

# 含 P2G 的多能源网优化调度研究

樊国旗<sup>1</sup>, 霍超<sup>2</sup>, 李小腾<sup>3</sup>, 刘斌<sup>4</sup>, 樊国伟<sup>5</sup>, 程林<sup>2</sup>, 王志远<sup>5</sup>, 潘伟东<sup>1</sup>

(1. 国网金华供电公司, 浙江 金华 321001; 2. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048;  
3. 国网陕西省电力公司科学研究院, 陕西 西安 710010; 4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 5. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**针对联络线功率约束导致的弃风和供电缺口问题,文中提出一种含电转气(P2G)的多能源网优化调度方法,新建燃气轮机解决供电缺口问题,新建P2G设备解决弃风问题。首先,分析不同地区弃风和供电缺口原因;然后,建立P2G设备、燃气轮机和多能源网调度模型,通过某地区实际算例验证所提调度方法的有效性。此外对P2G设备和燃气轮机功率的灵敏度进行分析,并通过原弃风功率概率分布和原供电缺口概率分布分析其灵敏性特性的原因。

**关键词:**P2G; 供电缺口; 新能源消纳; 概率分布; 敏感性分析

**中图分类号:**TM 734 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)02-0067-07

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220213

## Research on Optimal Dispatch of Multi-energy Grid Considering P2G

FAN Guoqi<sup>1</sup>, HUO Chao<sup>2</sup>, LI Xiaoteng<sup>3</sup>, LIU Bin<sup>4</sup>, FAN Guowei<sup>5</sup>, CHENG Lin<sup>2</sup>,  
WANG Zhiyuan<sup>5</sup>, PAN Weidong<sup>1</sup>

(1. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321001, Zhejiang, China;  
2. Northwest Branch of Stated Grid Cooperation of China, Xi'an 710048, Shaanxi, China;  
3. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710010, Shaanxi, China;  
4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;  
5. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China)

**Abstract:** Aiming at the problems about wind abandonment and power supply gap caused by transmission limit, an optimal dispatch method of multi-energy grid considering power to gas(P2G) is proposed. Gas turbine is built to solve the power supply gap problem, and P2G equipment is built to solve the wind abandonment problem. Firstly, the reasons for wind abandonment and power supply gap in different regions are analyzed, and then the models of P2G equipment, gas turbine and multi-energy grid dispatch are established. The effectiveness of the proposed dispatch method is verified by a practical example in a certain area. Furthermore, power sensitivity of P2G equipment and gas turbine is analyzed, and the reasons for their sensitivity characteristics is analyzed by the probability distribution of the original wind abandonment and the original power supply gap.

**Key words:** P2G; power supply gap; new energy consumption; probability distribution; sensitivity analysis

## 0 引言

电网互联可以提高不同地区之间的互济能力<sup>[1]</sup>。随着新能源的大规模接入和负荷的快速增长,受到电网传输能力等因素约束,系统不能满足调峰需要,出现弃风和供电缺口问题<sup>[2-4]</sup>。

针对此类问题,文献[5]利用能量流角度在电-热系统中引入电转气(power to gas,P2G)设备,促进风电消纳,减少系统成本;文献[6]通过场景法表征风电不确定特性,利用P2G装置实现电气互联和能量耦合调度,提高风电利用率;文献[7]构建含P2G多能量网络模型,利用不同季节典型日负荷及风电预测曲线检验模型的有效性和经济性;文献[8]利用多能量耦合特性优化调度,减少弃风弃光;文献[9-10]利用跨区电网和气网互联调度,减小系统峰

谷差,实现资源优化配置,增强系统互济能力。

上述文献多通过 P2G 设备实现多能源网络优化调度或者跨区互联,较少能针对夏季负荷和风电特性,解决不同地区能源不平衡问题。因此,下面提出一种含 P2G 的多能源网优化调度方法,利用 P2G 技术解决风电与负荷不匹配导致弃风问题,并通过燃机实现冷电联合调度解决电网供电能力不足问题;通过对燃气轮机消耗天然气和 P2G 设备产生天然气平衡进行控制,减少对天然气流影响;通过某跨区电网实际算例验证所提方法的有效性。

## 1 弃风与供电缺口问题分析

由于输电通道(地区和主网之间)传输功率约束,负荷高峰时段出现供电缺口,调峰能力不足,只能采取限负荷的方法。在风电大发的高峰时段,本地电网消纳能力不足,调峰能力受限,且外送通道限制,会导致弃风。为分析地区 1 风电消纳能力不足、地区 2 供电能力不足的电网特性,将该地区电网简化如图 1 所示: $G_1$ 、 $G_2$  分别表示地区 1、地区 2 发电机组; $L_1$ 、 $L_2$  分别表示地区 1、地区 2 负荷。

