

计及光伏出力不确定性的氢能综合能源系统经济运行策略

韩子娇¹,李正文¹,张文达²,刘凯¹,董鹤楠³,袁铁江²

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110000; 2. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:针对分布式光伏出力的不确定性特征对系统运行经济性的影响,提出了一种计及光伏出力不确定性的氢能综合能源系统经济运行策略。首先,搭建氢燃料电池的热电输出控制模型和氢能综合能源系统的热力系统模型;然后,在光伏出力预测数据的基础上,通过分析光照强度变化的不确定性以修正光伏出力预测曲线;最后,以最小化系统日运行成本为目标函数,建立包含光伏、氢燃料电池、热电联产机组的氢能综合能源系统的运行优化模型。算例分析结果表明,考虑光伏出力不确定性对氢燃料电池输出的影响,可使系统设备的出力更加合理,对降低运行成本、提高氢能综合能源系统的运行可靠性具有积极作用。

关键词:氢能综合能源系统;氢燃料电池;光伏;经济运行;不确定性

中图分类号:TM 615;TM 911.4;TK 91

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110027

0 引言

随着能源、电力与用户之间的联系日趋紧密,能够满足热、电等多种负荷需求的综合能源系统脱颖而出,成为能源领域的一个重要发展方向^[1]。可再生能源项目高速发展的同时,电网建设滞后带来的消纳问题成为不容忽视的技术难点,将弃电用于制氢储能,既能够克服电解水制氢成本高的问题,又能够解决能源消纳问题^[2]。包含可再生能源、热电联产CHP(Combined Heating and Power)机组、制储氢及氢燃料电池HFC(Hydrogen Fuel Cell)的氢能综合能源系统,可实现发电、供热等多能源供应需求,同时能实现清洁电力到清洁气体能源的大规模存储,是解决可再生能源消纳、平抑功率波动性和间歇性的重要手段之一。

目前,关于综合能源系统结合氢燃料电池的研究取得了一定的进展,氢燃料电池的供电技术已经基本实现商业化^[3-4]。自日本开发了氢燃料电池热电联产系统,国内外学者开始围绕利用氢燃料电池热电联产特性改善综合能源系统的电-热耦合开展了优化调度、经济运行等方面的研究^[5]。文献[6]提出了一种考虑风电出力随机特性的气电互联氢储能

综合能源系统,验证了考虑需求响应、氢储能对风电消纳以及降低系统日常运营成本具有积极的作用;文献[7]提出了在综合能源系统中加入电制氢装置,以促进能源转化,满足各类负荷需求;文献[8]在含氢储能的综合能源系统中考虑了风电出力的随机性、需求响应等因素,在满足负荷需求的同时,实现了对风电的消纳;文献[9]在所提热电联产模型中加入了氢燃料电池作为调节装置,以提高氢能的高品位使用,同时着重于余热的再电气化以提高多种能源之间的耦合利用效率;文献[10]着重分析了燃料电池热电联产输出特性以及系统内部的能量流动关系,基于算例验证了热电联产的经济性。但是,文献[6-8]只是将氢燃料电池作为储能装置实现可再生能源消纳,并未涉及燃料电池输出特性的研究;文献[9-10]考虑了燃料电池热电联产特性,但未摆脱“以热定电”的限制,削弱了机组的调峰能力,且没有考虑新能源出力的不确定性,使得新能源消纳能力略显不足。

结合上述问题,本文提出了一种计及光伏PV(Photo Voltaic)出力不确定性的氢能综合能源系统的经济运行策略。通过分析光照强度不确定性对光伏出力预测曲线进行修正,保障优化计算过程中对光伏出力预测的精确性,建立以日运行成本最小为优化目标的氢能综合能源系统运行优化模型,基于算例验证了考虑光伏出力不确定性可以使得各设备出力更加合理,能够提升系统运行的经济效益。

1 氢能综合能源系统模型

氢能综合能源系统包含光伏机组、燃气轮机GT(Gas Turbine)、燃气锅炉GB(Gas Boiler)、氢燃料电池等出力设备,电解槽EL(ElectroLyzer)等能源转换

收稿日期:2021-06-11;修回日期:2021-08-31

基金项目:国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院科技项目(基于氢能的风-火耦合多能系统关键技术与研究);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT20RC(5)021)

Project supported by the Science and Technology Program of Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd.(Key Technology and Research of Wind-fire Coupled Multi-energy System based on Hydrogen Energy) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(DUT20RC(5)021)

设备以及储热、储氢等储能设备。本节主要对氢燃料电池的热电输出控制模型和氢能综合能源系统的热力系统进行建模分析。

1.1 氢燃料电池的热电输出控制模型

氢燃料电池通过电化学反应产生电、热和水,其产出的电能和热能相互影响,存在“此消彼长”的关系,研究其运行机理对于满足负荷需求以及提高氢燃料电池的产能效率十分重要。因此,在考虑氢气供给速度、反应堆温度等影响因素的前提下,建立氢燃料电池的热电输出控制模型。

在理想情况下,单电池反应输出的标准电压为1.229 V,但在实际应用中,由于活化极化、欧姆极化和浓差极化等过程存在过电压损耗,输出电压达不到理想值^[11]。所以,单电池的输出电压 V_{cell} 可以表示为:

$$V_{\text{cell}} = V_n - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{con}} \quad (1)$$

式中: V_n 为能斯特电压; V_{act} 为活化极化过电压损耗; V_{ohm} 为欧姆极化过电压损耗; V_{con} 为浓差极化过电压损耗。

能斯特电压 V_n 可以表示为:

$$V_n = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_R - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T_R \ln \frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{0.5}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2)$$

式中: T_R 为电堆温度; p_{H_2} 为氢气分压; p_{O_2} 为氧气分压; $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸气分压,由于氢燃料电池中的产物为液态水, $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 的值为1。

活化极化过电压损耗 V_{act} 是由内部反应时的电子转移造成的,可以表示为^[12]:

$$V_{\text{act}} = \xi_1 + \xi_2 T_R + \xi_3 T_R \ln \gamma_{\text{O}_2} + \xi_4 T_R \ln J \quad (3)$$

$$\gamma_{\text{O}_2} = \frac{p_{\text{O}_2}}{5.08 \times 10^6 e^{-\frac{498}{T_R}}}$$

