{\text{CO}_2} = \rho_{\text{CO}_2} V_{\text{CH}_4} \quad (6)$$

其中, ρ_{CO_2} 为 CO_2 的密度; V_{CH_4} 为甲烷的体积,计算公式如式(7)所示。

$$V_{\text{CH}_4} = 3.6 \varphi_{\text{P2G},t} P_{\text{P2G},t} / H_g \quad (7)$$

其中, $\varphi_{\text{P2G},t}$ 为 P2G 设备的转换效率; H_g 为天然气热值,取 39 MJ/m^3 ; $P_{\text{P2G},t}$ 为 P2G 设备 t 时段合成甲烷所需能量,该功率可取自电网,更应采用电网弃风时

段功率,即消纳风电。

2.2 P2G 碳原料捕集及封存降耗的碳成本

2.2.1 碳排放权成本

在碳交易市场中,对企业设置碳排放权配额,气体排放实行总量管控。对超出配额的排放设立惩罚,则碳排放权成本^[8]为:

$$f_{11} = \sum_{t=1}^T \left\{ S_t \left[e_C (1 - \eta_t) \sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i,t} - E \right] \right\} \quad (8)$$

其中, f_{11} 为碳排放权成本; S_t 为碳排放权在优化日 t 时段的交易价格; T 为调度周期,取 24 h; E 为分配的碳排放权配额,即机组可排放碳额度^[12]。机组调节碳捕集率 η_t , 控制碳排放量与碳捕集量,实现机组优化运行。

2.2.2 碳捕集成本与碳利用后的封存成本

a. 碳捕集成本函数。

由于碳捕集系统需要大量捕集能耗,若未安装碳捕集系统,则该部分能量可以出售获利,因此安装碳捕集系统后损失的售电利益即为碳捕集成本:

$$f_{12} = \sum_{t=1}^T C_{e,t} P_{CO_2,t} \quad (9)$$

其中, f_{12} 为碳捕集成本; $C_{e,t}$ 为 t 时段的上网电价。

b. 碳利用后的封存成本函数。

现有文献对 CCS 技术的研究集中在碳捕集阶段,对捕集之后的封存研究较少,通过 P2G 实现捕集碳量再利用,其封存成本将降低。碳捕集系统捕集 CO_2 后通过一系列途径封存 CO_2 , 从而减少 CO_2 向大气中的排放,减缓大气污染和温室效应,但封存技术所带来的长距离运输成本高昂,且存在封存泄漏爆炸及对生物环境产生危害的风险,因此考虑将捕集到的 CO_2 中一部分用于 P2G 设备的生产,实现 CO_2 的回收利用,剩余部分采用上述渠道封存,减少封存量。未来随着 P2G 技术的不断进步, CO_2 的回收利用率将越来越多,碳利用后的封存成本将逐步下降,亦可避免封存的风险问题。碳利用后的封存成本表示为:

$$f_{13} = \sum_{t=1}^T C_{le} (Q_{1,t} - Q_{CO_2,t}) \quad (10)$$

其中, f_{13} 为碳封存成本; C_{le} 为碳封存成本系数; $Q_{1,t}$ 为 t 时段的碳捕集量; $Q_{CO_2,t}$ 为 t 时段供给 P2G 设备的 CO_2 利用量。

2.2.3 碳成本

系统在整个调度周期内产生的碳成本可表示为:

$$f_1 = f_{11} + f_{12} + f_{13} = \sum_{t=1}^T \left\{ S_t \left[e_C (1 - \eta_t) \sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i,t} - E \right] + C_{e,t} P_{CO_2,t} + C_{le} (Q_{1,t} - Q_{CO_2,t}) \right\} \quad (11)$$

2.3 考虑碳利用的 P2G-CCPP 系统建模

2.3.1 目标函数

考虑碳利用的 P2G-CCPP 系统的碳成本、燃料成本、弃风成本、P2G 成本,建立 P2G-CCPP 系统综合成本最小模型,目标函数为:

$$F = \min \sum_{t=1}^T [f_1 + f_2(P_{G_i,t}) + f_3 + C_{P2G} P_{P2G,t}] \quad (12)$$

