含风电制氢装置的综合能源系统优化运行

郭梦婕，严正，周云，张沛超

（电力传输与功率变换控制教育部重点实验室（上海交通大学电气工程系），上海200240）

摘要：随着全球环境污染问题的加剧以及能源结构调整，氢能作为一种高度清洁的可再生能源成为世界各国研究热点，合理利用氢能是解决能源危机和环境问题的有效途径。考虑风电制氢装置在综合能源系统中的应用，研究了含电制氢装置的不同控制方式，提出了含电制氢装置的综合能源系统优化模型。通过多种能源之间的相互转化，同时满足电力、氢气以及热负荷需求。算例仿真结果验证了所提模型的有效性，分析了风电制氢装置对于降低系统运行成本、提高清洁能源消纳量的重要作用，对比了不同氢气负荷需求下系统的运行情况，仿真结果说明合理安排氢气负荷有利于进一步促进系统绿色、经济运行。

0引言

近年来，综合能源系统逐渐受到世界各国的关注，其能够实现风能、太阳能、天然气、氢能等多种能源的相互转化，并利用电能和热能的存储、供应、消耗实现能源的多次利用，是当前提高能源利用效率，减少污染气体排放，高效利用可再生能源的重要途径[1]。

综合能源系统是以电力系统为核心，打破电、气、冷、热等能源供应系统单独规划运行的模式，在规划、设计、建设和运行过程中，对各类能源分配、转化、存储、消费等环节进行有机协调与优化，充分利用可再生能源的新型区域能源供应系统[2-3]。目前，综合能源系统的发展目标是提高清洁能源供应与利用比重，进一步增强地区供能系统的经济性和可靠性，促进多能互补技术的发展[4-5]。电转氢技术能够将电能转化为氢能，有利于能量存储及清洁利用，是综合能源系统的重要研究方向。

风电制氢技术有效解决了大规模的弃风问题，不仅对综合能源系统中风电的消纳能力具有重要意义，也将探索出不同于储能、P2G（power to gas）、供冷供热进行本地可再生能源消纳的新途径。电制氢技术具有成本低、易存储、方便运输、清洁度高等明显优势[6]。在实际园区中，电制氢的方式可以有效降低工业制氢产业中煤炭、天然气等化石能源的消耗，并且电制氢过程的产物可作为工业原料及清洁燃料使用。进一步，风电制氢装置所得氢气可通过燃料电池转化为电能，实现了电能的存储和利用[7]。文献[8]描述了风氢耦合发电的概念和特点并探索了其在实际电力系统中的应用；文献[9]指出了并网风氢互联耦合发电系统的2种运行方式，并提出了孤岛运行系统的运行策略；文献[10]统计了风电场耦合制氢系统的产能，并对其进行了运行经济成本分析；文献[11]设计了风电制氢与燃料电池结合的微网实验平台，实现了其各个组成部分独立运行以及微电网全系统运行。以上研究为风电制氢及燃料电池装置在综合能源系统中的应用打下了基础。

本文考虑风电制氢装置在综合能源系统中的应用，研究了含电制氢装置的不同控制方式，提出了含电制氢装置的综合能源系统优化模型，计及了多种能源之间的相互转化，能够同时满足电力、氢气以及热负荷需求。算例仿真结果验证了所提模型的有效性，分析了风电制氢装置对于降低系统运行成本、提高清洁能源消纳量的重要作用，对比了不同氢气负荷下系统的运行情况，合理安排氢气负荷有利于进一步促进系统绿色、经济运行。

1含风电制氢装置的综合能源系统

1.1电-氢转换原理及模型

通过不同的化学反应，可实现氢能和电能之间的相互转换：电解水装置消耗电能并产生氢气，实现电能向氢能的转换；燃料电池或热电联产机组可利用氢气产生电能，实现氢能向电能的转换[12]。图1为氢能和电能相互转换过程，其化学反应的表达式为

$$2H_2O \underset{\text{催化剂}}{\overset{\text{通电}}{\rightleftharpoons}} 2H_2\uparrow + O_2\uparrow \qquad (1)$$

在电能转换为氢能的过程中，产生的氢气可利用储氢装置储存，一方面可以在电力缺额时供给燃料电池使用，满足电力负荷需求；另一方面，能够为工业氢气的使用提供来源。在氢能转换为电能的过程中，氢气的燃烧过程会释放热量，可供给系统的热负荷。