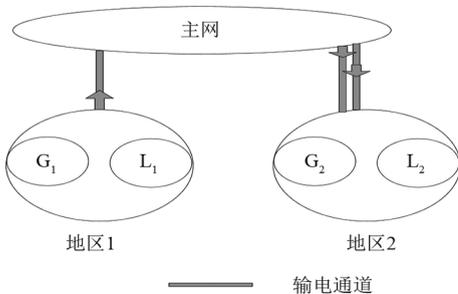


图 1 简化电网

风电消纳空间如式(1)表示。

$$P_{wind,r,t} = P_{L,t} + P_{trans,t} - P_{f,min} \quad (1)$$

式中: $P_{wind,r,t}$  为风电消纳空间; $P_{L,t}$  为负荷功率; $P_{trans,t}$  为联络线传输功率; $P_{f,min}$  为火电机组最小技术出力。

弃风功率如式(2)所示,弃风电量  $W_{wind,a}$  如式(3)所示,弃风率计算如式(4)所示。

$$P_{wind,a,t} = \max(P_{wind,t} - P_{wind,r,t}, 0) \quad (2)$$

$$W_{wind,a} = \sum_{t=1}^T P_{wind,a,t} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\sum_{t=1}^T P_{wind,a,t}}{\sum_{t=1}^T P_{wind,t}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\sigma$  为弃风率; $P_{wind,a,t}$  为风电限电功率; $P_{wind,t}$  为风电理论功率; $T$  为风电限电总时间。

最大供电能力  $P_{TSC}$  (total supply capability, TSC) 为机组最大技术出力加上联络线通道传输功率,如式(5)表示。

$$P_{TSC} = P_{f,max} + P_{trans,t} \quad (5)$$

式中, $P_{f,max}$  为机组可用最大技术出力。

供电缺口功率  $P_{L,a,t}$  如式(6)所示,供电缺口电量  $W_{L,a}$  如式(7)所示。

$$P_{L,a,t} = \max(P_{L,t} - P_{TSC}, 0) \quad (6)$$

$$W_{L,a} = \sum_{t=1}^{T_1} P_{L,a,t} \quad (7)$$

式中, $T_1$  为供电缺口总时间。供电不满足要求的时段(即出现供电缺口时段)记为 1,供电满足要求时段记为 0。供电缺口状态  $\sigma_t$  判断如式(8)所示,结合文献[11]安全域提出供电缺口率  $\gamma_t$  如式(9)所示。

$$\sigma_t = \begin{cases} 1, & P_{L,a,t} > 0 \\ 0, & P_{L,a,t} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\gamma_t = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{T_1} \sigma_t \times 100\% \quad (9)$$

式中, $N$  为供电时段总数。

## 2 含 P2G 的多能源网优化调度

### 2.1 含 P2G 的多能源网框架

含 P2G 的多能源网如图 2 所示,地区 1 包括火电机组、风电机组和 P2G 设备,地区 2 包括火电机组、燃气轮机、电制冷机及蓄冷器。P2G 装置主要包括两个功能:地区 1 风电消纳能力不足时,电转气促进风电消纳;地区 2 供电能力不足时,通过电-气-电途径解决,天然气流和电力流在图中用箭头表示。

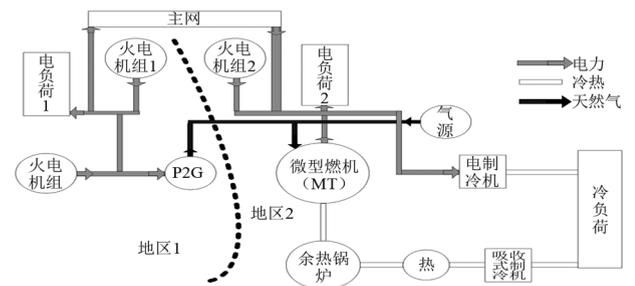


图 2 含 P2G 的多能源网

### 2.2 电气耦合框架

电气耦合元件包括燃气轮机和 P2G,燃气轮机将天然气转化为电能,P2G 将电转化为氢气,然后

甲烷化得到燃气。

### 2.2.1 气冷电能源模型

气冷电能源模型中包括燃气轮机和电制冷机,燃气轮机能量转化如式(10)所示。

$$f_{MT,t} = \frac{P_{MT,t}}{\eta_{MT,e} \times H_G} \quad (10)$$

式中:  $f_{MT,t}$  为燃气轮机天然气消耗流量;  $P_{MT,t}$  为燃气轮机电功率;  $\eta_{MT,e}$  为燃气轮机发电效率;  $H_G$  为天然气热值。