其中, F 为综合成本; $f_2(P_{G_i,t})$ 为 P2G-CCPP 系统燃料成本,采用机组成本耗费曲线表示^[14]; C_{P2G} 为 P2G 设备的运行成本系数,包括人员管理、机组启停、技术成本等,可用功率运行成本^[16]定量描述; $P_{P2G,t}$ 为 t 时段 P2G 运行功率; f_3 为弃风成本,如式(13)所示。

$$f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{w'=1}^{N_w} C_{curt,w'} Q_{w'} \quad (13)$$

其中, N_w 为风电场数量; $C_{curt,w'}$ 为风电场 w' 的弃风成本系数; $Q_{w'}$ 为弃风电量,计算公式如式(14)所示^[15]。

$$Q_{w'} = \sum_{t=1}^T \int_{P_u(t)}^{P_w^{\max}} \varphi(P_{w'}(t)) (P_{w'}(t) - P_u(t)) dP_{w'}(t) \quad (14)$$

其中, $P_u(t)$ 为系统可控机组 t 时段的上调容量; P_w^{\max} 为风电场装机容量; $P_{w'}(t)$ 为风电场 t 时段预测出力。

2.3.2 约束条件

a. 功率平衡约束。

CCPP 的发电量与风电场实际出力必须满足系统负荷才能保证电力系统正常运行,即:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i} + P_w = P_{CO_2} + P_{P2G} + P_e \quad (15)$$

b. 运行约束。

每台发电机组都有自己的出力上下限,即:

$$P_{G,i,\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i,\max} \quad (16)$$

其中, $P_{G,i,\max}$ 和 $P_{G,i,\min}$ 分别为第 i 台发电机组有功出力的上、下限。

P2G 设备的出力由其容量决定,即:

$$P_{P2G,\min} \leq P_{P2G} \leq P_{P2G,\max} \quad (17)$$

其中, $P_{P2G,\max}$ 和 $P_{P2G,\min}$ 分别为 P2G 设备有功出力的上、下限。

c. 碳约束。

P2G 设备利用的 CO_2 量全部来自碳捕集量,因此约束为:

$$0 \leq Q_{CO_2} \leq Q_1 \quad (18)$$

碳捕集率的上下限约束为:

$$\eta_{t,\min} \leq \eta_t \leq \eta_{t,\max} \quad (19)$$

其中, $\eta_{t,\max}$ 和 $\eta_{t,\min}$ 分别为碳捕集机组碳捕集率的上、下限。

d. 机组爬坡约束。

机组爬坡约束,即机组相邻 2 个时段的机组出力之差要小于一定的值,当差值过大会使发电机跟不上发电出力的变化,即:

$$\begin{cases} P_{Gi,t} - P_{Gi,t-1} \leq P_{Gi,UR} \\ P_{Gi,t-1} - P_{Gi,t} \leq P_{Gi,DR} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $P_{Gi,UR}$ 和 $P_{Gi,DR}$ 分别为第 i 台机组的最大增加和减小出力速率。

3 算例仿真

假设某地区典型日的负荷曲线及风电场预测出力分别如图 4、图 5 所示^[17-18]。碳捕集机组碳捕集率的上、下限值分别取 $\eta_{t,\max} = 0.9$ 、 $\eta_{t,\min} = 0$, 单位碳排放强度 $e_c = 0.76 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h})$, $\lambda_{GE} = 0.23 \text{ MW} \cdot \text{h}/\text{t}$, $P_B^{CCS} = 15 \text{ MW}$, 碳封存成本系数为 $C_{le} = 4.89 \text{ \$/t}$, 该地区碳排放权价格为 $29 \text{ \$/t}$; 弃风成本系数 $C_{curt,w} = 100 \text{ \$/}(\text{MW} \cdot \text{h})$ ^[19]; P2G 的运行成本系数为 $20 \text{ \$/MW}$ ^[20], P2G 运行容量取 50 MW 。

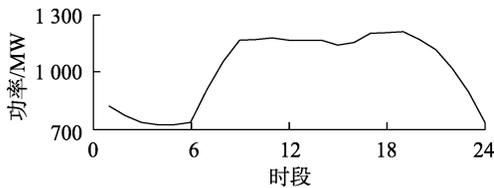


图 4 各时段负荷曲线

Fig.4 Load in different periods

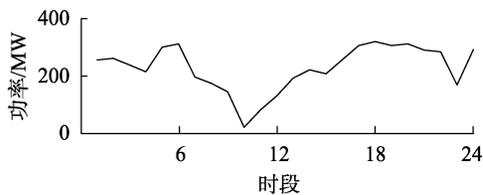


图 5 各时段风电场预测出力曲线

Fig.5 Output power forecasting of wind farm in different periods

3.1 场景设置

设置 3 种场景进行对比分析: 场景 1 不考虑 P2G, 只考虑 CCPP, 即 CCPP 系统; 场景 2 考虑 P2G, 不考虑 CCPP, 即 P2G 系统; 场景 3 考虑 P2G 设备与 CCPP, 即 P2G-CCPP 系统。