式中: ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、 ξ_4 为经验参数; J 为电池的电流密度; γ_{O_2} 为气液界面的氧溶解浓度。

欧姆极化过电压损耗 V_{ohm} 是由电子通过极板以及质子通过膜电极造成的,可以表示为^[13]:

$$V_{\text{ohm}} = J(R_m + R_e) \quad (4)$$

$$R_m = \frac{\rho \beta}{A} \quad (5)$$

式中: R_m 为质子通过膜电极的等效阻抗; R_e 为电子通过极板的等效阻抗; ρ 为膜电阻率; β 为膜的厚度; A 为膜的有效面积。因为 R_m 的值远大于 R_e 的值,故忽略 R_e 。

浓差极化过电压损耗 V_{con} 是由气体到达催化层而浓度降低所造成的,可以表示为:

$$V_{\text{con}} = \lambda e^{\omega J} \quad (6)$$

式中: λ 为温度相关系数; ω 为气体在催化层中的增长率。

为了使氢燃料电池能输出所需功率,将 N_{HFC} 个氢燃料电池串联,则串联氢燃料电池组的输出电压 V_{HFC} 、输出电流 i_{HFC} 、电输出功率 P_{HFC} 分别如式(7)~(9)所示。

$$V_{\text{HFC}} = N_{\text{HFC}} V_{\text{cell}} \quad (7)$$

$$i_{\text{HFC}} = \frac{2Fv_{\text{H}_2}}{N_{\text{HFC}} G_{\text{H}_2}} \quad (8)$$

$$P_{\text{HFC}} = V_{\text{HFC}} i_{\text{HFC}} = \frac{2Fv_{\text{H}_2}}{G_{\text{H}_2}} (V_n - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{con}}) \quad (9)$$

式中: F 为法拉第常数; v_{H_2} 为氢气供给速率; G_{H_2} 为氢气的摩尔质量,取值为 $2.02 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ 。

氢燃料电池运行过程中不仅会产生电能,还会产生较多的热能,热输出功率 Q_{HFC} 可以表示为:

$$Q_{\text{HFC}} = i_{\text{HFC}} (N_{\text{HFC}} V_n - V_{\text{HFC}}) = \frac{2Fv_{\text{H}_2}}{G_{\text{H}_2}} (V_{\text{act}} + V_{\text{ohm}} + V_{\text{con}}) \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可以看出,电、热输出功率主要与氢气供给速率、活化极化过电压损耗、欧姆极化过电压损耗、浓差极化过电压损耗相关,而3种过电压损耗主要与氢燃料电池的工作温度相关,因此可以通过控制氢气供给速率和燃料电池的工作温度决定电、热输出功率比例。为了使氢燃料电池工作在正常温度(60~80 ℃)下,需要在双极板内的冷却水通道内通入冷却水以保持其工作在合理温度范围内,冷却水流速越快,则被带走的热能越多,因此氢燃料电池的工作温度由冷却水流速 $v_{\text{H}_2\text{O}}$ 和热输出功率 Q_{HFC} 共同决定,氢燃料电池的热输出功率又分为循环水带走的有用热功率 Q_y 和散发到空气中的无用热功率 Q_f 。综上,氢燃料电池的电、热输出功率比例控制框图如图1所示。

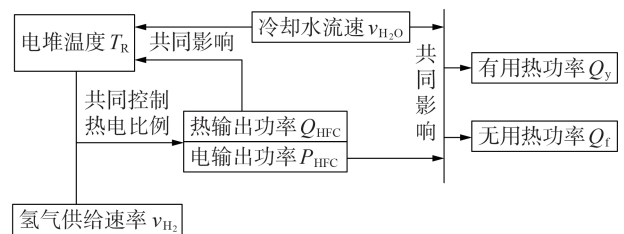


图1 氢燃料电池的电、热输出功率比例控制框图

Fig.1 Block diagram of proportional control of electric out power and heat output power of hydrogen fuel cell

1.2 热力系统模型

1.2.1 热力模型

氢能综合能源系统以氢燃料电池、热电联产机组为热源,以换热器为媒介,经由供热管道和回热管

道实现热能流动,共同构成循环热力系统,其结构如图 2 所示。本文不考虑管道中的热能损耗,因此热力模型包括热负荷功率方程和功率守恒方程,分别如式(11)和式(12)所示。

$$Q_{\text{load},t} = C_p m_q (T_s - T_0) \quad (11)$$

$$(\sum m_{\text{out}}) T_{\text{out}} = (\sum m_{\text{in}}) T_{\text{in}} \quad (12)$$

式中: $Q_{\text{load},t}$ 为热负荷; C_p 为水的比热容; m_q 为流入负荷的水流量; T_s 为供水温度; T_0 为回水温度; m_{out} 为流出管道的水流量; T_{out} 为流出管道的水温; m_{in} 为流入管道的水流量; T_{in} 为流入管道的水温。

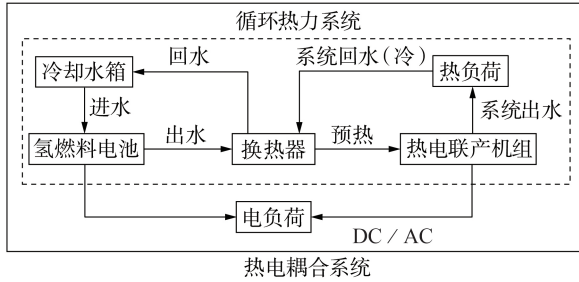


图2 氢能综合能源系统的循环热力系统结构

Fig.2 Structure of circulating heat system in hydrogen energy integrated energy system

