

# 含电、气、热3种储能的微网综合能源系统经济优化运行

施泉生,丁建勇,刘坤,晏伟

(上海电力大学 经济与管理学院,上海 200090)

**摘要:**风电的反调峰特性和供暖季“以热定电”模式导致弃风现象严重,造成能源浪费。随着能源互联网的推进和综合能源系统的发展以及各种储能方式的出现,通过建立含有电、气、热3种储能方式的综合能源系统的运行方式,可以提高风电的利用率。将蓄电池、蓄热电锅炉和电转气(P2G)技术应用于微网系统,以成本费用最小为目标函数,建立微网综合能源系统的经济优化运行模型。对比分析了4种方案,通过算例验证方案的可行性,分析风电出力和负荷不确定性对效益的影响。结果表明含有3种储能方式的综合能源系统可以减少弃风电量,降低环境污染治理费用,提高经济效益,具有良好的应用前景。

**关键词:**综合能源系统;弃风;电转气;蓄热电锅炉;蓄电池;储能;微网;经济运行;模型

**中图分类号:**TM 73

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201908003

## 0 引言

随着化石能源的逐渐枯竭、环境污染的日益严重,为了缓解传统电网的供电压力、转变能源结构,风电并网的规模日益增大。由于风电的随机性、间歇性、波动性和反调峰性等特点以及供暖季传统的“以热定电”模式,使得风电消纳问题日益突出。资料显示,2017年我国弃风电量达 $4.19 \times 10^{10}$  kW·h,因此亟需寻求新的能源利用模式来缓解此现状。

为了解决电力系统、热力系统和天然气系统各子系统单独设计和运行而造成的能源利用率低的问题,“能源互联网”的概念被提出<sup>[1-3]</sup>。其主要包括能源主干网和综合能源系统<sup>[4-6]</sup>,基于电力、热力和天然气供能的微网系统是典型的用户侧综合能源系统形态<sup>[7]</sup>。

电储能的出现促进了新能源的消纳<sup>[8]</sup>。由于受到技术手段等条件的限制,现有存储风能的方式,除抽水蓄能外,大多存在存储容量有限、经济性不足、无法大规模使用等问题。文献[9]从国民经济和节煤效益的角度得出风电蓄热更具有应用前景的结论。蓄热电锅炉将电能转化成热能,实现能量的大量存储<sup>[10]</sup>,打破了“以热定电”模式的约束。近年来出现的电转气(P2G)技术成为解决新能源消纳问题的一种有潜力的方式,其通过化学反应将电能转化为天然气,直接利用已有天然气系统的基础设施(管道以及储气装置)等进行远距离传输和大规模储存<sup>[11-12]</sup>,主要包括电解水制氢气和氢气甲烷化2个过程。目前,电转天然气完整的化学反应综合能量转换效率约为45%~60%<sup>[13]</sup>。P2G技术将电能转化成

天然气进行储存,加强了电力系统和天然气系统间的耦合,实现了能量的双向流动。

由于微网的规模较小,可以采用蓄电池等电能进行新能源的就地消纳,采用P2G技术将过剩的电能转化成天然气进行储存或满足区域内的气负荷,供暖季可采用蓄热电锅炉打破“以热定电”模式,降低弃风电量,减少环境污染。文献[14]介绍了区域综合能源系统的建模、规划和优化方法。文献[15]以建设、运行和维护等各种成本之和最小化为目标函数建立模型,对含有P2G规划的综合能源系统进行分析。文献[16]在考虑P2G设施、电力系统和天然气系统特征的基础上,建立了多能源系统的优化调度模型。上述文献较少有考虑3个系统之间的联合运行优化,文献[17]从能量流的角度对耦合后的3个系统进行分析,但未考虑投资成本和环境因素。文献[18]指出燃气发电的污染物排放与负载水平有很强的相关性,当燃气发电负载较低时,其污染物排放浓度很高,不亚于传统火力发电。

当系统中含有储能设备时,系统中燃气发电机组的出力会降低,此时污染物的排放量则不可忽略。目前已有文献在建立模型时少有考虑燃气电厂所造成的环境污染。且现有文献大多从成本最小或效益最大的角度进行建模分析,缺少对引入储能设备所带来的效益能否在设备的使用寿命内收回投资成本的分析。鉴于此,本文将现有的储能系统应用于微网系统,建立了包含风机、小型燃气轮机、蓄热电锅炉、蓄电池和P2G系统的综合能源系统优化运行模型。对比了4种不同方案的风电消纳能力和经济效益,并且从静态投资回收期的角度对增加储能设备的可行性进行了分析,同时分析了风电出力和负荷的不确定性对效益的影响,通过算例证明包含电、气、热3种储能方式的微网综合能源系统具有可行性,且对风电的消纳具有促进意义。

收稿日期:2018-09-27;修回日期:2019-05-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507099)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507099)

## 1 综合能源系统模型构建

### 1.1 微网电-气-热综合能源系统

微网区域综合能源系统的架构如图1所示,其主要由小型燃气轮机、风电机组、蓄热电锅炉、蓄电池和P2G及储气设备构成。负荷侧主要包括电、热、气3种负荷。由于风电具有反调峰特性以及供暖季小型燃气轮机的出力增加使得弃风电量增大,在系统中增加蓄电池、蓄热电锅炉和P2G设备,利用剩余的风电进行供热/蓄热、储电以及制气/储气,通过电、气、热储能实现微网区域综合能源的经济效益最优。