3.2 P2G 配置 50 MW 容量下不同场景的功率曲线及成本分析

上述 3 个场景下火电机组出力、弃风功率变化情况分别如图 6、图 7 所示, 不同场景下系统综合成本、碳成本、燃料成本、弃风成本、P2G 成本如表 1 所示。

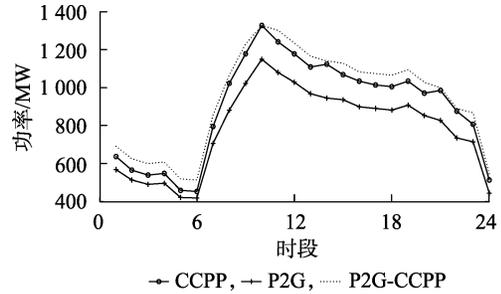


图 6 不同场景下火电机组发电功率曲线

Fig.6 Output power of thermal power unit under different scenarios

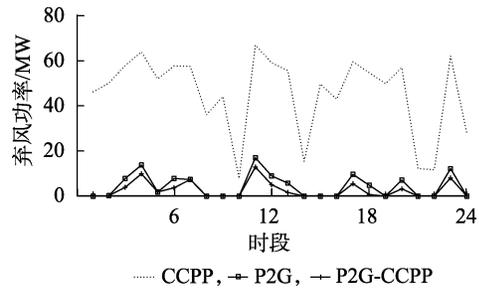


图 7 不同场景下弃风功率曲线

Fig.7 Wind power curtailment under different scenarios

表 1 不同场景优化结果

Table 1 Optimization results of different scenarios

参数	CCPP	P2G	P2G-CCPP
综合成本 F	1 001 275.34	1 084 766.85	964 840.48
碳成本 f_1	39 876.68	369 051.05	16 243.15
燃料成本 f_2	851 844.76	683 690.33	922 469.73
弃风成本 f_3	109 553.90	10 272.05	6 271.23
P2G 成本 f_4	0	21 753.42	19 856.37

分析图 6、图 7 可知, P2G-CCPP 系统机组出力最大, 弃风功率最少。P2G-CCPP 系统需消耗碳捕集能耗, 因此机组出力最大, 第 10 时段风电预测出力最小, 为满足负荷需求, 机组出力达到最大值; P2G 系统火电机组出力低于 CCPP、P2G-CCPP 系统, 是因为不需要提供碳捕集能耗, P2G 能耗由风电场弃风功率提供, 与火电机组出力无关。CCPP、P2G 和 P2G-CCPP 系统的弃风功率依次减少, 这是由于 CCPP 按预测风电出力制定计划, 其可调节能力取决于发电机的功率调节范围, 故无法消纳超过调节范围的风功率, 其弃风功率最大。P2G 系统风电消纳能力取决于 P2G 的最大运行容量, P2G-CCPP 系统的调节能力取决于 P2G 的最大运行容量和碳捕集率上限, 其调节能力比另外 2 个系统强, 故其弃风功率最小。结合表 1 分析可知, 相较单纯的 P2G 系统, P2G-CCPP 系统消纳风电能力提高了 38.95%, 充分验证了 P2G-CCPP 能够极大提高系统风电消纳能力。

含 P2G 设备的情况下, P2G-CCPP 系统成本降低了 8.72%, 这是因为 P2G-CCPP 系统中碳捕集装

置为 P2G 设备提供 CO_2 , 从而节省了 P2G 设备购买 CO_2 的成本; P2G 系统燃料成本最低是因为该系统不需要向碳捕集系统提供捕集能耗; P2G 系统的碳成本达到了 P2G-CCPP 系统的 22.72 倍, 这是因为常规机组无碳捕集装置, 产生的 CO_2 全部排放, 导致巨额环境成本。虽然 P2G-CCPP 系统燃料成本高于 P2G 系统, 但综合成本仍然低于 P2G 系统 11.06%, 较 CCPP 系统降低了 3.64%。仿真结果表明, P2G-CCPP 系统综合成本最低, 系统运行经济性最好。