燃气轮机发电成本  $C_{MT}$  如式(11)所示。

$$C_{MT} = a(P_{MT,t} + \gamma D_{MT,t})^2 + b(P_{MT,t} + \gamma D_{MT,t}) + c \quad (11)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为机组能耗系数;  $\gamma$  为冷电功率变化相对量;  $P_{MT,t}$ 、 $D_{MT,t}$  分别为微型燃气轮机电、冷功率。

燃气轮机发电功率和制冷功率关系  $K_{MT}$  如式(12)所示,燃气轮机机组电(热)爬坡功率  $R_{P(D)MT,t}$  约束和电(热)功率上下限  $P(D)_{MT,t}$  约束如式(13)一式(14)所示,燃气轮机功率运行区域如图3所示。

$$K_{MT} = \frac{D_{MT,t}}{P_{MT,t} \times 3600} \quad (12)$$

$$R_{P(D)MT,\min} \leq R_{P(D)MT,t} \leq R_{P(D)MT,\max} \quad (13)$$

$$P(D)_{MT,\min} \leq P(D)_{MT,t} \leq P(D)_{MT,\max} \quad (14)$$

式中:  $R_{P(D)MT,\max}$ 、 $R_{P(D)MT,\min}$  分别为燃气轮机电(冷)最大、最小爬坡功率;  $P(D)_{MT,\min}$ 、 $P(D)_{MT,\max}$  分别为燃气轮机电(冷)最大、最小功率。

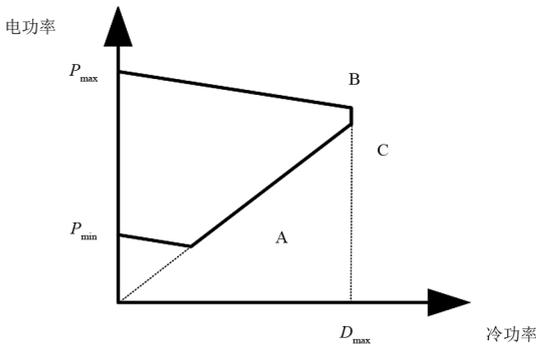


图3 燃气轮机功率运行区域

冷负荷功率由燃气轮机冷负荷和电制冷机负荷组成,如式(15)所示。

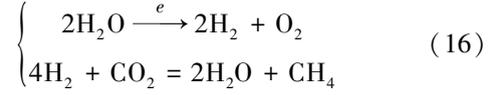
$$P_{L,c,t} = P_{L,c,e,t} + D_{MT,t} \quad (15)$$

式中:  $P_{L,c,t}$  为总冷负荷;  $P_{L,c,e,t}$  为电制冷机冷负荷。

### 2.2.2 P2G 设备-电气能源模型

P2G 转化化学方程式如式(16)所示,能量转化

如式(17)所示。



$$F_{P2G,t} = \frac{P_{P2G,t} \times \eta_{P2G}}{H_G} \quad (17)$$

式中:  $F_{P2G,t}$  为 P2G 设备产生天然气产量;  $\eta_{P2G}$  为 P2G 能量转化效率;  $P_{P2G,t}$  为 P2G 设备功率。

P2G 设备产生天然气需要同时满足地区 1 和地区 2 需要,因此

$$P_{P2G,t} = \max(P_{P2G,1,t}, P_{P2G,2,t}) \quad (18)$$

式中,  $P_{P2G,1,t}$  和  $P_{P2G,2,t}$  分别为地区 1 和地区 2 的 P2G 设备所需功率。地区 1 的 P2G 设备所需功率等于减少弃风功率;地区 2 的 P2G 设备所需功率等于供电缺口减少功率。

P2G 设备功率约束如式(19)所示。

$$P_{P2G,\min} \leq P_{P2G,t} \leq P_{P2G,\max} \quad (19)$$

式中,  $P_{P2G,\min}$ 、 $P_{P2G,\max}$  分别为 P2G 设备最小、最大技术出力。

## 3 分层优化调度模型

### 3.1 调度目标

电网调度任务为保障电网安全运行,减少供电缺口;支撑新能源消纳,减少新能源限电;实现电网经济高效运行,减少运行成本。为解决地区 1 出现的新能源弃风问题和地区 2 的供电缺口问题,通过新建 P2G 装置,将地区 1 弃风时段电量转化为天然气通过天然气管网在地区 2 消纳。通过新建燃气轮机,提高供电能力支撑减少供电缺口,提高冷负荷减少电负荷间接减少供电缺口。