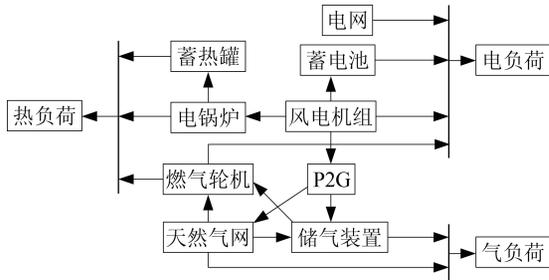


图1 微网区域综合能源系统的架构

Fig.1 Architecture of regional integrated energy microgrid

### 1.2 目标函数

微网综合能源系统的经济优化运行要求系统的运行总费用最少。考虑到微网中风电出力的波动性过强,电能质量达不到向电网输送功率的要求,故只考虑电网向微网单向供电。风电机组利用自然资源发电,可认为其没有发电成本,因此综合能源系统运行过程中的费用主要有从电网的购电费用、从天然气网络的购气费用以及小型燃气轮机的气体排放治理费用。本文研究的优化调度周期为24 h,以1 h为单位时间间隔,目标函数为:

$$F = \min(f_e + f_g + f_{em}) \quad (1)$$

$$f_e = \sum_{t=1}^T c_e(t) P_{net}(t) \quad (2)$$

$$f_g = \sum_{t=1}^T c_g(t) G_{net}(t) \quad (3)$$

$$f_{em} = \sum_{k=1}^K \alpha_{gk} \lambda_k \sum_{t=1}^T P_{GT}(t) \quad (4)$$

其中, $F$ 为系统的运行费用; $f_e$ 为从电网的购电费用; $f_g$ 为从天然气网络的购气费用; $c_e(t)$ 、 $c_g(t)$ 、 $P_{net}(t)$ 、 $G_{net}(t)$ 分别为时段 $t$ 电网的电价、天然气气价、从电网的购电量、从天然气网络的购气量; $f_{em}$ 为小型燃气轮机的气体排放治理费用; $P_{GT}(t)$ 为时段 $t$ 小型燃气轮机的净输出电功率; $\alpha_{gk}$ 为排放 $k$ 类型气体的外部折扣成本; $\lambda_k$ 为小型燃气轮机排放 $k$ 类型气体的排放因子; $K$ 为排放气体类型总数; $T$ 为总时段数。 $\alpha_k$

的取值采用文献[19]中的参数。

### 1.3 设备模型及约束条件

#### 1.3.1 风电机组

风电机组出力上下限约束为:

$$0 \leq P_w(t) \leq P_w^{\max}(t) \quad (5)$$

其中, $P_w(t)$ 、 $P_w^{\max}(t)$ 分别为风电机组在时段 $t$ 送入微网的出力和预测出力的上限。

#### 1.3.2 小型燃气轮机

$$P_{GT}(t) = \eta_{GT} G_{GT}(t) \quad (6)$$

$$C_v = P_{GT,r}(t) / P_{GT}(t) \quad (7)$$

其中, $G_{GT}(t)$ 为时段 $t$ 小型燃气轮机消耗的燃气量; $\eta_{GT}$ 为小型燃气轮机的发电效率; $C_v$ 为小型燃气轮机的热电比,本文中取值为1.5; $P_{GT,r}(t)$ 为时段 $t$ 小型燃气轮机的供热功率。

小型燃气轮机的出力约束为:

$$0 \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT}^{\max} \quad (8)$$

$$-\Delta P_{GT}^{\text{down}} \leq P_{GT}(t) - P_{GT}(t-1) \leq \Delta P_{GT}^{\text{up}} \quad (9)$$

其中, $P_{GT}^{\max}$ 为小型燃气轮机的电功率上限; $\Delta P_{GT}^{\text{down}}$ 、 $\Delta P_{GT}^{\text{up}}$ 分别为小型燃气轮机在一个时段内向下、向上的爬坡率。

#### 1.3.3 蓄热电锅炉

电锅炉的用电功率约束为:

$$0 \leq P_r(t) \leq P_r^{\max} \quad (10)$$

其中, $P_r(t)$ 为时段 $t$ 电锅炉的用电功率; $P_r^{\max}$ 为电锅炉的最大电功率。

蓄热罐的充放速率约束为:

$$0 \leq h_{r,c}(t) \leq h_r^{\max} A_c(t) \quad (11)$$

$$0 \leq h_{r,d}(t) \leq h_r^{\max} A_d(t) \quad (12)$$

$$A_c(t) + A_d(t) \leq 1 \quad (13)$$

其中, $h_{r,c}(t)$ 、 $h_{r,d}(t)$ 分别为时段 $t$ 蓄热罐蓄热、放热的热功率; $h_r^{\max}$ 为蓄热罐的最大蓄(放)功率; $A_c(t)$ 、 $A_d(t)$ 为引入的状态变量,分别表示蓄热、放热状态,蓄(放)热时有 $A_c(t) = 1$ ( $A_d(t) = 1$ ),不蓄(放)热时有 $A_c(t) = 0$ ( $A_d(t) = 0$ )。

蓄热罐的容量约束为:

$$S_r(t) = S_r(t-1) + \left( h_{r,c}(t) \eta_{r,c} - \frac{h_{r,d}(t)}{\eta_{r,d}} \right) \Delta t \quad (14)$$

$$0 \leq S_r(t) \leq S_r^{\max} \quad (15)$$

$$S_r(0) = S_r(T) \quad (16)$$

其中, $S_r(t)$ 为时段 $t$ 蓄热罐中的储热量; $\eta_{r,c}$ 、 $\eta_{r,d}$ 分别为蓄热、放热效率; $S_r(0)$ 、 $S_r(T)$ 分别为初始时刻、时段 $T$ 蓄热罐中的储热量; $S_r^{\max}$ 为蓄热罐的最大储热量; $\Delta t$ 为单位时段时长。式(16)表示为了给下一个周期的调节留有裕度,一个周期后蓄热罐中的储热量恢复到初始状态。