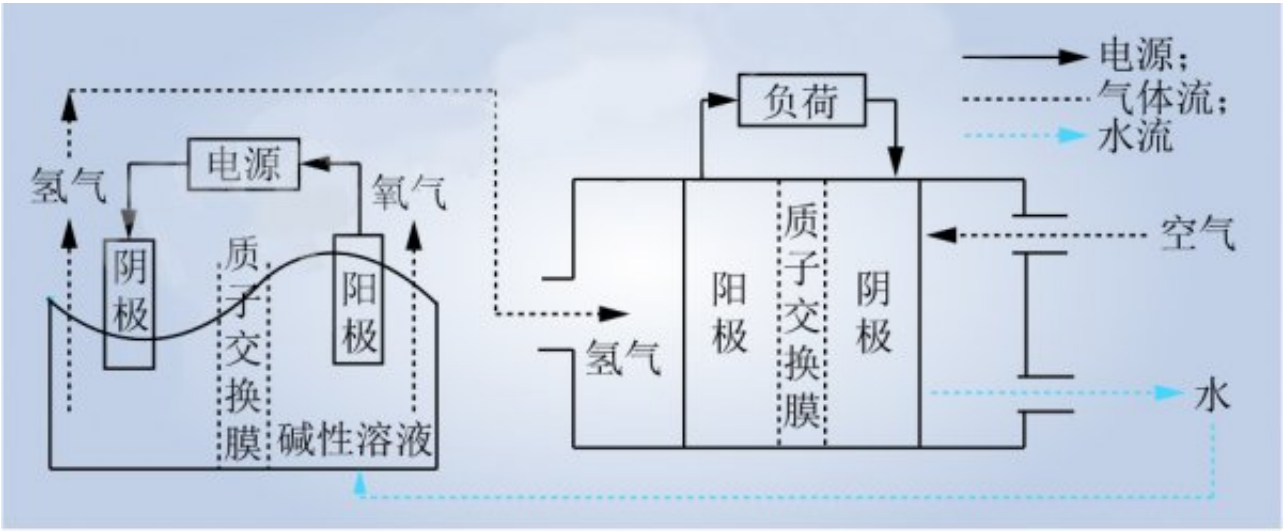

图 1 电-氢转换示意

Fig. 1 The conversion of power and hydrogen

1.2含电制氢装置的综合能源系统

在实际应用中，制氢过程通常与可再生能源的消纳相结合，在电力负荷低谷时将富余的可再生能源转换为氢能存储，满足工业用氢需求（如医疗、炼钢、航空以及绿色能源车等[13]），并在电力负荷高峰时将氢能转换为电能以满足负荷需求，同时也增加了可再生能源的消纳量。本文中考虑风电制氢过程，构建了如图2所示的含电制氢装置的综合能源系统，在满足电负荷、热负荷以及氢负荷需求的同时，促进可再生能源的消纳。其中，风电制氢-燃料电池发电系统和热力系统为电能、氢能和热能的转换提供了必要的条件。