调度目标为系统成本最小。

$$C_{\text{总}} = C_{\text{wind,a}} + C_{L,a} + C_{MT} + C_{P2G} + C_f + C_{\text{主下}} \quad (20)$$

式中:  $C_{\text{wind,a}}$  为弃风成本;  $C_{L,a}$  为供电缺口成本;  $C_{MT}$  为燃气轮机成本;  $C_{P2G}$  为调用 P2G 装置增加成本;  $C_f$  为火电机组运行成本;  $C_{\text{主下}}$  为主网下网成本。

$$C_{\text{wind,a}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{wind,a,t}} \times c_{\text{wind,a}} \quad (21)$$

$$C_{L,a} = \sum_{t=1}^{T_1} P_{L,a,t} \times c_{L,a} \quad (22)$$

$$C_{P2G} = \sum_{t=1}^{T_2} P_{P2G,t} \times c_{P2G} \quad (23)$$

$$C_f = \sum_{t=1}^{T_3} \sum_{i=1}^N (d_i \times P_{f,i}^2 + e_i \times P_{f,i} + \varepsilon_i) \quad (24)$$

$$C_{\text{主下}} = \sum_{t=1}^{T_4} P_{\text{主下},t} \times c_{\text{主下}} \quad (25)$$

式中:  $c_{\text{wind},a}$ 、 $c_{L,a}$ 、 $c_{P2G}$ 、 $c_{\text{主下}}$  分别为弃风、供电缺口、调用 P2G 设备和主网下网功率的单位成本;  $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  分别为 P2G 设备运行总时间、火电机组运行总时间和主网下网总时间;  $d_i$ 、 $e_i$ 、 $\varepsilon_i$  分别为火电机组成本系数;  $P_{\text{主下},t}$  为主网下网功率。

### 3.2 约束条件

约束条件包括:地区 1 和地区 2 电功率平衡约束,见式(26)一式(27);天然气流量平衡约束,见式(28);联络线功率约束,见式(29);火电机组爬坡约束,见式(30);火电机组功率约束,见式(31)。

$$\sum_{i=1}^N P_{f,i,t} + P_{\text{wind},t} + P_{\text{trans},t} - P_{P2G,t} = P_{L,t} + P_{\text{wind},a,t} \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{f,i,t} + P_{\text{MT},t} + P_{\text{trans},t} = P_{L,t} + P_{1,a,t} \quad (27)$$

$$F_{P2G,t} = f_{\text{MT}} \quad (28)$$

$$-P_{\text{trans},k,\text{max}} \leq P_{\text{trans},k,t} \leq P_{\text{trans},k,\text{max}}, \quad k = 1, 2 \quad (29)$$

$$R_{f,i,\text{min}} \leq R_{f,i,t} \leq R_{f,i,\text{max}} \quad (30)$$

$$P_{f,i,\text{min}} \leq P_{f,i,t} \leq P_{f,i,\text{max}} \quad (31)$$

式中:  $F_{P2G,t}$  为 P2G 量设备天然气制造量;  $P_{\text{trans},k,\text{max}}$  为地区  $k$  与主网联络线最大传输功率,结合图 2,地区 1 电力流上网为正方向,地区 2 电力流下网为正方向;  $R_{f,i,\text{min}}$  和  $R_{f,i,\text{max}}$  分别为第  $i$  台火电机组最小、最大爬坡功率;  $P_{f,i,\text{min}}$  和  $P_{f,i,\text{max}}$  分别为第  $i$  台火电机组最小、最大技术出力。

## 4 算例分析

### 4.1 地区情况

地区 1、地区 2 负荷和风电如图 4、图 5 所示。燃气轮机冷电功率变化相对量为 0.15;发电功率和制冷功率关系为 0.75;发电效率为 0.33;机组能耗成本系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为 0.053 2、90.12、7 175.4;最大、最小电功率分别为 60 MW 和 10 MW;最大、最小冷功率分别为 60 MW 和 0;最大电(冷)爬坡功率为 45 MW。地区 1 与主网最大传输功率为 200 MW,地区 2 与主