3.3 不同场景下碳捕集量比较

碳捕集量可以直观反映系统的碳排放水平, 捕集量越多, 说明碳排放越少, 对降低环境成本、减缓温室效应、节能减排效果越明显。图 8 分析了 3 个场景下碳捕集量的变化。

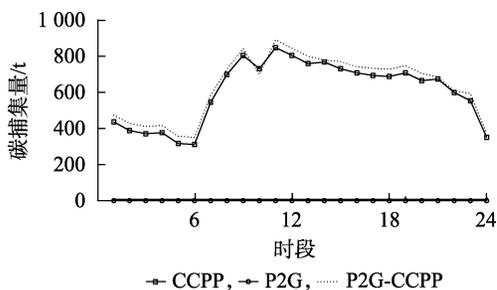


图 8 不同场景下碳捕集量比较

Fig.8 Comparison of carbon capture among different scenarios

从图 8 中可以看出, P2G-CCPP 系统碳捕集量除了第 10 时段外其他时段均高于 P2G、CCPP 系统, 相较 CCPP 捕集量更多的原因在于 P2G 需要消耗 CO_2 , 捕集的 CO_2 用于 P2G 甲烷化反应生成甲烷。之所以第 10 时段 P2G-CCPP 碳捕集量低于 CCPP 系统, 是因为此时段风电出力达到最低值, 则 P2G 出力最小, 碳利用量最少, 碳捕集量因此较低, 而 CCPP 系统不受 P2G 影响, 碳捕集系统持续运行, 因此该时段 CCPP 系统碳捕集量高于 P2G-CCPP 系统。图中 P2G 系统没有碳捕集装置, 因此碳捕集量为 0, 产生的 CO_2 全部排出, 产生巨额的环境成本, 如表 1 所示。P2G-CCPP 系统对降低碳排放效果显著。

3.4 P2G 容量对碳利用量、弃风功率的影响

在 CCPP 和风电场容量确定的情况下, 分析 P2G 设备的不同容量对碳利用量及弃风功率的影响, 分别如图 9、图 10 所示。

选取 P2G 容量 30 MW、50 MW、70 MW 进行比较。P2G 容量选取为 30 MW 时, 当风电场实际出力与预测出力之差高于 30 MW, P2G 出力达到最大值, 碳利用量保持稳定, 当风电场实际出力与预测出力之差低于 30 MW 时, P2G 出力跟随风电场实际出力与预测出力之差变化, 则碳利用量也随之变化, 从图 10 可以看出, 10、14、21、22 这 4 个时段弃风功率为

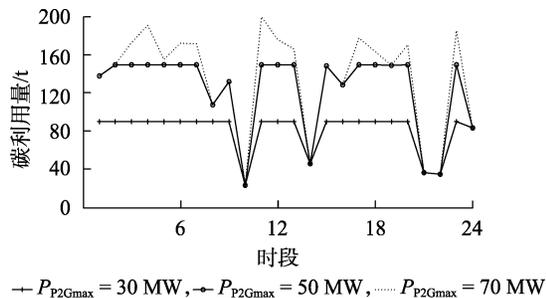


图 9 不同 P2G 容量下碳利用量变化

Fig.9 Carbon sequestration variation for different P2G capacities

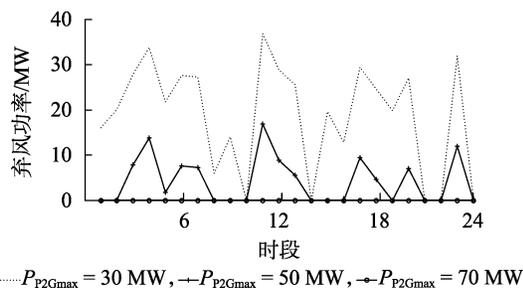


图 10 不同 P2G 容量下弃风功率变化曲线

Fig.10 Wind power curtailment variation for different P2G capacities

0, 因此碳利用量有不同程度的下降。随着 P2G 设备容量增大, P2G 设备能消耗更多的 CO_2 , 同时消纳更多弃风功率。P2G-CCPP 系统碳利用量逐步增加, 则碳封存量逐渐减少, 可避免因封存或封存泄漏产生更多的成本及对生物环境产生危害的风险。当 P2G 容量增加到 70 MW 时, 弃风功率为 0, 弃风全部被消纳。仿真结果表明, 对不同的 CCPP 和风电场选用不同容量的 P2G 设备, 可以使系统运行最优。