### 1.3.4 蓄电池

蓄电池的容量约束为:

$$E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \quad (17)$$

蓄电池的出力约束为:

$$0 \leq P_c(t) \leq P_c^{\max} B_c(t) \quad (18)$$

$$0 \leq P_d(t) \leq P_d^{\max} B_d(t) \quad (19)$$

$$B_c(t) + B_d(t) \leq 1 \quad (20)$$

蓄电池的电量约束为:

$$E(t) = E(t-1) + (P_c(t)\eta_c - P_d(t)/\eta_d)\Delta t \quad (21)$$

$$E(0) = E(T) \quad (22)$$

其中,  $E(t)$  为时段  $t$  蓄电池的总能量;  $E_{\min}$ 、 $E_{\max}$  分别为蓄电池的最小、最大储能容量;  $P_c(t)$ 、 $P_d(t)$  分别为时段  $t$  蓄电池的充电、放电功率;  $P_c^{\max}$ 、 $P_d^{\max}$  分别为蓄电池充电、放电功率的最大限值;  $B_c(t)$ 、 $B_d(t)$  为状态变量, 分别表示充电、放电状态;  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  分别为蓄电池的充电、放电效率。式(20)表示在一个时段内充电和放电不能同时进行。式(22)表示为了给下一个周期的调节留有裕度, 一个周期后蓄电池的蓄电量恢复到初始状态。

### 1.3.5 P2G 设备

P2G 设备的出力约束为:

$$P_{p2g,g}(t) = \eta_{p2g} P_{p2g}(t) \quad (23)$$

$$P_{p2g}^{\min} \leq P_{p2g}(t) \leq P_{p2g}^{\max} \quad (24)$$

其中,  $P_{p2g}(t)$  为 P2G 设备在时段  $t$  的输入功率;  $\eta_{p2g}$  为 P2G 设备的效率;  $P_{p2g,g}(t)$  为 P2G 设备在时段  $t$  输出的天然气能量;  $P_{p2g}^{\min}$ 、 $P_{p2g}^{\max}$  分别为 P2G 设备运行时的最小和最大功率。

储气装置的约束为:

$$W(t) = W(t-1) + (Q_c(t) - Q_d(t))\Delta t \quad (25)$$

$$0 \leq W(t) \leq W_{\max} \quad (26)$$

$$0 \leq Q_c(t) \leq Q_c^{\max} C_c(t) \quad (27)$$

$$0 \leq Q_d(t) \leq Q_d^{\max} C_d(t) \quad (28)$$

$$C_c(t) + C_d(t) \leq 1 \quad (29)$$

$$W(0) = W(T) \quad (30)$$

其中,  $W(t)$  为时段  $t$  储气装置的储气量;  $W_{\max}$  为储气装置的最大储气量;  $Q_c(t)$ 、 $Q_d(t)$  分别为时段  $t$  的储气、放气速率;  $Q_c^{\max}$ 、 $Q_d^{\max}$  分别为储气、放气的最大速率;  $C_c(t)$ 、 $C_d(t)$  为 0-1 状态变量, 分别表示储气、放气状态。式(29)表示储气设备在同一时段储气、放气不能同时进行。式(30)表示为了给下一个调度周期预留一定的调节裕量, 将储气设备运行一个周期后的储气量恢复到初始储气量。

### 1.3.6 网络约束

电力网络的购电约束为:

$$0 \leq P_{\text{net}}(t) \leq P_{\text{net}}^{\max} \quad (31)$$

其中,  $P_{\text{net}}^{\max}$  为联络线的最大传输功率。

热网的约束为:

$$Q(t) = C_p m(t) \Delta T(t) \quad (32)$$

$$\left(\sum m_{\text{out}}(t)\right)T_{\text{out}}(t) = \left(\sum m_{\text{in}}(t)\right)T_{\text{in}}(t) \quad (33)$$

其中,  $Q(t)$ 、 $m(t)$  和  $\Delta T(t)$  分别为时段  $t$  热网的热功率、质量流量和进出口温度差;  $C_p$  为水的比热容;  $m_{\text{out}}(t)$  和  $m_{\text{in}}(t)$  分别为时段  $t$  流出、流入的质量流量;  $T_{\text{out}}(t)$  和  $T_{\text{in}}(t)$  分别为时段  $t$  的出水和进水温度。式(33)表示时段  $t$  流入的能量和流出的能量相等。

天然气网络的约束为:

$$q_{ij}(t) = K_r s_{ij} \sqrt{s_{ij}(p_i^2(t) - p_j^2(t))} \quad (34)$$

$$0 \leq G_{\text{net}}(t) \leq G_{\text{net}}^{\max} \quad (35)$$

其中,  $q_{ij}(t)$  为时段  $t$  天然气管道节点  $i$  到节点  $j$  的流量;  $K_r$  为管道系数;  $s_{ij}$  表示管道中流量的方向, 当由节点  $i$  流向节点  $j$  时取值为 1, 反之取值为 -1;  $p_i^2 - p_j^2$  为时段  $t$  节点  $i$  与节点  $j$  间压力的平方差;  $G_{\text{net}}^{\max}$  为天然气管道的最大传输功率。

### 1.3.7 综合能源系统平衡约束

(1) 热量平衡约束为:

$$P_{\text{GT},r}(t) + \eta_r P_r(t) - h_{r,c}(t) + h_{r,d}(t) = h_{\text{load}}(t) \quad (36)$$

其中,  $\eta_r$  为电锅炉的效率;  $h_{\text{load}}(t)$  为时段  $t$  综合能源系统的热负荷。

(2) 电量平衡约束如下。

a. 风电机组的功率约束为:

$$P_{p2g}(t) + P_r(t) + P_c(t) + P_w(t) \leq P_w^{\max}(t) \quad (37)$$

b. 系统网络的功率约束为:

$$P_{\text{GT}}(t) + P_w(t) + P_d(t) + P_{\text{net}}(t) = P_{\text{load}}(t) \quad (38)$$

其中,  $P_{\text{load}}(t)$  为时段  $t$  综合能源系统的电负荷。

(3) 气量平衡约束为:

$$P_{p2g,g}(t) + G_{\text{net}}(t) + Q_d(t) - Q_c(t) = G_{\text{GT}}(t) + G_{\text{load}}(t) \quad (39)$$

其中,  $G_{\text{load}}(t)$  为时段  $t$  综合能源系统的气负荷。

## 1.4 静态投资回收期

静态投资回收期为项目投资所获取的净收益回收项目原始投资所需要的时长。

$$\sum_{j=1}^J C_{\text{vest}j} = \sum_{m=1}^{H_m} L_{\text{NCF}m} \quad (40)$$

其中,  $C_{\text{vest}j}$  为设备  $j$  的投资;  $L_{\text{NCF}m}$  为第  $m$  年的净现金流量;  $H_m$  为静态投资回收期;  $J$  为设备总数。  $H_m$  越小, 说明投资回收能力越强, 可行性越强。