网最大传输功率为 700 MW。火电机组成本系数  $d$ 、 $e$ 、 $\varepsilon$  分别为 0.078 42、139.3、9 604.4;最大、最小功率分别为 300 MW 和 150 MW;最大电(冷)爬坡功率为 110 MW。弃风成本为 600 元/MWh;限负荷成本为 4000 元/MWh(参考负荷参与需求侧响应单价);主网下网功率成本为 250 元/MWh;P2G 设备功率为 140 MW,P2G 设备调用功率成本为 200 元/MWh。

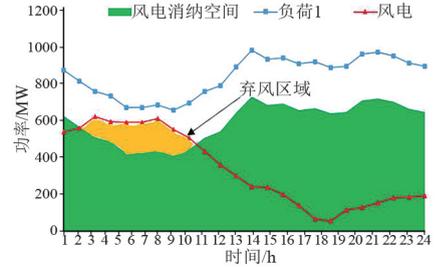


图 4 地区 1 风电消纳

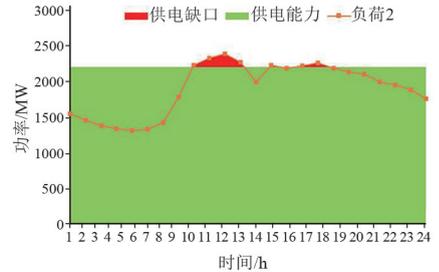


图 5 地区 2 供电

### 4.2 仿真验证

所研究问题为非线性规划模型问题,调度时间粒度为 5 min,采用 LINGO11 求解。地区 1 最大等效负荷(地区 1 负荷与风电差值)为 856 MW,地区 1 最大传输功率为 200 MW,因此地区 1 火电机组最大供电能力需要大于 656 MW,则地区 1 火电机组 300 MW 开机 3 台,最大开机功率为 900 MW,地区 1 原调度情况和图 4 相同。地区 1 调用 P2G 设备前后弃风对比如图 6 所示。

由图 6 计算可知,P2G 设备参与调度后弃风电量为 86.6 MWh;弃风率为 1.06%,满足国家弃风率小于 5%要求,弃风率降低了 90.6%;最大弃风功率为 35.2 MW,相对原最大弃风功率降低 79.9%。

地区 1 的 P2G 设备参与调度前后联络线功率不变;P2G 设备参与调度会增加地区 1 火电机组功率,因此地区 1 火电机组功率在 P2G 设备参与调度前后会发生变化。地区 1 联络线功率和 P2G 设备参与调度火电机组功率如图 7 所示。

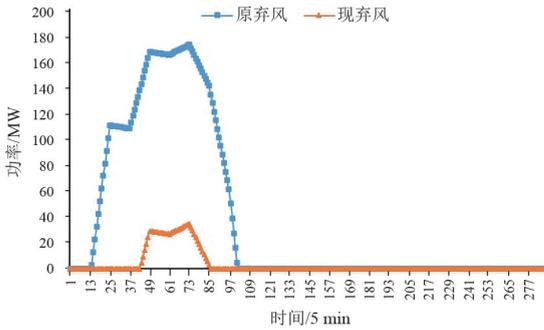


图 6 地区 1 P2G 设备参与调度前后弃风对比

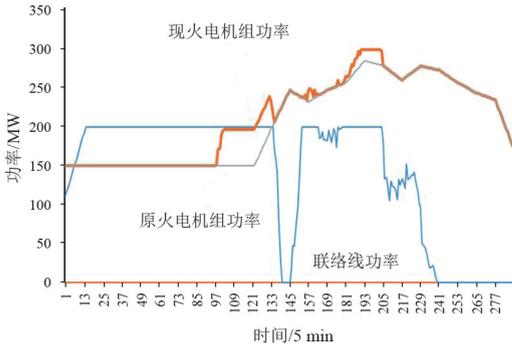


图 7 地区 1 联络线功率 P2G 设备参与调度前后火电机组功率

地区 2 最大负荷为 2 411.2 MW,地区 2 最大传输功率为 700 MW,因此地区 2 火电机组最大供电能力需要大于 1 711.2 MW,则地区 2 火电机组 300 MW 应开机 6 台,由于地区 2 火电机组只有 5 台,最大开机功率为 1500 MW,地区 2 原调度情况和图 5 相同。调用燃气轮机前后原供电缺口、现供电缺口对比和地区 1 火电机组为 P2G 设备制造天然气转化为地区 2 电+热能力如图 8 所示。