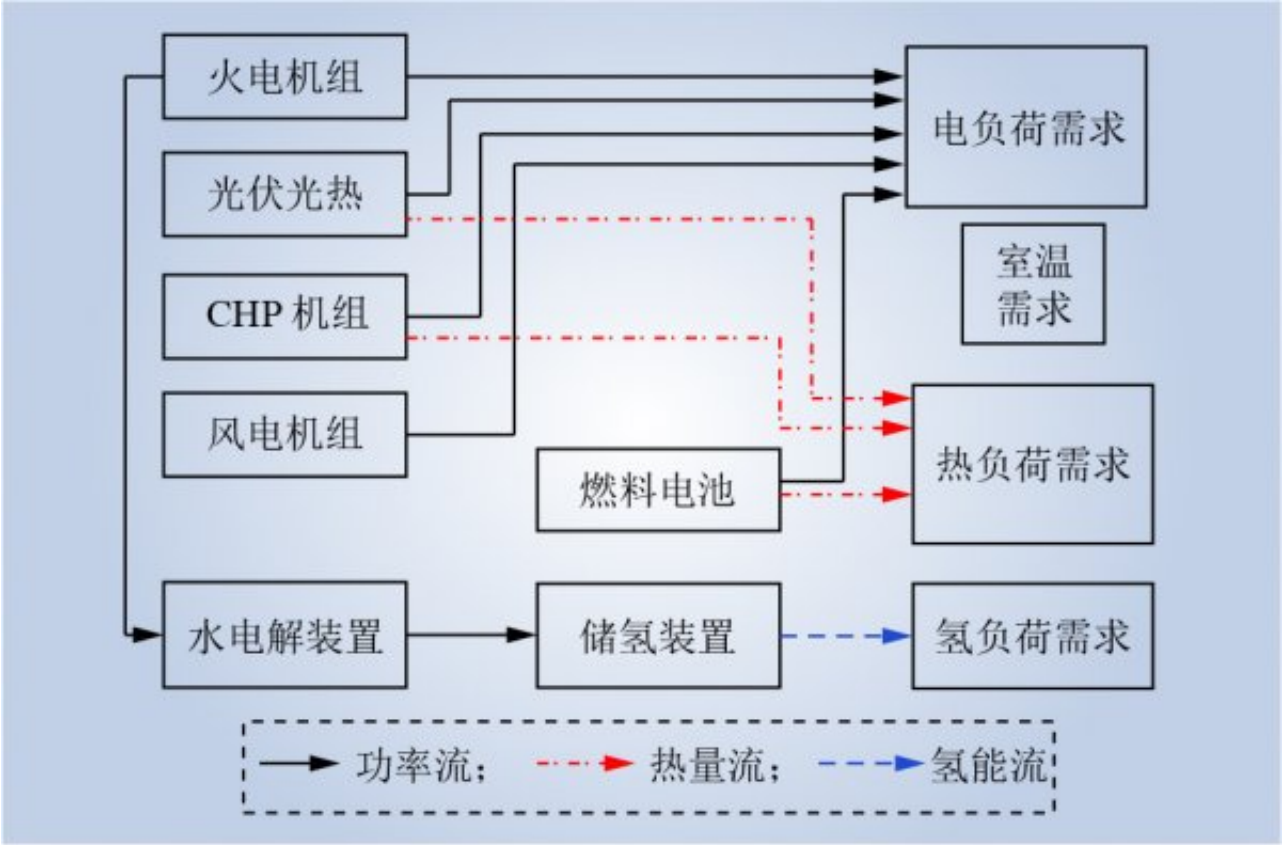

图 2　含风电制氢装置的综合能源系统

Fig. 2　Integrated energy system with hydrogen production

综合能源系统内的风电制氢-燃料电池装置如图3所示，该装置包括风力发电机、水电解装置、燃料电池装置、储氢装置、压缩装置、整流和逆变装置，以及控制系统等。风力发电机产生的电能经变压器流入电网，在满足本地电负荷需求后，富余风电可通过整流装置向水电解装置输入直流电进行电解水。通过电解水产生的氢气经由氢出气管进入氢冷却分离器进行冷却分离后排出，即可得到高纯度的氢气。所获得的氢气通过管道及压缩装置集中注入储氢设备中，一部分用于工业与交通运输，另一部分用于燃料电池发电。风电制氢-燃料电池的分布式供能装置的控制系统主要包含以下功能：（1）功率平衡控制。根据电能调度、制氢以及燃料电池发电系统的需求进行风力发电控制，满足电力系统的功率平衡；（2）风力发电电压控制。利用无功补偿设备等可控设备实现风力发电输出电压的稳定；（3）风电制氢及燃料电池发电系统控制。根据电网负荷需求、风力发电功率控制电解水制氢及燃料电池发电装置的运行。