## 2 优化模型的求解

### 2.1 模糊机会约束规划

在实际运行过程中由于风电的出力、电负荷、热

负荷和气负荷存在不确定性,故应对模型中的部分约束进行特殊处理。模糊机会约束规划是指当优化问题中存在模糊变量时,决策结果使得约束条件成立的可能性不小于给定的置信水平的一种优化方法<sup>[20-21]</sup>。

将原问题用机会约束表示为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } C_r\{g(\mathbf{x}, \xi) \leq 0\} \geq \alpha \end{cases} \quad (41)$$

其中,  $f(\mathbf{x})$  为目标函数;  $\mathbf{x}$  为决策变量向量;  $\xi$  为模糊变量向量;  $C_r\{g(\mathbf{x}, \xi) \leq 0\} \geq \alpha$  为含模糊变量的约束条件  $g(\mathbf{x}, \xi) \leq 0$  发生的可信性;  $\alpha$  为置信水平。

梯形模糊变量的隶属度函数为:

$$\mu(\xi) = \begin{cases} \frac{\xi - r_1}{r_2 - r_1} & r_1 \leq \xi < r_2 \\ 1 & r_2 \leq \xi < r_3 \\ \frac{\xi - r_4}{r_3 - r_4} & r_3 \leq \xi < r_4 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (42)$$

其中,  $r_1 < r_2 \leq r_3 < r_4$ 。

令出力或负荷预测值为  $r_0$ , 则有:

$$\begin{cases} r_1 = \omega_1 r_0 \\ r_2 = \omega_2 r_0 \\ r_3 = \omega_3 r_0 \\ r_4 = \omega_4 r_0 \end{cases} \quad (43)$$

其中,  $\omega_1$  的取值范围为  $(0, 1]$ 。

当机会约束条件置信水平  $\alpha \geq 1/2$ , 且约束条件  $g(\mathbf{x}, \xi)$  的表达式为式(44)时,  $C_r\{g(\mathbf{x}, \xi) \leq 0\} \geq \alpha$  可转换为确定性等价形式, 如式(45)所示。

$$g(\mathbf{x}, \xi) = h_1(\mathbf{x}) \xi_1 + h_2(\mathbf{x}) \xi_2 + \dots + h_N(\mathbf{x}) \xi_N + h_0(\mathbf{x}) \quad (44)$$

$$h_0(\mathbf{x}) + (2 - 2\alpha) \sum_{n=1}^N (r_{n3} h_n^+(\mathbf{x}) - r_{n2} h_n^-(\mathbf{x})) + (2\alpha - 1) \sum_{n=1}^N (r_{n4} h_n^+(\mathbf{x}) - r_{n1} h_n^-(\mathbf{x})) \leq 0 \quad (45)$$

$$h_n^+(\mathbf{x}) = \begin{cases} h_n(\mathbf{x}) & h_n(\mathbf{x}) \geq 0 \\ 0 & h_n(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (46)$$

$$h_n^-(\mathbf{x}) = \begin{cases} -h_n(\mathbf{x}) & h_n(\mathbf{x}) \leq 0 \\ 0 & h_n(\mathbf{x}) > 0 \end{cases} \quad (47)$$

其中,  $N$  为模糊变量向量  $\xi$  中模糊变量的总个数;  $\xi_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 为模糊变量向量  $\xi$  中的第  $n$  个梯形模糊变量。

## 2.2 模糊约束条件的处理

原优化模型中的风电出力和电、热、气负荷由于其不确定性都为模糊变量, 通过2.1节所述方法将原模型中包含模糊变量的不确定约束条件转换为确定性约束条件, 具体如下。

(1) 热量平衡约束变为:

$$(2 - 2\alpha_1) \omega_2^i h_{\text{load}}(t) + (2\alpha_1 - 1) \omega_1^i h_{\text{load}}(t) - P_{\text{GT},r}(t) - \eta_r P_r(t) + h_{r,c}(t) - h_{r,d}(t) = 0 \quad (48)$$

其中,  $\alpha_1$  为满足热量平衡约束的置信水平;  $\omega_1^i$ 、 $\omega_2^i$  为热负荷的梯形隶属度参数。

(2) 电量平衡约束变为:

$$P_{p2g}(t) + P_c(t) - (2 - 2\alpha_2) \omega_2^w P_w^{\text{max}}(t) - (2\alpha_2 - 1) \omega_1^w P_w^{\text{max}}(t) + P_r(t) + P_w(t) \leq 0 \quad (49)$$

$$(2 - 2\alpha_3) \omega_2^e P_{\text{load}}(t) + (2\alpha_3 - 1) \omega_1^e P_{\text{load}}(t) - P_{\text{GT}}(t) - P_w(t) - P_d(t) - P_{\text{net}}(t) = 0 \quad (50)$$

其中,  $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为满足风电功率平衡约束和电负荷平衡约束的置信水平;  $\omega_1^w$ 、 $\omega_2^w$  和  $\omega_1^e$ 、 $\omega_2^e$  分别为风电功率和电负荷的梯形隶属度参数。

(3) 气量平衡约束变为:

$$(2 - 2\alpha_4) \omega_2^g G_{\text{load}}(t) + (2\alpha_4 - 1) \omega_1^g G_{\text{load}}(t) + G_{\text{GT}}(t) - P_{p2g,g}(t) - G_{\text{net}}(t) - Q_d(t) + Q_c(t) = 0 \quad (51)$$

其中,  $\alpha_4$  为满足气负荷平衡约束的置信水平;  $\omega_1^g$ 、 $\omega_2^g$  为气负荷的梯形隶属度参数。

本文的优化问题为混合整数线性规划(MILP)问题, 而CPLEX是求解大规模混合整数线性规划的商业求解器。本文采用CPLEX求解器对所建模型进行求解。

## 3 算例分析

本文选取某地区的微网设计案例, 算例数据<sup>[7]</sup>包括冬季典型日的电负荷、热负荷(包括供暖负荷和热水负荷)和气负荷以及风电机组的最大出力曲线, 如图2所示。