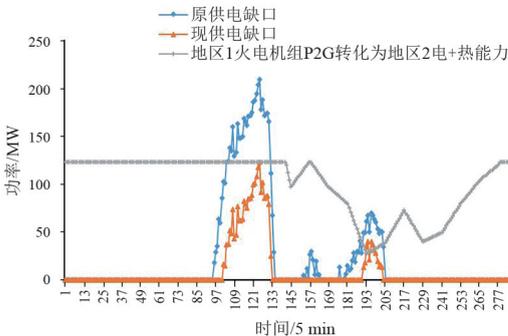


图 8 调用燃气轮机前后供电缺口对比和电+热能力

由图 5 计算可知,地区 2 供电缺口功率最大为 211.17 MW,供电缺口电量为 541.5 MWh,相比总用电量 45 676.3 MWh,缺口电量只占 1.9%,但供电缺口率为 26.7%。由图 8 计算可知,调用燃气轮机后地区 2 缺口功率最大为 124.2 MW,供电缺口电量为 230.4 MWh,缺口电量占 0.4%,供电缺口率为 15.3%,

供电缺口率减少 43.1%;地区 1 火电机组为 P2G 设备制造天然气转化为地区 2 电+热能力和地区 2 原供电缺口存在重叠,因此燃气轮机解决供电缺口会受到地区 1 火电机组为 P2G 设备制造天然气影响。

地区 2 联络线原、现功率和 P2G 设备参与调度火电机组原、现功率如图 9 所示。

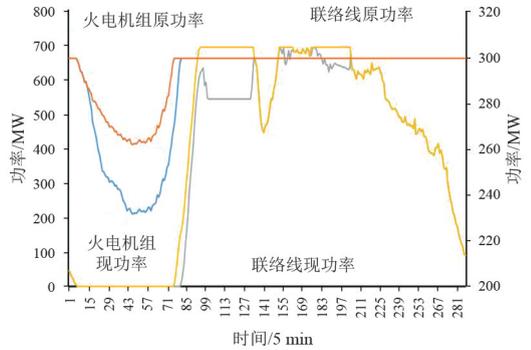


图 9 地区 2 联络线功率和火电机组功率变化

P2G 设备和燃气轮机调用功率如图 10 所示。

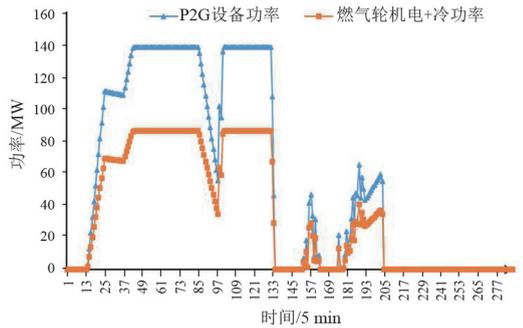


图 10 调用 P2G 设备和燃气轮机功率

由图 4 计算可知,地区 1 弃风最大功率达 175.3 MW,弃风电量为 918.9 MWh,弃风率为 11.35%,弃风率较高,不符合国家弃风率低于 5% 的要求。由图 10 计算可知,P2G 设备调用 1 340.5 MWh,燃气轮机电+冷负荷调用 833 MWh,减少弃风 832.7 MWh,减少供电缺口电量 311.1 MWh。

原方法中,地区 1 火电机组、地区 1 弃风、地区 2 火电机组、地区 2 供电缺口、主网下网成本、总成本分别为 301.8、55.1、687.5、216.6、161.8 和 1 422.8 万元;现方法中,地区 1 火电机组、地区 1 弃风、地区 2 火电机组、地区 2 供电缺口、P2G 设备、燃气轮机和主网下网成本分别为 310.5、5.2、680.3、92.2、159.1、26.8、24、1 298.1 万元。所提方法相比原方法节约成本 124.7 万元。

### 4.3 参数敏感性分析

P2G 设备功率和弃风电量与弃风率关系如图 11 所示。

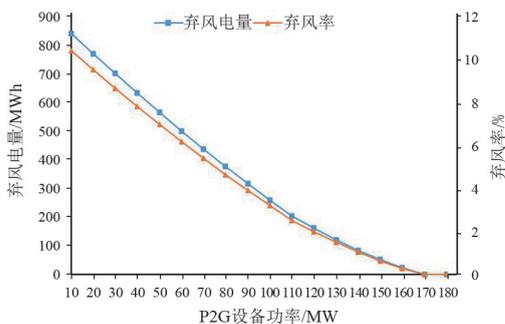


图 11 P2G 设备功率和弃风电量与弃风率关系

由图 11 可知,弃风电量与弃风率随 P2G 设备功率增大而减少, P2G 设备功率为 80 MW 时,弃风率为 4.67%,符合国家弃风率小于 5%要求;最大弃风功率为 95.2 MW,相对原最大弃风功率降低 45.7%。