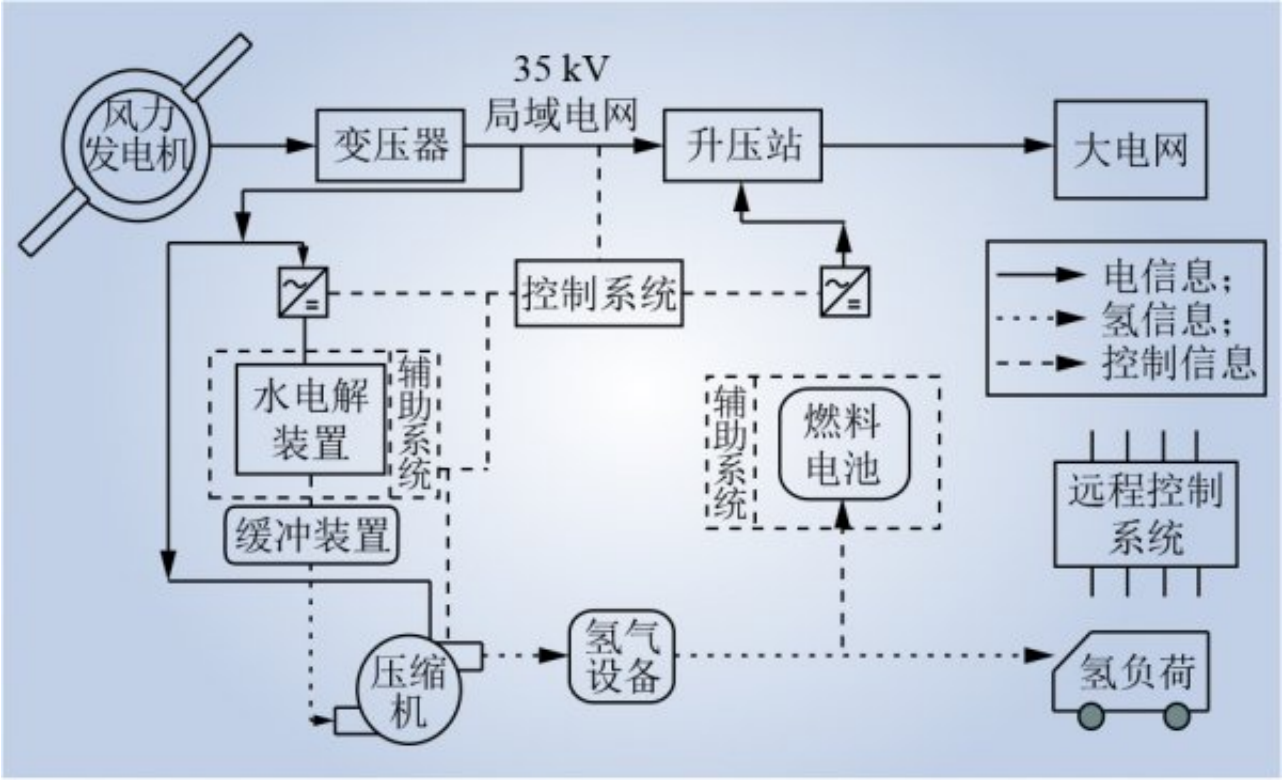

图 3 风电制氢-燃料电池装置运行流程

Fig. 3 Process of hydrogen production - fuel cell device

综合能源系统内的热力系统包括热源、热网、热交换站和热负荷4部分[14]。热力系统可分为传输系统（一次管网）和分配系统（二次管网）。其中，从热源至热交换站部分称为一次管网，从热交换站到热负荷部分称为二次管网，是由热交换站将热能传输至用热负荷的分配系统。一次管网和二次管网通过热交换站进行热量交换，同时热交换站作为一次管网的热负荷，以及二次管网的热源[15-16]。本文主要考虑热力系统中的一次管网部分，将热交换站视为整个系统的热负荷。在一次管网中，传热介质通过供水管网将热量从各个热源输送到各个热交换站，再通过回水管网将剩余热量回到热源[17]。热力系统中热能的传输过程如图4所示。

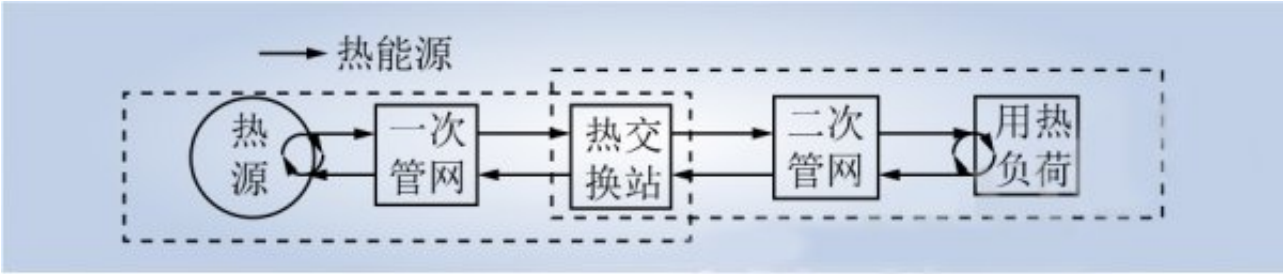

图 4 热力系统中热能的传输过程

Fig. 4 Thermal energy transfer process in a thermal system

2含风电制氢装置的综合能源系统能量转换模式

本文所研究的含电制氢装置的综合能源系统具备多种不同形式的能量流动和负荷需求，不同能量形式之间存在多种耦合关系，并在综合能源系统中相互转化。本文从不同负荷的供需情景以及相应燃料电池、电解装置以及热电联产（CHP）机组的运行状态出发，给出4种主要的运行方式。对应负荷及装置的运行情况如表1所示。

表 1　系统不同负荷供需情景下各装置的运行情况

Table 1　System operation mode of different demand cases

情景	火电机组	光伏光热	电解装置	燃料电池	CHP
1	+	+	−	−	−
2	+	+	+	−	−
3	+	+	+	+	+
4	+	+	−	+	+

注：“+”代表装置处于运行状态；“−”代表装置处于停机状态

（1）情景1：储氢模式。电解装置、燃料电池以及CHP机组均不工作。此时，火电机组和新能源发电可满足电负荷需求，光伏光热系统可满足热负荷需求，氢负荷需求小，氢气储存量保持稳定或缓慢减小。

（2）情景2：制氢模式。电解装置工作，燃料电池和CHP机组不工作。此时，火电机组和新能源发电可满足电负荷需求，光伏光热系统可满足热负荷需求，富余的风力发电转换为氢气存储并满足氢负荷需求。