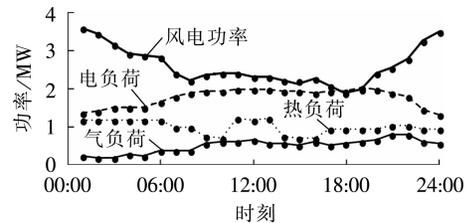


图2 电负荷、热负荷、气负荷及风电出力曲线

Fig.2 Wind power output, electrical load, thermal load and gas load curves

由图2可以看出, 风电出力具有反调峰性, 其在白天出力波动不大, 在夜间出力增大, 尤其是在午夜风电出力达到最大; 该区域夜间用电负荷较小, 用电高峰集中于白天; 而热负荷曲线高峰集中于夜间, 当系统采用小型燃气轮机进行热电联产供热时, 由于“以热定电”模式的限制, 燃气轮机夜间的发电出力将增大, 加之夜间电负荷较小, 使得弃风现象加重。其中热负荷曲线在中午左右出现高峰, 这是因为中午时段热水负荷偏大, 导致总的热负荷上升。由气负荷曲线可以看出, 该区域00:00—08:00的气负荷较小, 其余时间气负荷较大, 且波动不大。

### 3.1 基本方案分析

以该区域只含小型燃气轮机的系统运行方式为基本参考方案,记为方案1;将增加蓄热电锅炉设备的系统运行方式记为方案2,在该方案下每小时平均热负荷约为1 MW,配备1 MW的蓄热电锅炉,其蓄热装置的容量为3 MW·h,能满足3 h的平均热负荷;在方案2的基础上增加P2G设备,将该系统运行方式记为方案3,在该方案下每小时的平均气负荷约为0.5 MW,P2G设备的效率约为60%,配备1 MW的P2G设备,同时配置容量为2.5 MW·h的储气装置;在方案3的基础上增加蓄电池,将该系统运行方式记为方案4,在该方案下蓄电池的容量为1 MW·h,其主要用于储存剩余的风电功率。天然气的价格为0.25元/(kW·h)<sup>[22]</sup>,其余各设备的主要参数如附录中的表A1所示。各方案下燃气轮机的出力曲线如图3所示。

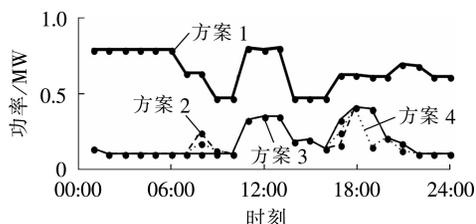


图3 4种方案下燃气轮机的出力曲线

Fig.3 Output power curves of gas turbine under four schemes

在不考虑风电出力以及负荷的不确定性时,由图3可知,相比于方案1,当采用方案2—4时,在00:00—16:00、20:00—24:00这2个时段燃气轮机的出力显著减小,且在00:00—10:00和21:00—24:00时段出力波动不大。由此可以看出,采用蓄热电锅炉可以大幅降低燃气轮机的出力,进而减少天然气的消耗量。图4为方案2—4下蓄热电锅炉的功率曲线,由图可以看出,在00:00—07:00和21:00—24:00这2个时段,由于热负荷较大,蓄热电锅炉均为满负荷运行。

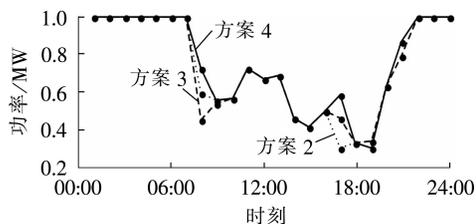


图4 方案2—4下蓄热电锅炉的功率曲线

Fig.4 Power curves of electric boiler with thermal storage under Scheme 2-4

### 3.2 微网综合能源系统经济运行结果分析

通过求解可得方案2—4下蓄热电锅炉的储热和放热功率如图5所示。结合图4、5进行分析,结果

表明蓄热电锅炉通过储热和放热调节锅炉的运行功率来协调配合其他设备的运行,使得系统的综合效益达到最大、弃风电量达到最低。

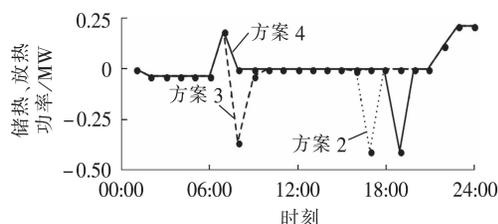


图5 方案2—4下蓄热电锅炉的储热和放热功率曲线

Fig.5 Heat storage and release power curves under Scheme 2-4

图6为4种方案下系统从天然气网络的购气量曲线,从图中可以看出,在00:00—09:00和20:00—24:00这2个时段,方案1从天然气网络的购气量远高于其他3种方案。这是因为在夜间燃气轮机出力减小,消耗的天然气的量下降,且风电出力较大,P2G设备的运行功率大,转化的天然气的量大,所以从天然气网络的购气量减小。

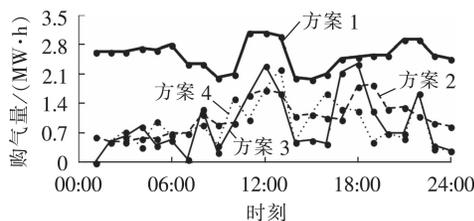


图6 4种方案下的天然气购买量曲线

Fig.6 Purchased natural gas curves under four schemes

最优运行方案(方案4)下各设备的功率曲线如图7所示,系统的储气、储热和储电量曲线如图8所示。从图7、8中可以看出,当采用方案4时,蓄电池、P2G设备的出力以及蓄热电锅炉的满负荷运行主要集中在晚间,此时燃气轮机的出力低,降低了天然气的消耗量,节省了环境排污治理费用。夜间气负荷较小,储气罐的储气量处于增长状态;夜间的热负荷较大,蓄热电锅炉直接进行供热,不存在蓄热状态;蓄电池的蓄电状态主要存在于电力负荷低谷时段,在负荷高峰期进行放电。本文采用分时电价,峰谷