1.2.2 热电耦合元件模型

在氢能综合能源系统中,电力系统与热力系统的耦合元件包括氢燃料电池和热电联产机组,两者同时发电以及供热,增加了综合能源系统热能与电能间的转换灵活性。氢燃料电池通过控制氢气供给速率和氢燃料电池工作温度决定电、热输出功率比例,电、热输出功率分别如式(9)和式(10)所示。热电联产机组(燃气轮机)采用定热电比的方式进行供能,其电、热输出功率之间的关系可表示为:

$$C_m = Q_{\text{GT}} / P_{\text{GT}} \quad (13)$$

式中: C_m 为燃气轮机的热电比,本文假设其为一恒定值,值为 1.5; Q_{GT} 为燃气轮机的热输出功率; P_{GT} 为燃气轮机的电输出功率。

2 光伏出力预测误差分析

目前光伏出力短期预测方法包括时间序列预测法、神经网络法及支持向量机 SVM(Support Vector Machine)等^[14-15]。其中,支持向量机是一种基于结构风险最小化原理的预测模型,可以最大限度地提高学习机的泛化能力,在样本数据较少的情况下也可以得到相对较小的预测误差。因此,本文根据历史数据建立支持向量机模型进行光伏出力短期预测。历史数据如式(14)所示。

$$P_{\text{PV}} = [P_{\text{PV}}(1), P_{\text{PV}}(2), \dots, P_{\text{PV}}(i), \dots, P_{\text{PV}}(K)] \quad (14)$$

式中: P_{PV} 为光伏出力历史数据向量; $P_{\text{PV}}(i)$ ($i=1, 2, \dots, K$) 为第 i 个采样点的光伏出力, K 为采样点

数量。

光伏出力受天气变化影响较大,具有较强的不确定性,虽然支持向量机模型的学习能力较强,但其也无法表达预测结果的不确定性,所以短期预测不可避免地存在误差。

光伏机组的输出功率 P 可以表示为:

$$P = P_{\text{STC}} \frac{G_T}{G_{\text{STC}}} [1 - \varepsilon (T_c - T_\tau)] \quad (15)$$

$$T_c = T_{\text{amd}} + 30 \frac{G_T}{1000} \quad (16)$$

式中: P_{STC} 为标准测试环境下光伏机组的最大输出功率; G_{STC} 为标准测试环境下的光照强度; G_T 为实际光照强度; ε 为功率温度系数,取值为 $-0.47\% / ^\circ\text{C}$; T_τ 为参考温度; T_c 为光伏电池的温度; T_{amd} 为环境温度。

由式(15)和式(16)可以看出,光照强度是影响光伏出力不确定性的主要因素,而光照强度与大气云层之间存在如下关系:

$$G_T = G_a I_c \quad (17)$$

式中: G_a 为大气层外的光照强度; I_c 为云层系数,晴天时取值范围为 0.8~1。

结合光伏出力预测采样点数量,预测大气层外的光照强度 $G_a = [G_a(1), G_a(2), \dots, G_a(i), \dots, G_a(K)]$, 然后根据式(15)和式(17)对光伏出力预测进行修正。

假设光伏出力预测值误差 ΔP_{PV} 如式(18)所示,根据列维-林德伯格中心极限定理,采用正态分布函数表示光伏出力预测误差。设 ΔP_{PV} 的期望值为 μ_{PV} , 方差为 σ_{PV}^2 , 则光伏出力预测误差 ΔP_{PV} 服从正态分布 $N(\mu_{\text{PV}}, \sigma_{\text{PV}}^2)$, 误差是在时间轴上的均值,则期望值为 0, 所以误差函数 $f(\Delta P_{\text{PV}})$ 如式(19)所示。

$$\Delta P_{\text{PV}} = [\Delta P_{\text{PV}}(1), \Delta P_{\text{PV}}(2), \dots, \Delta P_{\text{PV}}(i), \dots, \Delta P_{\text{PV}}(K)] \quad (18)$$

$$f(\Delta P_{\text{PV}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{PV}}^2}} e^{-\frac{\Delta P_{\text{PV}}^2}{2\sigma_{\text{PV}}^2}} \quad (19)$$

3 系统运行模型

3.1 目标函数

以最小化系统日运行成本为优化目标,构建系统运行优化模型,如式(20)所示。

$$\min F_{\text{day}} = F_g + F_m \quad (20)$$

$$F_g = p_g \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \frac{Q_{\text{GB},m,t}}{\eta_{\text{GB}}} \Delta t + p_g \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (a_n P_{\text{GT},n,t}^2 + b_n P_{\text{GT},n,t} + c_n) \Delta t \quad (21)$$

$$F_m = \sum_{\varepsilon \in \psi} \sum_{t=1}^T p_{\varepsilon} |P_{\varepsilon,t}| \Delta t \quad (22)$$

式中: F_{day} 为系统日运行成本; F_g 为天然气耗费成本; F_m 为设备运维成本; p_g 为单位天然气价格; M 、 N 分别为燃气轮机、燃气锅炉的数量; $Q_{\text{GB},m,t}$ 为 t 时刻燃气锅炉 m 的产热功率; η_{GB} 为燃气锅炉的产热效率; $P_{\text{GT},n,t}$ 为 t 时刻燃气轮机 n 的发电功率; a_n 、 b_n 、 c_n 为燃气轮机 n 的燃料成本系数^[16]; Δt 为单位调度时间; T 为调度周期; p_e 为设备 e 的单位功率维护成本; $P_{e,t}$ 为 t 时刻设备 e 的发电功率; $\psi = \{\text{GB}, \text{GT}, \text{HFC}, \text{EL}, \text{PV}\}$ 为设备集合。

3.2 约束条件

1) 功率平衡约束。

(1) 电功率平衡约束为:

$$P_{\text{PV},t} + P_{\text{GT},t} + P_{\text{HFC},t} = P_{\text{load},t} \quad (23)$$

(2) 热功率平衡约束为:

$$C_m P_{\text{GT},t} + Q_{\text{HFC},t} + Q_{\text{GB},t} = Q_{\text{load},t} + Q_{\text{HSD},t} \quad (24)$$

式中: $P_{\text{load},t}$ 为 t 时刻的电负荷; $Q_{\text{HFC},t}$ 、 $Q_{\text{GB},t}$ 分别为 t 时刻氢燃料电池、燃气锅炉的热出力; $Q_{\text{HSD},t}$ 为 t 时刻储热装置 HSD (Heat Storage Device) 的热功率, 当热负荷多于设备热出力时, 储热装置释放热能, $Q_{\text{HSD},t}$ 为负值, 当热负荷少于设备热出力时, 储热装置储存热能, $Q_{\text{HSD},t}$ 为正值。