（3）情景3：制氢产热模式。电解装置、燃料电池以及CHP机组均工作。此时，火电机组、新能源发电、燃料电池以及CHP机组共同满足电负荷需求，光伏光热系统、燃料电池和CHP机组共同满足热负荷需求，CHP机组可作为热负荷在极端情况下的支撑，富余的风力发电转换为氢气存储。

（4）情景4：产热模式。电解装置不工作，燃料电池和CHP机组工作。此时，火电机组、新能源发电、燃料电池以及CHP机组共同满足电负荷需求，光伏光热系统、燃料电池和CHP机组共同满足热负荷需求，CHP机组可作为热负荷在极端情况下的支撑，氢气转换为电能和热能，储氢量下降。

本文研究的含电制氢装置的综合能源系统中，上述4种模式为不同能量之间转换的主要方式，实际运行中能量之间的耦合关系复杂，可通过所建模型进行优化。

3含电制氢装置的综合能源系统优化模型

3.1目标函数

考虑风电优先消纳的前提下，以综合能源系统总运行成本最低为目标，构建含风电制氢装置的综合能源系统优化模型[18-22]，目标函数为

$$\min f = f_c + f_{chp} + f_d + f_e \tag{2}$$

式中：f_c 为火电机组总运行成本；f_d 为氢气压缩装置的运行成本；f_{chp} 为 CHP 机组燃煤成本[16]；f_e 为氢气与热力管道介质传输成本，其中：

$$f_c = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t}[f_i(P_{i,t}) + (1-u_{i,t-1})S_{i,t}]$$

$$f_{chp} = \sum_{t=1}^{T} c_{chp} P_{chp,t}$$

$$f_d = \sum_{t=1}^{T} c_{He} V_{He,t}$$

$$f_e = \sum_{t=1}^{T}\left[c_{Hy} V_{Hy,t} + c_{Heat}\left(H_t + H_{chp,t} + \sum_{j=1}^{N_V} H_{G,j,t}\right)\right]$$

式中：T 为优化周期；N_G 为综合能源系统内火电机组的数量；$P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的输出功率；$u_{i,t}$ 为表示 t 时段机组 i 运行状态的 0-1 变量；c_{chp} 为 CHP 机组燃煤成本系数；$P_{chp,t}$ 为 CHP 机组在 t 时段运行时的输出功率；c_{He} 为压缩机单位气体压缩成本；$V_{He,t}$ 为 t 时段电解装置产生氢气的体积；c_{Hy} 为单位氢气的传输成本；$V_{Hy,t}$ 为 t 时段传输的氢气总体积；c_{Heat} 为热源热功率的单位传输成本；H_t 为燃料电池在 t 时段燃烧氢气时释放的热功率；$H_{chp,t}$ 为 CHP 机组在 t 时段运行时释放的热功率；$H_{G,j,t}$ 为第 j 台光伏光热装置在 t 时段释放的热功率；N_V 为系统内光伏光热装置的数量。

火电机组的发电费用 $f_i(P_{i,t})$ 为

$$f_i(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 \tag{3}$$

式中：a_i、b_i、c_i 为机组 i 的发电费用系数。

t 时段机组 i 的启动费用 $S_{i,t}$ 为

$$S_{i,t} = \begin{cases} S_{hot,i}, & T_{off,i}^{min} \leqslant T_{i,t} \leqslant T_{off,i}^{min} + T_{cold,i} \\ S_{cold,i}, & -T_{i,t} > T_{off,i}^{min} + T_{cold,i} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$T_{off,i}^{min}$ 为机组 i 的最小停机时间；$T_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段连续运行时间或连续停机时间，连续运行时为正，连续停机时为负；$T_{cold,i}$ 为机组 i 的冷启动时间。

3.2约束条件

3.2.1 综合能源系统的整体功率平衡约束

整体功率平衡约束可表示为

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t} + \sum_{i=1}^{N_W} P_{i,t}^{w} + \sum_{i=1}^{N_V} P_{i,t}^{v} - P_{e,t} + P_t + P_{chp,t} = P_{load,t} \tag{5}$$

式中：N_W 为综合能源系统中风电机组的数量；$P_{i,t}^{w}$ 为风电机组 i 在 t 时段的输出功率；$P_{i,t}^{v}$ 为光伏电池 i 在 t 时段的输出功率；$P_{e,t}$ 为水电解装置在 t 时段吸收的功率；P_t 为燃料电池在 t 时段放出的