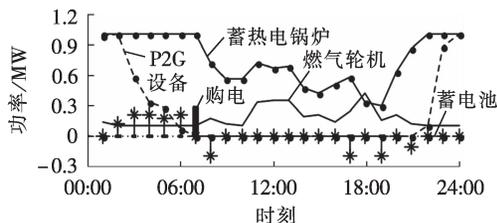


图7 方案4下各设备的功率曲线

Fig.7 Power curve of each equipment under Scheme 4

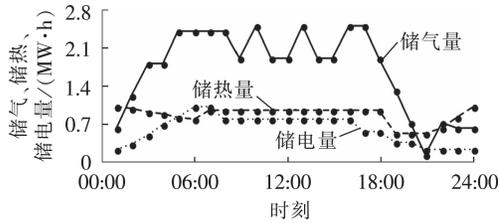


图8 方案4下各储能设备的运行曲线

Fig.8 Operation curves of each energy storage equipment under Scheme 4

平时段以及各时段的电价见附录中的表A2,为了达到经济效益最大,购电状态集中在06:00—07:00时段。

### 3.3 经济效益与投资回收期分析

表1为4种方案下的弃风电量、购电量、购气量及气体排放治理费用、总费用。通过对比方案1和方案2可以看出,在供暖季采用蓄热电锅炉可以有效减少弃风(弃风率下降46.4%),由于采用蓄热电锅炉,燃气轮机的出力降低,所以系统的购气量减少35.52 MW·h,且污染物的排放量降低;通过对比方案2和方案3可看出,在方案2的基础上增加P2G设备进行电到气的转化,相比于方案2,方案3的弃风率下降10.68%,且购气量减少3.57 MW·h,总运行费用减少900元;对比方案3和方案4,方案4是在方案3的基础上配备小容量的蓄电池以实现风电的充分利用,由图7可以看出通过优化调度蓄电池在不同的时刻进行充放电,使得方案4的弃风率降低到1%,在方案3的基础上减少购气量0.42 MW·h,进一步降低了污染物的排放。综上可得采用方案4为最优选择。

表1 4种方案下的弃风电量、购电量、购气量及相关费用

Table 1 Abandoned wind power, purchased electricity power, purchased gas and related costs under four schemes

方案	弃风电量 / (MW·h)	购电量 / (MW·h)	购气量 / (MW·h)	排放治理费用 / 元	总费用 / 万元
1	35.29	—	60.63	287	1.55
2	6.70	0.28	25.11	79	0.64
3	0.75	0.28	21.54	79	0.55
4	0.63	0.28	21.12	74	0.54

同时为了证明优先配置P2G设备比优先配置蓄电池更具优势,在方案2的基础上分别增加1 MW的P2G设备和充电功率为1 MW的蓄电池,对这2种情形进行仿真对比。结果表明,当采用蓄热电锅炉和蓄电时,总运行费用约为0.55万元,与方案3采用蓄热电锅炉和P2G设备时的总运行费用相同;当增加蓄电时,弃风电量为3.69 MW·h,购气量为24.37 MW·h,分别高于增加P2G设备时0.75 MW·h的弃风功率、21.54 MW·h的购气量。其主要原因是:当优先增加蓄电时,由于为了满足系统的热负

荷需求,燃气轮机具有一定的发电量,限制了蓄电池的放电量,从而限制了蓄电池对风电的利用率,而增加P2G设备则不会受此限制,同时增加P2G设备还可加强电、气系统之间的耦合,使得部分气负荷做到自给自足。

综合能源系统中各设备的投资成本及使用寿命见表2<sup>[12,23]</sup>,本文以供暖季(120 d)为例进行分析,在供暖季当采用方案4时节省的费用为121.2万元,综合能源系统设备的静态投资回收期为8.48 a,表明方案4是可行的。

表2 设备的成本及寿命

Table 2 Costs and life times of equipments

设备	建设成本 / 万元	年运维成本 / 万元	残值 / 万元	寿命 / a
蓄电池	28	1.45	1.4	12
蓄热电锅炉	20	0.12	1	15
P2G设备	900	7.78	45	20

本文主要分析了供暖季微网电-热-气综合能源系统的经济效益,并未考虑非供暖季。在非供暖季,热负荷主要是生活热水负荷,相较于供暖季显著减小,蓄热电锅炉的出力急剧减小,P2G设备的出力增加,降低了系统的购气量,故实际的静态投资回收期要小于以供暖季为例计算所得的8.48 a。因此推进蓄热电锅炉、蓄电池和P2G设备在微网中的应用,不仅可以提高风电的利用率,减少环境污染,还可以促进综合能源系统中各能源之间的耦合,提高经济效益。

### 3.4 风电及负荷不确定性对经济效益的影响分析

风电出力以及电、热、气负荷的不确定性会对微网优化运行的经济性产生一定的影响。本节针对方案4分析风电出力及负荷的不确定性对经济效益的影响,假定置信水平为固定值0.9,风电出力和负荷的模糊程度一致,梯形模糊隶属度参数如表3所示。在模糊程度1下,风电出力和负荷均为确定值。模糊程度2下只考虑风电出力不确定性,考虑风电出力和负荷不确定性时设备的出力曲线分别如图9、10所示。

当只考虑风电出力的不确定性时,在模糊程度2下系统的购电量为0.67 MW·h,购气量为26.28 MW·h,总费用为0.68万元。由图9所示结果可以看出,在05:00—08:00时段均存在购电行为,这是因为风电出力不确定,系统需要购买更多的电和气作为

表3 梯形模糊隶属度参数

Table 3 Parameters of trapezoidal fuzzy membership functions

模糊程度	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$
1	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.90	0.95	1.05	1.10