2) 设备出力、爬坡、启停时间约束。

相较于传统电力系统中的火电机组, 燃气轮机、燃气锅炉、氢燃料电池等设备具有体积小、操作灵活度高、启停迅速以及出力可控等优点, 其运行主要受出力、爬坡、启停时间约束, 分别如式(25)~(27)所示。

$$P_{e,\min} u_{e,t} \leq P_{e,t} \leq P_{e,\max} u_{e,t} \quad e \in \Omega \quad (25)$$

$$-R_e^{\text{down}} \Delta t \leq P_{e,t} - P_{e,t-1} \leq R_e^{\text{up}} \Delta t \quad e \in \Omega \quad (26)$$

$$\begin{cases} (T_{e,t}^{\text{off}} - T_e^{\text{D}})(u_{e,t} - u_{e,t-1}) \geq 0 \\ (T_{e,t}^{\text{on}} - T_e^{\text{U}})(u_{e,t-1} - u_{e,t}) \geq 0 \end{cases} \quad e \in \Omega \quad (27)$$

式中: $u_{e,t} \in \{0, 1\}$ 为 t 时刻设备 e 的启停状态, 若处于启动状态则取值为 1, 若处于停机状态则取值为 0; $P_{e,\min}$ 、 $P_{e,\max}$ 分别为设备 e 的最小、最大输出功率; R_e^{up} 、 R_e^{down} 分别为设备 e 的爬坡速率上、下限; T_e^{U} 、 T_e^{D} 分别为设备 e 的最小连续开机时间、停机时间; $T_{e,t}^{\text{on}}$ 、 $T_{e,t}^{\text{off}}$ 分别为设备 e 在 t 时刻之前 (不包含 t 时刻) 的连续开机、停机时间; $\Omega = \{\text{GT}, \text{GB}, \text{HFC}\}$ 为设备集合。

3) 储能装置运行约束。

$$\begin{cases} S_{\text{HST},\min} \leq S_{\text{HST},t} \leq S_{\text{HST},\max} \\ S_{\text{HSD},\min} \leq S_{\text{HSD},t} \leq S_{\text{HSD},\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $S_{\text{HST},t}$ 、 $S_{\text{HSD},t}$ 分别为 t 时刻储氢装置 HST (Hydrogen Storage Tank) 的储氢量、储热装置的储热量; $S_{\text{HST},\min}$ 、 $S_{\text{HST},\max}$ 分别为储氢装置储氢量的最小值、最大值; $S_{\text{HSD},\min}$ 、 $S_{\text{HSD},\max}$ 分别为储热装置储热量的最小值、最大值。

4) 光伏出力约束。

$$0 \leq P_{\text{PV},t} \leq P_{\text{PV},\max} \quad (29)$$

式中: $P_{\text{PV},\max}$ 为光伏出力的最大值。

3.3 求解方法

本文建立的氢能综合能源系统的运行优化模型属于混合整数非线性模型, 其求解的标准形式为:

$$\begin{cases} \min f(x, y) \\ \text{s.t. } g_i(x, y) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, v \\ h_j(x, y) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, w \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ y \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $f(x, y)$ 为优化目标函数; x 为各设备及储能装置的出力变量, $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为其上、下限; y 为设备的启停状态优化变量; $g_i(x, y)$ 为等式约束条件, 包括系统的电、热功率平衡约束; $h_j(x, y)$ 为不等式约束条件, 包括设备运行约束、储能装置运行约束以及光伏出力约束; v 、 w 分别为等式约束条件、不等式约束条件的个数。

针对上述问题, 本文通过分段线性化处理将其转化为混合整数线性模型, 并采用 CPLEX 求解器进行求解, 具体线性化过程如下。

1) 天然气费用函数的线性化。

天然气耗费成本的计算式如式(21)所示, 其中燃气轮机的天然气费用可以用二次函数曲线 $f(P_{\text{GT},n}) = a_n P_{\text{GT},n}^2 + b_n P_{\text{GT},n} + c_n$ 表示, 消除二次函数的常数项 c_n , 则天然气费用与发电功率之间的函数关系曲线如附录 A 图 A1 所示, 将其分为 L 段进行线性逼近, 则燃气轮机的天然气费用曲线的线性化函数表达式为^[16]:

$$\tilde{f}(u_{\text{GT},n,t}, P_{\text{GT},n,t}) = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \left(\sum_{l=1}^L k_n^l P_{\text{GT},n,t}^l + u_{\text{GT},n,t} c_n \right) \quad (31)$$

式中: k_n^l 为燃气轮机 n 的天然气费用曲线第 l 分段的斜率; $P_{\text{GT},n,t}^l$ 为 t 时刻第 l 分段燃气轮机 n 的发电功率; $u_{\text{GT},n,t} \in \{0, 1\}$ 为 t 时刻燃气轮机 n 的启停状态, 若处于启动状态则取值为 1, 若处于停机状态则取值为 0。

2) 设备启停时间约束的线性化。

按照文献[17]的方法对式(27)所示启停时间约束进行线性化处理, 具体处理方法见附录 B。

4 算例分析

4.1 基本方案

以氢能综合能源系统为研究对象, 系统结构及能量流动示意图如图 3 所示。采用 6 节点电网、3 节点气网和 6 节点热网的耦合系统, 网架结构如附录 C 图 C1 所示。热、电负荷预测曲线如附录 C 图 C2 所示。基于支持向量机对光伏机组进行短期出力预

测,预测光照强度对光伏出力预测曲线进行修正,并计算预测曲线与修正曲线之间的差值,得到光伏出力预测及修正曲线如附录C图C3所示。由图C3可以看出,光伏出力预测误差在时间轴上的均值为0,服从期望值为0、方差为 σ_{pv}^2 的正态分布。