弃风电量与弃风率与 P2G 设备功率呈现近似线性关系,为探究其近似线性关系原因,统计原弃风功率概率分布,如图 12 所示。

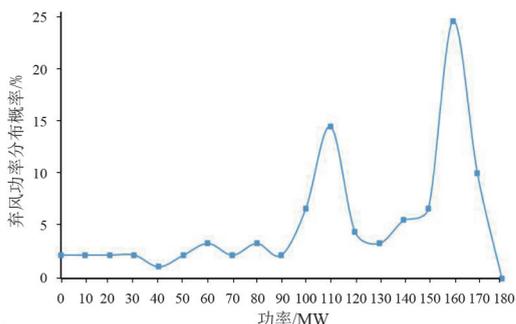


图 12 原弃风功率分布

由图 12 可知,原弃风功率分布数量大部分近似相等,主要分布在风电功率大发期间的风电功率上升和下降阶段;弃风功率分布数量较大时段主要位于风电峰值时间段。

燃气轮机电+冷能综合利用率约为 62%,因此 P2G 最大功率为 140 MW 时,转化为燃气轮机电+冷能最大功率约为 87 MW,因此燃气轮机产生能量从而减少供电缺口和燃气轮机最大电+冷功率直接相关;燃气轮机最大电+冷功率与供电缺口电量、供电缺口最大功率和供电缺口比例关系如图 13 所示。

由图 13 可知,供电缺口电量随着燃气轮机最大电+冷功率增大其降低速度逐渐变缓。供电缺口最大功率下降呈线性关系。供电缺口比例与燃气轮机最大电+冷功率呈现先迅速降低,后缓慢降低关系。供电缺口和燃气轮机最大电+冷功率相关,且由图 8 可

知其与地区 1 P2G 设备产生天然气相关,为探究其相互之间关系,其供电缺口功率分布统计如图 14 所示。

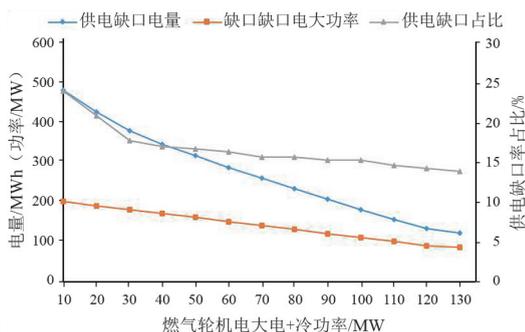


图 13 燃气轮机最大电+冷功率与供电缺口电量、供电缺口最大功率和供电缺口比例关系

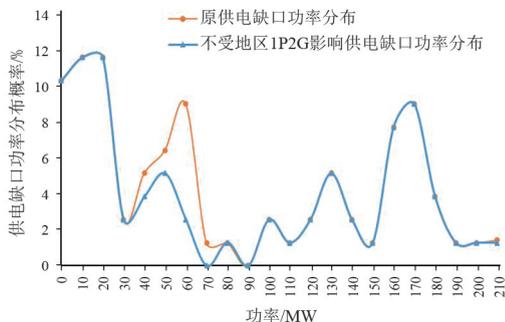


图 14 供电缺口功率分布

由图 14 可知,原供电缺口在 40~70 MW 之间分布虽然较多,但受到地区 1 P2G 设备制造天然气影响,不能有效解决该区间供电缺口问题。原供电缺口在 120~140 MW 及 160~190 MW 之间分布较多,但地区 1 P2G 设备制造天然气转化为燃气轮机电+热能最大功率为 124 MW,不能有效解决该区间供电缺口问题。原供电缺口在 0~30 MW 之间分布解决较好,同时验证图 13 之间关系的正确性。

## 5 结论

针对输电通道传输功率约束导致不同地区负荷高峰时段供电缺口和风电高峰时段弃风问题,通过新建燃气轮机解决供电缺口问题;通过 P2G 解决弃风问题;通过对燃气轮机消耗天然气和 P2G 设备产生天然气平衡进行控制,减少对天然气流影响。该方法能够有效解决弃风和供电缺口问题,弃风(供电缺口)随着 P2G 设备(燃气轮机)功率的增大减少速度会放缓。

由于负荷同时率特性,地区 1 通过 P2G 设备为地区 2 供应天然气会受到限制,会影响燃气轮机解决地区 2 供电缺口问题;此外由于燃气轮机受到地区 1 P2G 设备制造天然气影响,不适宜投资功率过大的 P2G 设备,在后续研究中将通过其他不受设备和负荷同时率限制的设备参与调度,解决供电缺口问题。