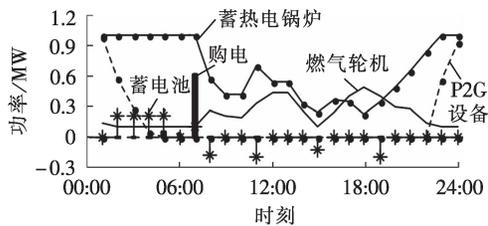


图9 只考虑风电出力不确定性时的设备出力曲线

Fig.9 Output power curves of equipments only considering uncertainty of wind power

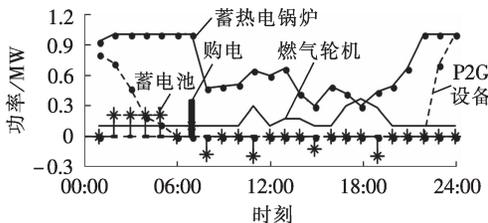


图10 考虑风电出力和负荷不确定性时的设备出力曲线

Fig.10 Output power curves of equipments considering uncertainties of wind power and load

备用电力。当考虑风电出力、负荷的不确定性时,系统的购电量为 $0.34 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ,购气量为 $18.45 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ,总费用为0.48万元。对比图9、10所示结果可以看出,当考虑负荷的不确定性时,燃气轮机的出力明显降低,此时导致用气量大幅减少,从而使系统的总费用降低。

#### 4 结论

本文研究了微网电-热-气综合能源系统的经济优化运行。在已知区域电、热、气负荷及风电机组出力的基础上,建立了包含风电机组、小型燃气轮机、蓄热电锅炉、蓄电池和P2G设备的综合能源系统优化运行模型,通过算例求解分析验证了方案的可行性,并得到如下结论。

(1)采用综合能源系统可以减少系统中燃气轮机的出力,降低天然气的消耗量,减少环境治理费用。

(2)蓄热电锅炉的采用使热负荷不再单独由燃气轮机满足,使得燃气轮机的出力更具灵活性。

(3)P2G设备加强了电力系统和天然气系统之间的耦合,实现了能量的双向流动,使系统的经济效益更为显著。

(4)在弃风量较大的微网中应优先考虑配置储热和储气设备,其次考虑配备储电设备,以减少燃气轮机的出力,进而减小燃料成本。

(5)当仅考虑风电出力的不确定性时,为了保证系统运行的可靠性,系统的购电和购气成本会增加;

当考虑风电出力和负荷的不确定性时,系统的总成本将会降低。

本文研究了供暖季微网综合能源系统的经济优化运行,由于未考虑非供暖季的情况,对于投资回收的研究受到限制。为了减少只考虑供暖季带来的误差,下一步的工作是将全年分为供暖季、供冷季和不供暖也不供冷3种情况进行研究,将电-热-气综合能源系统扩展到电-冷-热-气综合能源系统。同时由于风电和负荷侧的不确定性会对系统的总成本产生较大的影响,提高风电出力预测的准确性对提高系统运行的经济性有重要的意义。另一方面,目前P2G技术相较于蓄电池和蓄热电锅炉技术还不成熟,随着技术的不断成熟和成本的降低,P2G系统可以大规模应用,下一步可以考虑将微网综合能源系统应用于区域大电网,从而实现大规模弃风电量的消纳。

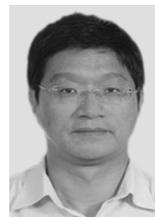
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] 苗新,张东霞,宋璇坤. 全球电力能源互联网拓扑的矩阵表述[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):8-16.  
MIAO Xin,ZHANG Dongxia,SONG Xuankun. Matrix representation of global power energy internet topology[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(5):8-16.
- [2] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术,2016,40(1):114-124.  
ZENG Ming,YANG Yongqi,LIU Dunnan,et al. "Generation-grid-load-storage" coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology,2016,40(1):114-124.
- [3] GLOWACKI-DUDKA M. Book review:the third industrial revolution:how lateral power is transforming energy,the economy,and the world[J]. Adult Learning,2013,24(1):50-51.
- [4] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):113-120,141.  
LIU Dichen,MA Hengrui,WANG Bo,et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(4):113-120,141.
- [5] LUND H,WERNER S,WILTSHIRE R,et al. 4th Generation District Heating (4GDH) integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems[J]. Energy,2014,68:1-11.
- [6] 李立涅,张勇军,陈泽兴,等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):1-9.  
LI Licheng,ZHANG Yongjun,CHEN Zexing,et al. Merger between smart grid and energy-net:mode and development prospects[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(11):1-9.
- [7] 陈绍宇,王丹,贾宏杰,等. 考虑P2G多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11):3067-3077,3362.  
CHEN Zhaoyu,WANG Dan,JIA Hongjie,et al. Research on opti-

- mal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3067-3077, 3362.
- [8] 高赐威, 罗海明, 朱璐璐, 等. 基于电力系统能效评估的蓄能用电技术节能评价及优化[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 140-148.
- GAO Ciwei, LUO Haiming, ZHU Lulu, et al. The energy-saving assessment and optimization of energy storage and electricity utilization technology based on the energy efficiency evaluation of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 140-148.
- [9] 吕泉, 李玲, 朱全胜, 等. 三种弃风消纳方案的节煤效果与国民经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 75-83.
- LÜ Quan, LI Ling, ZHU Quansheng, et al. Comparison of coal-saving effect and national economic indices of three feasible curtailed wind power accommodating strategies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 75-83.
- [10] 丁明, 刘新宇, 解蛟龙, 等. 面向提高风电接纳能力的多区域热-电联合调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4079-4088, 4287.
- DING Ming, LIU Xinyu, XIE Jiaolong, et al. Research on heat and electricity coordinated dispatch model of multi-area for improving wind power accommodation ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4079-4088, 4287.
- [11] 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.
- WEI Zhihong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609, 4885.
- [12] 王亚男, 徐潇源, 严正, 等. 含电转气过程的电-气网络联合优化运行[J]. 现代电力, 2017, 34(4): 1-7.
- WANG Yanan, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Optimizing operation of integrated electrical and gas network with power-to-gas process[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(4): 1-7.
- [13] 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.
- [14] 王一家, 董朝阳, 徐岩, 等. 利用电转气技术实现可再生能源的大规模存储与传输[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3586-3595.
- WANG Yijia, DONG Zhaoyang, XU Yan, et al. Enabling large-scale energy storage and renewable energy grid connectivity: a power-to-gas approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3586-3595.
- [15] 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.
- [16] 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): 3680-3688.
- 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): 3680-3688.
- [17] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑运行约束的区域电-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7108-7120, 7425.
- WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy system considering operational constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7108-7120, 7425.
- [18] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.
- YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24.
- [19] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- LI Le. Study of economic operation in microgrid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [20] 王佳颖, 史俊祯, 文福拴, 等. 计及需求响应的光热电站热电联供型微网的优化运行[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 176-189.
- WANG Jiaying, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal operation of CHP microgrid with concentrating solar power plants considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 176-189.
- [21] 王见. 基于模糊机会约束的含风电场的经济调度[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.
- WANG Jian. Economic dispatch with wind farms based on fuzzy chance constraints [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2018.
- [22] 吴雄, 王秀丽, 别朝红, 等. 含热电联供系统的微网经济运行[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 1-6.
- WU Xiong, WANG Xiuli, BIE Zhaohong, et al. Economic operation of microgrid with combined heat and power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 1-6.
- [23] 刘春阳, 王秀丽, 刘世民, 等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 29-36.
- LIU Chunyang, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 29-36.