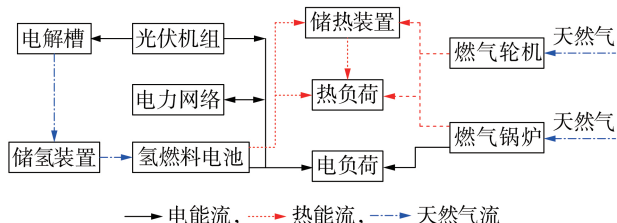


图3 氢能综合能源系统结构及能量流动示意图

Fig.3 Schematic diagram of structure and energy flow of hydrogen energy integrated energy system

为了验证本文所提运行策略的有效性,设计了如下3种方案进行对比分析。

方案1:在氢能综合能源系统中,氢燃料电池仅考虑电出力,光伏出力采用预测曲线。

方案2:在氢能综合能源系统中,氢燃料电池考虑热电联产,光伏出力采用预测曲线。

方案3:在氢能综合能源系统中,氢燃料电池考虑热电联产,光伏出力采用修正曲线。

通过对比方案1和方案2,确定氢燃料电池的热电联产特性对系统运行及经济性的影响;通过对比方案2和方案3,确定考虑光伏出力不确定性对系统运行及经济性的影响。

系统内各设备出力上下限及运维成本数据如附录C表C1所示,系统主要能量输入为天然气,其低热值为 $9.7 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$,单价为 $2.5 \text{ 元} / \text{m}^3$ 。

4.2 热电耦合分析

方案1的电、热功率结果如图4所示。由图4(a)可看出:在00:00—06:00时段内,光伏发电功率为0,电负荷主要由燃气轮机供应;在10:00—14:00时段内,光伏发电功率较大,主要由其满足电负荷需求,此时燃气轮机基本不工作;在17:00—22:00时段内,负荷需求增加,光伏发电功率逐渐减少至0,此时主要依靠燃气轮机和氢燃料电池提供电能。由图4(b)可看出,由于方案1仅考虑氢燃料电池的电出力,热负荷由燃气轮机和燃气锅炉供应。

方案2的电、热功率结果如图5所示。由图可知:由于方案2中氢燃料电池同时参与电、热供应,电负荷由光伏、燃气轮机和氢燃料电池供应,热负荷由燃气轮机、氢燃料电池和燃气锅炉供应,相较于方案1,方案2考虑了氢燃料电池的热电联产作用,主要体现在热负荷供应中,燃气轮机出力明显较小,燃气锅炉出力略微减小,在10:00—14:00时段内光伏出力较充足的情况下,燃气轮机基本不出力,燃气锅炉出力大幅减少,这使得天然气消耗大幅降低,而在

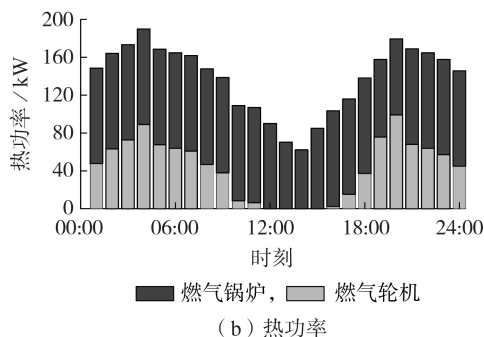
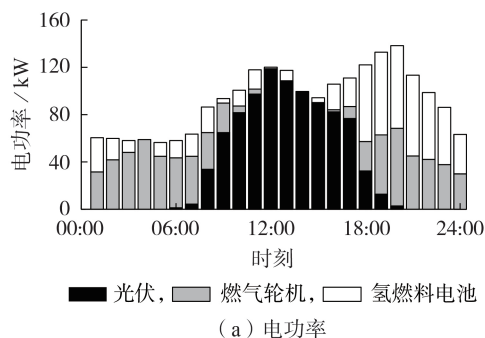


图4 方案1的电、热功率结果

Fig.4 Electric and heat power results of Scheme 1

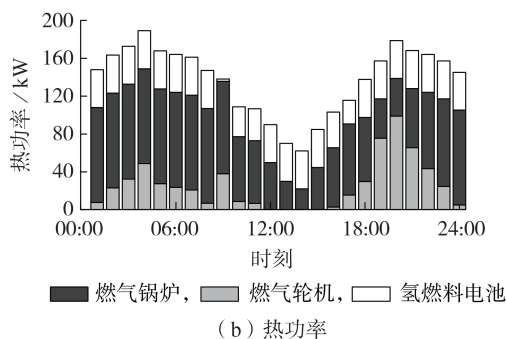
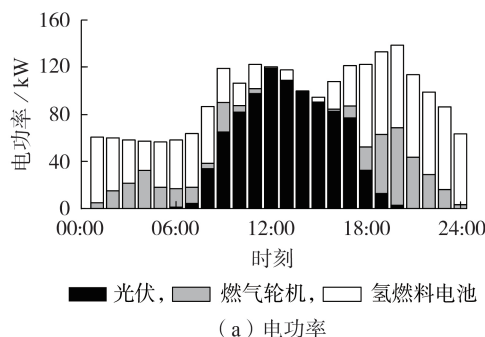


图5 方案2的电、热功率结果

Fig.5 Electric and heat power results of Scheme 2

系统运行成本中,天然气的成本所占比重较大,表明考虑氢燃料电池的热电联产作用对降低系统运行成本的效果较明显。

方案3的电、热功率结果如图6所示。方案3中主要是对光伏预测出力曲线进行修正,从光伏出力预测曲线及修正曲线可以看出,预测值略大于修正值,虽然其误差值较小,对系统影响的较小,但仍会

对系统产生一定的影响。对比方案2和方案3的热功率结果可以看出,当光伏出力减小时,氢燃料电池的输出功率有所减少,出现热负荷供应能力不足的情况,此时燃气轮机对热负荷缺额进行供应,而燃气轮机运行在“以热定电”模式,产热的同时会产生一定的电能,会对电负荷供应设备产生一定的影响。由于光伏出力预测误差较小,相较于方案2,方案3下设备的出力变化不明显,但是由于预测误差的存在,导致燃气轮机的工作时间加长,这势必会影响燃气轮机的使用寿命,加之预测误差对各设备出力的细微影响,导致氢能综合能源系统的不稳定性增加,降低了系统的运行可靠性。