### 参考文献

- [1] 黄国栋,许丹,崔晖,等.互联电网安全约束经济调度场景构建方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(8):136-143.
- [2] 杨悦,陈仕军,杨博宇,等.基于环境和经济双重约束的电源结构优化研究[J].四川电力技术,2021,44(2):24-27.
- [3] 樊国旗,刘桂龙,樊国伟,等.大规模虚拟储能模式平抑新能源功率预测误差研究[J].四川电力技术,2021,44(2):19-23.
- [4] 林从城,方万煜.含风电场的水火电力系统的多目标优化调度[J].山东电力技术,2019,46(10):7-12.
- [5] 施泉生,丁建勇,晏伟,等.基于能量流含 P2G 电-热系统风电消纳优化运行[J].太阳能学报,2021,42(5):394-400.

- [6] 殷作洋,赵银波,杨景茜,等.基于场景分析的含 P2G 装置电气能源系统协同优化[J].电力建设,2021,42(3):1-9.
- [7] 卢炳文,魏震波,魏平桢,等.考虑消纳风电的区域综合能源系统电转气与储能设备优化配置[J].智慧电力,2021,49(5):7-14.
- [8] 王世萱,朱武.含冰蓄冷空调的 CCHP 微电网优化调度[J].上海电力大学学报,2021,37(1):37-43.
- [9] 魏震波,魏平桢,郭毅,等.考虑跨区能流交互计划的多区域电-气综合能源系统分散调度方法[J].电力建设,2020,41(12):66-79.
- [10] 曾方迪,李更丰,别朝红,等.考虑跨区联络线交易计划的多区域互联系统分散调度方法[J].电力系统自动化,2018,42(16):32-40.
- [11] 肖峻,秋泽楷,李航,等.基于安全边界几何观测的配电网改造规划实用方法[J].电力自动化设备,2021,41(8):1-7.

### 作者简介:

樊国旗(1993),男,硕士,主要研究方向电力系统调度及新能源消纳。

(收稿日期:2021-08-05)

(上接第 42 页)

- [4] 耿建昭,王宾,董新洲,等.中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J].电力系统自动化,2013,37(16):85-91.
- [5] Cassie A M. Arc rupture and circuit severity: A new theory[R]. Paris, France: CIGRE Report No.102, 1939:1-16.
- [6] Mayr O. Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens [J]. Archiv Für Elektrotechnik, 1943,37(12):588-608.
- [7] 杨明波,龙毅,樊三军,等.基于组合 Mayr 和 Cassie 电弧模型的弧光接地故障仿真及分析[J].电测与仪表,2019,56(10):8-13.
- [8] 曾晗,王利娜,林文萱,等.新型动态变弧长模型在接地弧光中的应用研究[J].计算机仿真,2021,38(6):315-320.
- [9] A Hochrainer, A Grütz. Study of arcs in breakers with the help of a cybernetic model [J]. CIGRE Report No. 13-10, Part A, 1972:1-14.
- [10] 俞小勇,秦丽文,欧阳健娜.间歇性电弧接地故障建模分析[J].南方电网技术,2019,13(12):67-73.
- [11] 许晔,郭谋发,陈彬,等.配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(7):57-64.
- [12] 王宾,耿建昭,董新洲.基于介质击穿原理的配电线路

高阻接地故障精确建模[J].电力系统自动化,2014,38(12):62-66.

- [13] 孙月琴,倪江,王宾,等.应用于输电线路单端测距的高阻接地故障电弧模型分析[J].电力系统自动化,2016,40(22):86-92.
- [14] 邵庆祝,崔鑫,谢民,等.弧光高阻接地故障建模及数据修正算法[J].电力系统自动化,2021,45(11):120-125.
- [15] 许颖.对消弧线圈“消除弧光接地过电压”的异议[J].电网技术,2002,26(10):75-77.
- [16] 邱进,崔鑫,田野,等.小电流接地配电网弧光高阻接地故障电压特征分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(16):115-121.
- [17] 郭霖徽.配电网线路故障类型辨识方法研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [18] 祝应宏,段伟强.电力勘察中土壤电阻率测试分析研究[J].工程勘察,2011,39(12):82-85.
- [19] 沈其工,方瑜,周泽存,等.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,2012.

### 作者简介:

李世龙(1989),男,博士,高级工程师,主要研究方向为智能配电网、电力系统继电保护。

(收稿日期:2021-09-08)