#### 作者简介:



施泉生

施泉生(1961—),男,上海人,教授,主要研究方向为电力经济与管理科学(E-mail: shiqs@126.com);

丁建勇(1993—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源电力系统优化(E-mail: dingjy1993@126.com);

刘坤(1994—),女,山西太原人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场以及

系统优化(E-mail: kunl1994@126.com);

晏伟(1993—),男,江西宜春人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化(E-mail: YW\_0301@163.com)。

(下转第293页 continued on page 293)

tive operation model and profit allocation of PV-based microgrid[J]. Power System and Clean Energy,2016,32(5):134-141.

[16] 张兴友. 微网及区域多微网系统随机性建模与评估[D]. 天津:天津大学,2016.

ZHANG Xingyou. Study on stochastic modelling and assessment of microgrid and multi-microgrids system [D]. Tianjin: Tianjin University,2016.

[17] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):1-9.

WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer linear programming[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(28):1-9.

#### 作者简介:



王旭东

王旭东(1984—),男,河北涿州人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为智能配电网、微电网和综合能源(E-mail: tjwangxudong@sina.com);

丁一(1990—),男,内蒙古通辽人,工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为智能配电网保护与控制(E-mail: dy\_cqu@163.com);

马世乾(1988—),男,天津人,高级工程师,博士,主要研究方向为分布式发电、配电网(E-mail: msq112358@126.com)。

## Research on interconnection security and operation mode of park level integrated energy system

WANG Xudong<sup>1</sup>, DING Yi<sup>2</sup>, MA Shiqian<sup>2</sup>, CAO Baoyi<sup>3</sup>, ZHANG Liming<sup>1</sup>

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Research Institute, Tianjin 300384, China;

3. State Grid Tianjin Dongli Electric Power Company, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** Firstly, an interconnection scheme of park level integrated energy system based on public energy storage is proposed. The system interconnected with DC buses of public energy storage can operate in closed-loop mode at low voltage side. Secondly, the real-time dynamic networking is proposed to improve system energy supply security, and the comprehensive energy optimization and dispatching technology is developed to realize the complete consumption of distributed power generation in local area. Meanwhile, the energy supply security and technical economy of the park level integrated energy system are analyzed and compared before and after interconnection. Aiming at the incremental revenue, a multi-investment business pattern is proposed to achieve tripartite win-win situation among energy storage investors, energy service companies and users. Finally, the research achievements are applied to a practical park level integrated energy system renovation project, and the operation results verify the innovation of the theoretical technology.

**Key words:** public energy storage; integrated energy system; energy supply security; dynamic networking; business pattern

(上接第 276 页 continued from page 276)

## Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage

SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, YAN Wei

(College of Economics Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The anti-peak regulation characteristic of wind power and the “power determined by heat” mode in the heating season lead to serious phenomenon of wind curtailment, resulting in energy waste. With the promotion of energy internet, the development of integrated energy system and the emergence of various energy storage modes, the utilization rate of wind power can be improved by establishing the operation mode of integrated energy system which contains three energy storage modes of electricity, gas and heat. The battery, heat storage electric boiler and P2G (Power to Gas) technology are applied to the microgrid system, and the economic optimal operation model of the microgrid integrated energy system is established with the minimum cost as its objective function. Four schemes are compared and analyzed, the feasibility of the scheme is verified by examples, and the influence of wind power output and load uncertainty on benefits is analyzed. The results show that the integrated energy system containing three energy storage modes can decrease the abandoned wind power, reduce the costs of environmental pollution control, improve the economic benefits, and have a good application prospect.

**Key words:** integrated energy system; wind curtailment; power to gas; heat storage electric boiler; electric batteries; energy storage; microgrid; economic operation; models

## 附录

表 A1 设备主要参数

Table A1 Main parameters of equipment

设备	参数	数值
小型燃气轮机	最大出力	1.5 MW
	最小出力	0.1 MW
蓄热电锅炉	最大功率	1 MW
	蓄热容量	3 MW·h
	最大蓄热功率	1 MW
	最大放热功率	1 MW
	产热效率	0.98
	储热效率	0.95
蓄电池	放热效率	0.9
	最大容量	1 MW·h
	最大充电功率	0.2 MW
	最大放电功率	0.2 MW
P2G 设备	放电效率	0.9
	充电效率	0.9
	最大功率	1 MW
	最大储气功率	0.6 MW
	最大放气功率	0.6 MW

表 A2 峰谷电价

Table A2 Peak-valley electricity price

	时段	电价/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
平时段	07:00—10:00, 15:00—18:00, 21:00—23:00	0.49
峰时段	10:00—15:00, 18:00—21:00	0.83
谷时段	00:00—07:00, 23:00—24:00	0.17