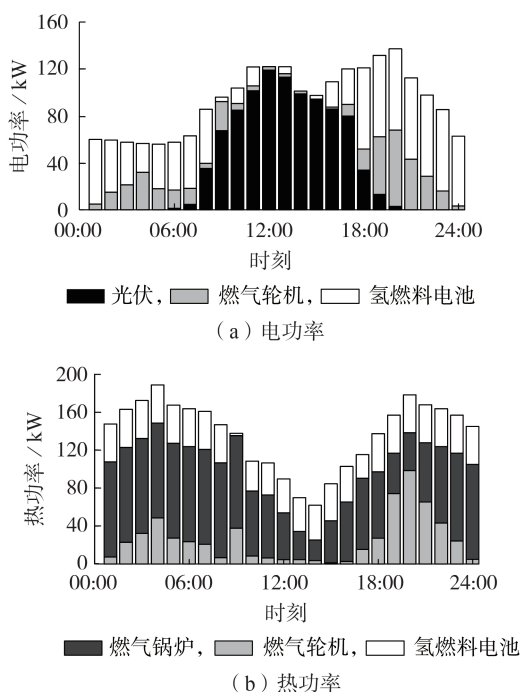


图6 方案3的电、热功率结果

Fig.6 Electric and heat power results of Scheme 3

4.3 优化结果及运行成本对比

氢燃料电池的总出力、燃气轮机的电出力、燃气锅炉的热出力曲线如图7所示。由图可以看出,通过分析光照强度的不确定性对光伏出力预测曲线进行修正后,对氢燃料电池和燃气轮机的出力产生了一定的影响,对燃气锅炉的出力几乎无影响,在10:00—18:00时段内,修正曲线略小于预测曲线,此时氢燃料电池的总出力有所减少,燃气轮机的电出

力有所增加。

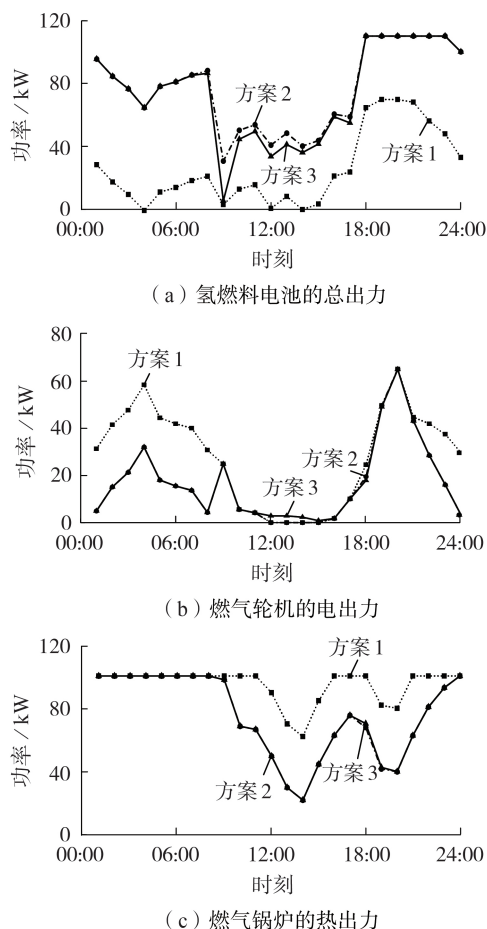


图7 3种方案的优化结果

Fig.7 Optimal results of three schemes

由于光伏机组是利用自然资源发电,其发电成本基本上可以忽略不计,本文中的系统日运行成本只考虑了天然气耗费成本和设备运维成本。3种方案的成本对比如表1所示。方案1和方案2的区别在于方案1仅考虑氢燃料电池输出电能,方案2考虑了氢燃料电池的热电联产特性。对比表1中方案1、2数据可知,方案1、2中氢燃料电池的效率分别为37.44%、69.90%,系统日运行成本分别为7502.0、5721.5元,表明控制氢燃料电池的热、电输出功率可以提升系统的能源利用率,减少化石燃料的使用,降低运行成本的同时减少了碳排放。方案2和方案3的区别在于在方案3考虑了光伏出力的不确定性,基于光照强度的不确定性修正光伏出力预测曲线。对比表1中方案2、3的数据可知,由于方案3中光伏出力略微减

表1 优化结果对比

Table 1 Comparison of optimization results

方案	电负荷/kW	热负荷/kW	氢燃料电池 电功率/kW	氢燃料电池 热功率/kW	氢燃料电池的 效率/%	天然气耗费 成本/元	设备运维 成本/元	系统日运行 成本/元
1	2216.88	3289.32	628.95	—	37.44	7371.1	130.9	7502.0
2	2216.88	3289.32	955.88	889.84	69.90	5499.0	222.5	5721.5
3	2216.88	3289.32	906.14	876.48	67.52	5524.3	220.5	5744.8

小,氢燃料电池的效率有所下降,增加了化石燃料的使用,其系统日运行成本增加了23.3元。虽然日运行成本小幅增加,但是提高光伏出力预测的精确性可以降低对系统设备出力的影响,使设备出力更加合理,从而提高氢能综合能源系统的运行可靠性。

5 结论

本文综合考虑氢燃料电池的热电联产特性和光伏出力的不确定性,提出了计及光伏出力不确定性的氢能综合能源系统运行优化模型,并通过分段线性化处理将其转化为混合整数线性化模型进行求解。仿真算例结果表明:通过控制氢燃料电池的电、热输出功率比例,可以改善系统“以热定电”的局限性,提高系统的能源利用率,大幅降低系统的天然气耗费成本;考虑光照强度的不确定性以修正光伏出力预测曲线,虽然略微增加了运行成本,但是可以降低光伏出力预测误差带来的影响,优化设备出力,提高系统的运行可靠性。