功率；$P_{\mathrm{load},t}$为综合能源系统在t时段的总负荷。其中，电解装置仅在系统风电富余时或氢气储量不足以满足负荷需求时制氢，燃料电池仅在新能源完全消纳时发电，因此$u_{\mathrm{e},t}$、u_t满足约束为

$$w_{\mathrm{e},t}u_{\mathrm{e},t}+w_t u_t \leqslant 1 \tag{6}$$

式中：$w_{\mathrm{e},t}$，w_t为水电解装置及燃料电池装置的初始化状态参数，0表示水电解装置处于强制停机状态，1表示处于可调节工作状态，初始化参数在初始化时赋值；$u_{\mathrm{e},t}$，u_t为水电解装置和燃料电池的运行状态0-1变量，0表示水电解装置处于停机状态，1表示处于工作状态。

3.2.2 风电制氢-燃料电池装置约束

在风电制氢-燃料电池装置中，电解水过程吸收功率并产生氢气，吸收功率和氢气产出之间的关系为

$$P_{\mathrm{e},t}=\eta_{\mathrm{e}}V_{\mathrm{He},t} \tag{7}$$

式中：$P_{\mathrm{e},t}$为t时段电解水过程中吸收的功率，包括整流器损耗和氢气压缩功率消耗；η_{e}为产出单位体积氢气所损耗功率。

燃料电池氢气消耗和输出功率之间的关系为

$$P_t=\eta_{\mathrm{H}}V_{\mathrm{Hf},t} \tag{8}$$

式中：η_{H}为消耗单位体积氢气所释放的功率；$V_{\mathrm{Hf},t}$为t时段燃料电池消耗氢气的体积。

电解装置和燃料电池的运行还受到以下约束。

$$\begin{aligned}&P_{\mathrm{e}}^{\min}w_{\mathrm{e},t}u_{\mathrm{e},t}\leqslant P_{\mathrm{e},t}\leqslant P_{\mathrm{e}}^{\max}w_{\mathrm{e},t}u_{\mathrm{e},t}\\&P^{\min}w_t u_t\leqslant P_t\leqslant P^{\max}w_t u_t\end{aligned} \tag{9}$$

式中：$P_{\mathrm{e}}^{\max}$和$P^{\max}$分别为电解装置消耗功率和燃料电池输出功率的最大值；$P_{\mathrm{e}}^{\min}$和$P^{\min}$分别为电解装置消耗功率和燃料电池输出功率的最小值。

氢气的存储平衡约束为

$$V_{\mathrm{H},t+1}=V_{\mathrm{H},t}+\frac{P_{\mathrm{e},t}}{\eta_{\mathrm{e}}}\Delta t-\frac{P_t}{\eta_{\mathrm{H}}}\Delta t-V_{\mathrm{Hload},t} \tag{10}$$

式中：$V_{\mathrm{H},t}$为t时段储氢装置中氢气容量；$V_{\mathrm{Hload},t}$为t时段氢气负荷的需求量。

氢气的可储存量和风力发电机的功率约束为

$$0\leqslant V_{\mathrm{H},t}\leqslant V_{\mathrm{H}}^{\max} \tag{11}$$

$$0\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{w}}\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{w},\max} \tag{12}$$

$$0\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{v}}\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{v},\max} \tag{13}$$

式中：$V_{\mathrm{H}}^{\max}$为最大的储氢容量；$P_{i,t}^{\mathrm{w},\max}$为第$i$个风电机组的最大输出功率；$P_{i,t}^{\mathrm{v},\max}$为第$i$个光伏电池

的最大输出功率。

3.2.3 热力系统约束

热力网的总热出力平衡约束[18]为

$$H_{L,t}=\eta_{heat}\left(\sum_{i=1}^{N_V}H_{G,i,t}+H_t+H_{chp,t}-H_{loss,t}\right) \tag{14}$$

式中：$H_{L,t}$为综合能源系统在时段t时的热负荷；η_{heat}为供热网络的热能利用比例；$H_{loss,t}$为t时段的管道热功率损耗。

热力系统中通过燃料电池和光伏光热系统满足热负荷需求。传统的燃气轮机热电联产具有“以热定电”以及“以电定热”2种运行方式[20]，本文以消纳清洁电能为目标，且热电需求比明显小于燃料电池额定热电比，故假设燃料电池装置及CHP机组均处于“以电定热”模式，燃料电池、CHP机组的热电比约束以及CHP机组出力上、下限约束分别为

$$H_t=K_H P_t \tag{15}$$

$$H_{chp,t}=K_{chp}P_{chp,t} \tag{16}$$

$$P_{chp}^{min}\leqslant P_{chp,t}\leqslant P_{chp}^{max} \tag{17}$$

式中：K_H为热电比值；K_{chp}为CHP机组的热电比值。

热力系统通过水传输热量，热负荷节点所吸收的热功率$H_{L,t}$为

$$H_{L,t}\Delta t=c_w Q_L(T_{g,t}-T_{h,t}) \tag{18}$$

式中：c_w为水的比热容；Q_L为流经热负荷的水质量；$T_{g,t}$为供水温度；$T_{h,t}$为回水温度。

热力系统在热能传输过程中存在热功率损耗，根据文献[21]提出的模型，有

$$H_{loss,t}\Delta t=\lambda_w Q_L(T_{g,t}-T_{0,t}) \tag{19}$$

式中：$T_{0,t}$为t时刻的环境温度；λ_w为热源点至热交换站的传热系数，此系数与节点间距呈线性关系，在本模型中假设各热源与热交换站节点距离相等，即λ_w为固定常数。