4 结论

a. 所提出的 P2G-CCPP 系统中, P2G 技术为 CCPP 提供了 CO_2 再利用的途径, CCPP 为 P2G 提供 CO_2 原料, P2G 所需转换能量、捕集能耗等可充分利用弃风功率。

b. CCPP 捕集的 CO_2 中一部分被用于 P2G 再利用, 降低了 CO_2 封存量, 减少了碳封存成本, 避免了封存泄漏及对生物环境产生危害的风险。

c. 与单纯 CCPP、P2G 相比, P2G-CCPP 系统极大地提高了系统风电消纳能力, 降低了弃风成本, 经济性更佳, 但是 P2G-CCPP 存在地理距离因素的局限性。

d. P2G-CCPP 中的产品之一甲烷, 可如同一般 P2G 方式, 如城镇、工业供气等被存储和利用, 更可用于电厂配置燃气轮机发电, 快速高效调节峰谷差时的并网功率, 实现快速调峰调频。

e. P2G 容量对 P2G-CCPP 系统的碳利用量及弃

风功率影响较大,针对不同的CCPP和风电场,可选择不同容量的P2G设备,从而达到系统运行最优。随着P2G技术发展和成本降低,P2G-CCPP系统的市场将更加广阔。

参考文献:

- [1] YUAN Y, ZHANG X S, JU P, et al. Determination of economic dispatch of wind farm-battery energy storage system using genetic algorithm[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014, 24(2): 264-280.
- [2] ZHAO Haoran, WU Qiuwei, HU Shuju, et al. Review of energy storage system for wind power integration support [J]. Applied Energy, 2015, 137: 545-553.
- [3] 王业磊, 赵俊华, 文福拴, 等. 具有电转气功能的多能源系统的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 1-10, 65. WANG Yelei, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Market equilibrium of multi-energy system with power-to-gas functions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 1-10, 65.
- [4] GUANDALINI G, CAMPANARI S, ROMANO M C. Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatch ability: energy and economic assessment[J]. Applied Energy, 2015, 147, 117-130.
- [5] 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, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 110-116.
- [6] 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.
- [7] 韩中合, 白亚开. 基于技术经济学的碳捕集系统参数影响分析及优化[J]. 华北电力大学学报, 2015, 42(6): 92-100. HAN Zhonghe, BAI Yakai. Analysis and optimization of parameters in carbon capture system based on technical economics[J]. Journal of North China Electric Power University, 2015, 42(6): 92-100.
- [8] 刘阳升, 周任军, 李星朗, 等. 碳排放权交易下碳捕集机组的厂内优化运行[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 295-300. LIU Yangsheng, ZHOU Renjun, LI Xinglang, et al. Inside-plant optimal operation of carbon capture unit under carbon emission right trade[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 295-300.
- [9] 李杨, 刘伟佳, 赵俊华, 等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3680-3689. LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3680-3689.
- [10] GAHLEITNER G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5): 2039-2061.
- [11] BELDERBOS A, DELARUE E, D'HAESELEER W. Possible role of power-to-gas in future energy systems[C]//European Energy Market. [S.l.]: IEEE, 2015: 1-5.
- [12] 陈启鑫, 季震, 康重庆, 等. 碳捕集电厂不同运行方式的电碳特性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 109-115, 152. CHEN Qixin, JI Zhen, KANG Chongqing, et al. Analysis on relation between power generation and carbon emission of carbon capture power plant in different operation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 109-115, 152.
- [13] LUCQUIAUD M, CHALMERS H, GIBBINS J. Potential for flexible operation of pulverized coal power plants with CO₂ capture [J]. Energy Materials, 2007, 2(3): 175-180.
- [14] 刘卓. 饱和度自适应微分进化算法在电力经济调度中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 100-104. LIU Zhuo. The application of saturation and adaptive differential evolution algorithm in economic dispatching of power grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 100-104.
- [15] 陈皓勇, 王勇超, 裯培正, 等. 含高渗透率风电的微网系统鲁棒经济调度方法[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1104-1111. CHEN Haoyong, WANG Yongchao, XUAN Peizheng, et al. Robust economic dispatch method of microgrid containing high proportion of wind power [J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(8): 1104-1111.
- [16] 张晓辉, 陈钟顺. 热电冷联产系统的能耗特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 94-95. ZHANG Xiaohui, CHEN Zhongshun. Energy consumption performance of combined heat cooling and power system[J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27(5): 94-95.
- [17] 周任军, 刘志勇, 李献梅, 等. 采用多随机变量超分位数方法的机组碳捕集率优化决策[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3006-3010. ZHOU Renjun, LIU Zhiyong, LI Xianmei, et al. Optimal decision of unit carbon capture rate using multiple random variable super-quantile[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3006-3010.
- [18] 贾文昭, 康重庆, 李丹, 等. 基于日前风功率预测的风电消纳能力评估方法[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 69-75. JIA Wenzhao, KANG Chongqing, LI Dan, et al. Evaluation on capability of wind power accommodation based on its day-ahead forecasting[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 69-75.
- [19] 郑静, 文福拴, 李力, 等. 计及风电场和储能系统联合运行的输电系统扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 135-142. ZHENG Jing, WEN Fushuan, LI Li, et al. Transmission system expansion planning considering combined operation of wind farms and energy storage systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 135-142.
- [20] MOSKALENKO N, LOMBARDI P, KOMARNICKI P. Multi-criteria optimization for determining installation locations for the power-to-gas technologies [C] // Proceeding of 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.