本文所提模型能够在较大程度上克服氢燃料电池电、热输出功率之间的制约关系,同时考虑了光伏出力的不确定性对氢燃料电池输出的影响,随着可再生能源的大力发展,其可以进一步减少化石能源的使用率,加快低碳电力的发展,有效地提高能源利用率与系统运行经济性,对于构建以新能源为主体的新型电力系统以及早日实现碳中和具有重大的意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨颖,史香锟,吴昊,等. 综合能源规划系统国内外研究现状与展望[J]. 科技创新与应用,2021(2):98-100.
YANG Ying,SHI Xiangkun,WU Hao,et al. Current status and prospects of research on integrated energy planning system at home and abroad[J]. Technology Innovation and Application, 2021(2):98-100.
- [2] EL-SHAFFIE M,KAMBARA S,HAYAKAWA Y. Hydrogen production technologies overview[J]. Journal of Power and Energy Engineering,2019,7(1):107-154.
- [3] 孙玉玲,胡智慧,秦阿宁,等. 全球氢能产业发展战略与技术布局分析[J]. 世界科技研究与发展,2020,42(4):455-465.
SUN Yuling,HU Zhihui,QIN Aning,et al. Analysis of strategy and technology situation on global hydrogen industry[J]. World Sci-Tech R&D,2020,42(4):455-465.
- [4] 田铭兴,路涛涛,贾志博,等. 基于虚拟同步发电机控制的光/储/燃料电池微电网能量管理[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):89-95.
TIAN Mingxing,LU Taotao,JIA Zhibo,et al. Energy management of photovoltaic-storage-fuel cell microgrid based on virtual synchronous generator control[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):89-95.
- [5] 秦阿宁,孙玉玲,陈芳,等. 基于文献计量的全球氢燃料电池技术竞争态势分析[J]. 科学观察,2020,15(2):1-14.
- [6] 黄涛,许志鹏,葛乐. 考虑风电出力随机特性的氢储能综合能源系统优化调度[J]. 电器与能效管理技术,2020(5):72-77.
HUANG Tao,XU Zhipeng,GE Le. Optimal scheduling of hydrogen energy storage system considering random characteristics of wind power output[J]. Electrical & Energy Management Technology,2020(5):72-77.
- [7] 郭梦婕,严正,周云,等. 含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J]. 中国电力,2020,53(1):115-123,161.
GUO Mengjie,YAN Zheng,ZHOU Yun,et al. Optimized operation design of integrated energy system with wind power hydrogen production[J]. Electric Power,2020,53(1):115-123,161.
- [8] 尹文良,刘琳,张存山,等. 含制氢储能的混合传动风电系统建模与运行特性分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):64-70.
YIN Wenliang,LIU Lin,ZHANG Cunshan,et al. Modeling and operation performance analysis of hybrid drive wind power generation system with hydrogen energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(10):64-70.
- [9] 崔杨,闫石,仲悟之,等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J]. 电网技术,2020,44(11):4254-4264.
CUI Yang,YAN Shi,ZHONG Wuzhi,et al. Optimal thermo-electric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology,2020,44(11):4254-4264.
- [10] 裴煜,宋天昊,袁铁江,等. 计及燃料电池热电联产的区域综合能源系统经济运行[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(2):142-150.
PEI Yu,SONG Tianhao,YUAN Tiejia,et al. Economic operation of regional integrated energy system considering combined heating and power generation with fuel cell[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(2):142-150.
- [11] 皇甫宜耿,任子俊,张羽翔,等. 质子交换膜燃料电池动态特性建模及仿真[J]. 电力电子技术,2020,54(12):44-46.
HUANGFU Yigeng,REN Zijun,ZHANG Yuxiang,et al. Dynamic characteristics modeling and simulation of proton exchange membrane fuel cells[J]. Power Electronics,2020,54(12):44-46.
- [12] 蔡钦钦,肖宇,朱永强. 计及电转氢和燃料电池的电热微网日前经济协调调度模型[J/OL]. 电力自动化设备. [2021-08-23]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202108009>.
- [13] 于波. 微网与储能系统容量优化规划[D]. 天津:天津大学,2012.
YU Bo. Optimal planning of microgrid and energy storage system[D]. Tianjin:Tianjin University,2012.
- [14] 赵书强,张婷婷,李志伟,等. 基于数值特性聚类的日前光伏出力预测误差分布模型[J]. 电力系统自动化,2019,43(13):36-45.
ZHAO Shuqiang,ZHANG Tingting,LI Zhiwei,et al. Distribution model of day-ahead photovoltaic power forecasting error based on numerical characteristic clustering[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(13):36-45.
- [15] 赖昌伟,黎静华,陈博,等. 光伏发电出力预测技术研究综述[J]. 电工技术学报,2019,34(6):1201-1217.
LAI Changwei,LI Jinghua,CHEN Bo,et al. Review of photovoltaic power output prediction technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(6):1201-1217.
- [16] 苏济归,舒隽,谢国辉,等. 大规模机组组合问题计及网络约束的线性化求解方法[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(18):135-139.
SU Jigui,SHU Jun,XIE Guohui,et al. Linearization method

of large scale unit commitment problem with network constraints[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 135-139.

[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 programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-9.

作者简介:



韩子娇(1988—),女,辽宁朝阳人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统安全稳定运行、新能源消纳、能源互联网、电力系统灵活性资源(E-mail: thuwhatever@163.com)。

(编辑 陆丹)

Economic operation strategy of hydrogen integrated energy system considering uncertainty of photovoltaic output power

HAN Zijiao¹, LI Zhengwen¹, ZHANG Wenda², LIU Kai¹, DONG Henan³, YUAN Tiejia²

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: Aiming at the influence of the uncertainty characteristics of distributed PV (PhotoVoltaic) output power on the economic operation of the system, an economic operation strategy of hydrogen integrated energy system considering uncertainty of PV output power is proposed. Firstly, the thermoelectric output control model of hydrogen fuel cell and the thermal system model of hydrogen integrated energy system are built. Then, based on the forecasting data of PV output power, the forecasting curve of PV output power is corrected by analyzing the uncertainty of light intensity variation. Finally, the operation optimization model of hydrogen integrated energy system including PVs, hydrogen fuel cells, and combined heating and power units is established with the objective function of minimizing the daily operation cost of system. The example analysis results show that considering the influence of PV output power uncertainty on hydrogen fuel cell output, the output power of system equipment can be more reasonable, which plays a positive role in reducing operation cost and improving operation reliability of hydrogen integrated energy system.