此外，在管道传输过程中，供水温度与回水温度受管道传输设备允许值限制，即

$$\begin{cases}T_g^{min}\leqslant T_{g,t}\leqslant T_g^{max}\\T_h^{min}\leqslant T_{h,t}\leqslant T_h^{max}\end{cases} \tag{20}$$

3.2.4 CHP机组约束

本文设计的综合能源系统中包含一台CHP机组以满足系统在用热高峰期的热能供给，其爬坡

约束[16]为

$$-D_{\mathrm{chp}}^{\max} \leqslant P_{\mathrm{chp},t+1} - P_{\mathrm{chp},t} \leqslant U_{\mathrm{chp}}^{\max} \tag{21}$$

式中：$D_{\mathrm{chp}}^{\max}$和$U_{\mathrm{chp}}^{\max}$分别为 CHP 机组上、下爬坡功率限制。

3.2.5 火电发电机组约束

本文设计的综合能源系统中除了风电制氢-燃料电池等设备，也包含传统火电机组。火电机组的旋转备用约束、输出功率上下限约束、上爬坡和下爬坡约束以及冷热启动约束分别[15]为

$$P_{\mathrm{load},t} + R_t \leqslant \sum_{t=1}^{N_{\mathrm{G}}} u_{i,t} P_i^{\max} \tag{22}$$

$$u_{i,t} P_i^{\min} \leqslant P_{i,t} \leqslant u_{i,t} P_i^{\max} \tag{23}$$

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leqslant u_{i,t-1} P_{\mathrm{up},i} + (u_{i,t} - u_{i,t-1}) P_{\mathrm{start},i} + \\ \quad (1 - u_{i,t}) P_i^{\max} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leqslant u_{i,t} P_{\mathrm{down},i} + (u_{i,t-1} - u_{i,t}) P_{\mathrm{shut},i} + \\ \quad (1 - u_{i,t-1}) P_i^{\max} \end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases} (u_{i,t-1} - u_{i,t})(T_{i,t-1} - T_{\mathrm{on},i}^{\min}) \geqslant 0 \\ (u_{i,t} - u_{i,t-1})(-T_{i,t-1} - T_{\mathrm{off},i}^{\min}) \geqslant 0 \end{cases} \tag{25}$$

式中：R_t为系统的总备用功率；$P_{i,t}^{\max}$和$P_{i,t}^{\min}$分别为机组 i 在 t 时段的最大和最小输出功率；$P_{\mathrm{up},i}$为机组 i 的上升功率限制；$P_{\mathrm{start},i}$为机组 i 的启动功率限制；$P_{\mathrm{down},i}$为机组 i 的功率下降限制；$P_{\mathrm{shut},i}$为机组 i 的停机功率限制；$T_{\mathrm{on},i}^{\min}$为机组 i 的最小开机时间；$T_{\mathrm{off},i}^{\min}$为机组 i 的最小关机时间。

4含电制氢装置的综合能源系统优化求解

本文所建立的含电制氢装置的综合能源系统优化模型为混合整数规划模型，通过Matlab2014a平台调用GUROBI8.0.1软件对该模型进行求解，含初始化赋值的求解流程如图5所示。