作者简介:



周任军

周任军(1964—),女,山西太原人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化、电网规划与运行、新能源接入系统、风险及条件风险、分布式电源规划、低碳电力(E-mail: zrj0731@163.com);

肖钧文(1991—),男,湖南湘乡人,硕士研究生,主要从事电力系统运行与规划、综合能源系统协调优化研究(E-mail: xjwcsust@163.com)。

Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant

ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, ZHENG Quanguo, LÜ Jia, CAO Junbo

(Hunan Province Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The power-to-gas technology, as a new type of energy conversion and storage, provides a new way for renewable energy accommodation, and its required CO₂ for generating methane can be efficiently and economically got from the carbon collection amount of carbon capture units. The power-to-gas-carbon capture power plant is taken as a whole system, and its coordinated optimization model is built, which takes the carbon cost, fuel cost, abandoned wind cost and power-to-gas cost as the objectives, and the carbon capture rate, active power output of carbon capture power plant and power-to-gas active power as the decision variables. Simulative results show that, the power-to-gas-carbon capture power plant improves the wind power accommodation ability, reduces the carbon emission, improves the carbon utilization level, and reduces the power-to-gas operation cost.

Key words: power-to-gas; renewable energy accommodation; carbon capture; carbon utilization; optimal operation; costs; models

(上接第42页 continued from page 42)

[21] 毛鹏, 谢少军, 许泽刚. IGBT 模块的开关暂态模型及损耗分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 40-47.

MAO Peng, XIE Shaojun, XU Zegang. Switching transients model and loss analysis of IGBT module[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(15): 40-47.

作者简介:

周念成(1969—),男,重庆人,教授,博士,从事电力系统



周念成

自动化、电能质量方面的教学和研究工作
(E-mail: cee_nczhou@cqu.edu.cn);

苏宇(1994—),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化和电能质量(E-mail: 415397022@qq.com)。

Parameter design and analysis of IGBT-based on-load tap changers for distribution transformer

ZHOU Niancheng¹, SU Yu¹, WANG Qianggang¹, GE Junkai², GAO Junqing³, ZHANG Jing³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Yuhang Power Supply Company of State Grid Zhejiang Hangzhou Electric Power Company, Hangzhou 311100, China;

3. Zhejiang Truly Electric Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: The structural characteristics of mechanical, hybrid and full-electronic OLTC (On-Load Tap Changer) for distribution transformer are compared, and then the OLTC circuit structure and control scheme are proposed based on IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) for distribution transformer. The parameter design methods of IGBT devices, transition circuit and absorption circuit of proposed OLTC are given, and the calculation formula of active power loss of proposed OLTC is deduced. The proposed OLTC scheme overcomes the shortcomings of mechanical OLTC, such as the slow operation, switching arcing, and can assist the distribution transformer to realize fast and non-arc on-load voltage regulation. The simulation model and experimental platform are built to test the voltage regulation performance of the proposed OLTC and analyze the influence of the switch parameters on the active power loss and IGBT tolerable current and voltage. The simulative, experimental and theoretical calculation results are compared to verify the effectiveness of the proposed IGBT scheme.

Key words: distribution transformer; on-load tap changer; Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT); parameter design; active power loss