Key words: hydrogen integrated energy systems; hydrogen fuel cell; photovoltaic; economic operation; uncertainties

附录 A

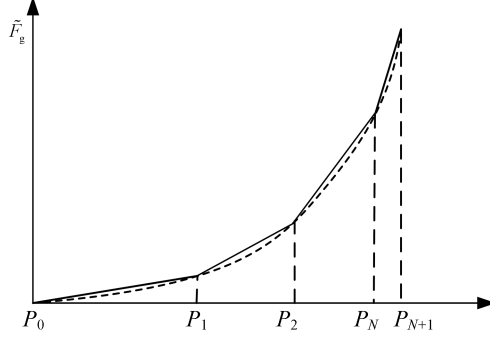


图 A1 天然气费用曲线的分段线性化

Fig.A1 Piecewise linearization of natural gas cost curve

附录 B

最小开机时间约束的线性化过程如下：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{G_{\varepsilon}} (1 - u_{G_{\varepsilon},t}) = 0 \\ G_{\varepsilon} = \min\{T, T_{\varepsilon}^U - T_{\varepsilon,0}^U u_{\varepsilon,0}\} \end{cases} \quad (\text{B1})$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{\varepsilon}^U-1} u_{\varepsilon,k} \geq T_{\varepsilon}^U (u_{\varepsilon,t} - u_{\varepsilon,t-1}) \quad t = G_{\varepsilon} + 1, \dots, T - T_{\varepsilon}^U + 1 \quad (\text{B2})$$

$$\sum_{k=t}^T \{u_{\varepsilon,k} - (u_{\varepsilon,t} - u_{\varepsilon,t-1})\} \geq 0 \quad t = T - T_{\varepsilon}^U + 1, \dots, T \quad (\text{B3})$$

最小停机时间约束的线性化过程如下：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{S_{\varepsilon}} u_{\varepsilon,t} = 0 \\ S_{\varepsilon} = \min\{T, T_{\varepsilon}^D - T_{\varepsilon,0}^D (1 - u_{\varepsilon,0})\} \end{cases} \quad (\text{B4})$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_{\varepsilon}^D-1} (1 - u_{\varepsilon,k}) \geq T_{\varepsilon}^D (u_{\varepsilon,t-1} - u_{\varepsilon,t}) \quad t = S_{\varepsilon} + 1, \dots, T - T_{\varepsilon}^D + 1 \quad (\text{B5})$$

$$\sum_{k=t}^T \{1 - u_{\varepsilon,k} - (u_{\varepsilon,t-1} - u_{\varepsilon,t})\} \geq 0 \quad t = T - T_{\varepsilon}^D + 1, \dots, T \quad (\text{B6})$$

式中：\$T_{\varepsilon,0}^U\$、\$T_{\varepsilon,0}^D\$ 分别为设备 \$\varepsilon\$ 的初始开机、停机时间；\$k\$ 为 0 时刻之前机组已开机（关机）时长；\$G_{\varepsilon}\$、\$S_{\varepsilon}\$ 分别为开始时刻设备 \$\varepsilon\$ 要求的开机、停机时间。

附录 C

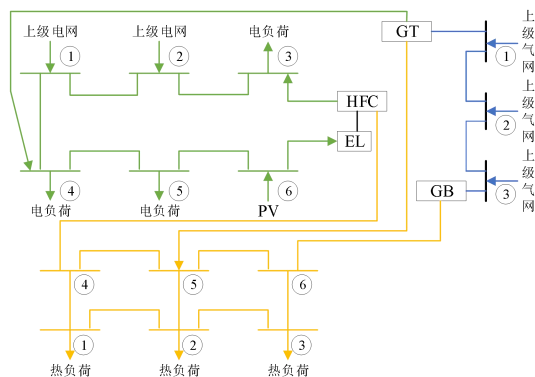


图 C1 氢能综合能源系统的网架结构

Fig.C1 Grid structure of hydrogen integrated energy system

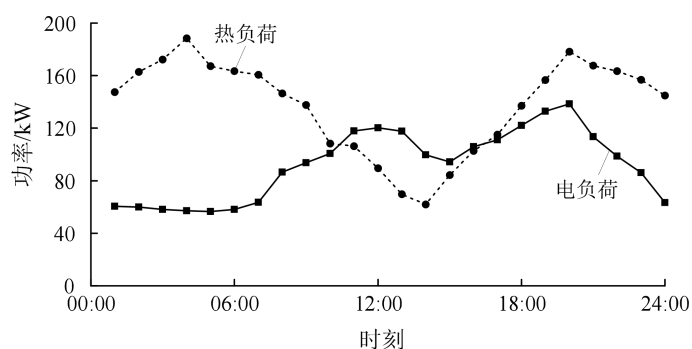


图 C2 负荷预测曲线

Fig.C2 Load forecasting curves

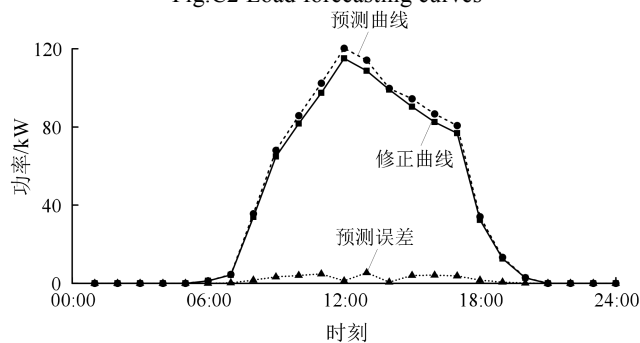


图 C3 光伏出力预测及修正曲线

Fig.C3 Photovoltaic output power forecasting and correction curves

表 C1 设备运行参数及运维成本

Table C1 Operation parameters and O&M costs for each equipment

编号	设备	出力下限/kW	出力上限/kW	运维单价/(元·kW ⁻¹)
1	光伏机组	0	160	0.024
2	燃气轮机	0	120	0.026
3	燃气锅炉	0	120	0.017
4	氢燃料电池(电)	0	70	0.084
5	氢燃料电池(热)	0	40	0.084