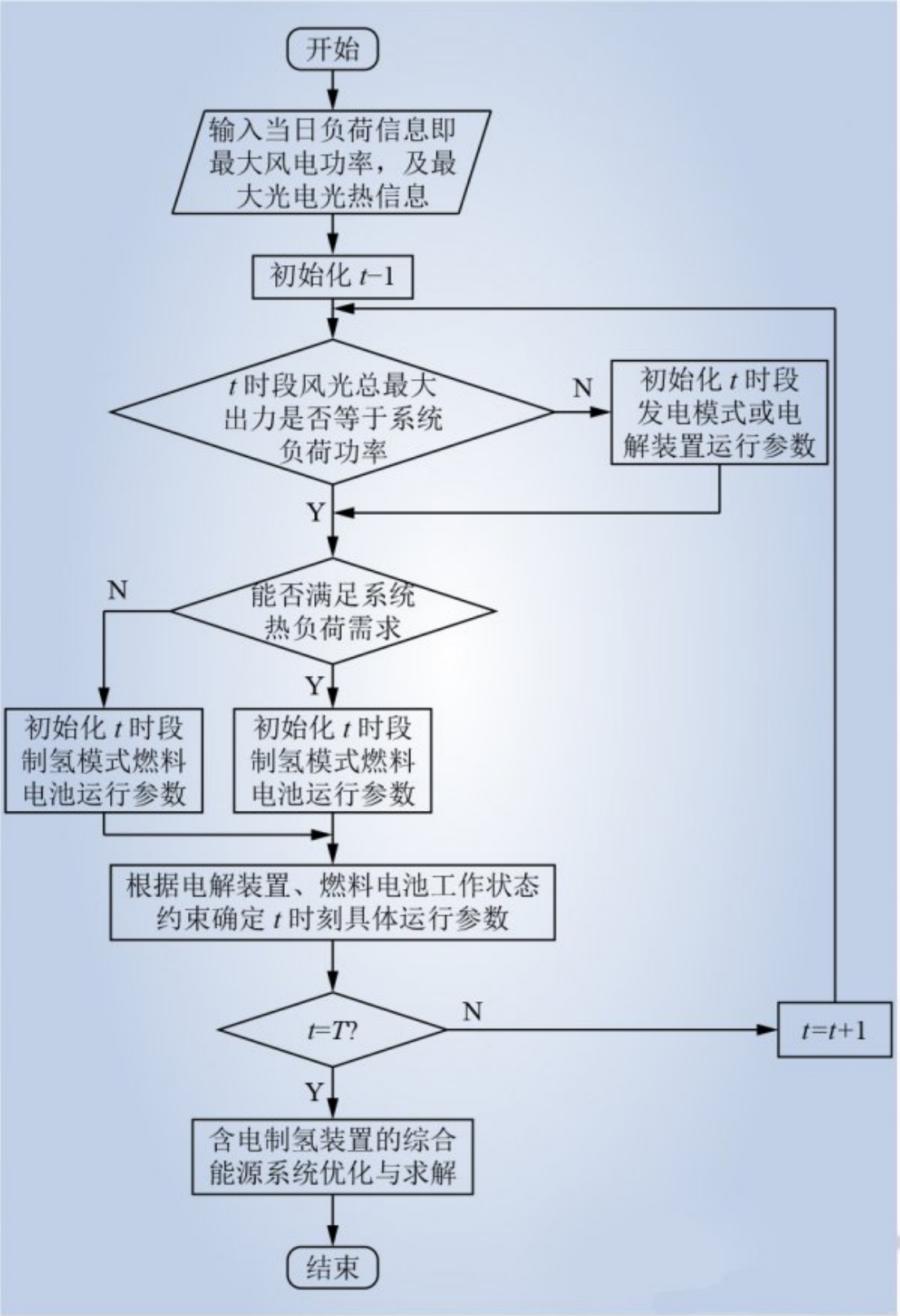

图 5 含风电制氢装置的综合能源系统优化求解

Fig. 5 Optimized solution for integrated energy systems with hydrogen

5算例分析

5.1基本数据

本文所设计的综合能源系统包括风电机组2台、电制氢装置1台、燃料电池1台、储氢装置1个、燃煤CHP机组1台、太阳能光伏光热装置1台、火电机组10台、热交换站1个；优化周期T=24h；时间间隔Δt=1h。

5.2含电制氢装置的综合能源系统分析

5.2.1风力发电消纳分析

对比分析了是否含有风电制氢-燃料电池的2种综合能源系统运行结果。图6为2个系统中风电的消纳情况，图7为电制氢过程氢气的储存量。结合图6和图7可知，含电制氢的综合能源系统中风电的消纳量高于不含电制氢装置的系统，并且电制氢装置在风电富余时通过能量转换实现了能量的存储。所产出的氢气既可以供给工业氢负荷使用，同时可通过燃料电池发电满足电力负荷需求。表1对比了综合能源系统总的弃风量，含电制氢装置的综合能源系统弃风量减少了2910MW。因此，含电制氢的综合能源系统有效减少了弃风量并促进风电消纳。

图8为风电制氢-燃料电池装置的联合运行情况，受到风电出力、电负荷以及氢负荷的共同影响，电解水制氢装置与燃料电池装置分别工作。在风电富余时，电制氢装置获得功率输入，产生氢气并存储；在燃料电池工作过程中，一方面能够产生电能满足电力负荷需求，另一方面在燃料电池运行过程中产生的热能可供给热负荷，实现了资源的最大化利用。图9为各个装置24h的出力情况，电解装置主要在风电富余时段（01:00—02:00，05:00，22:00—24:00）工作制氢，充分利用了富余的风电；同时，燃料电池主要在负荷高峰期工作（08:00—16:00），实现了风电转为氢能储存后再被利用的过程，从而促进了清洁能源的消纳。

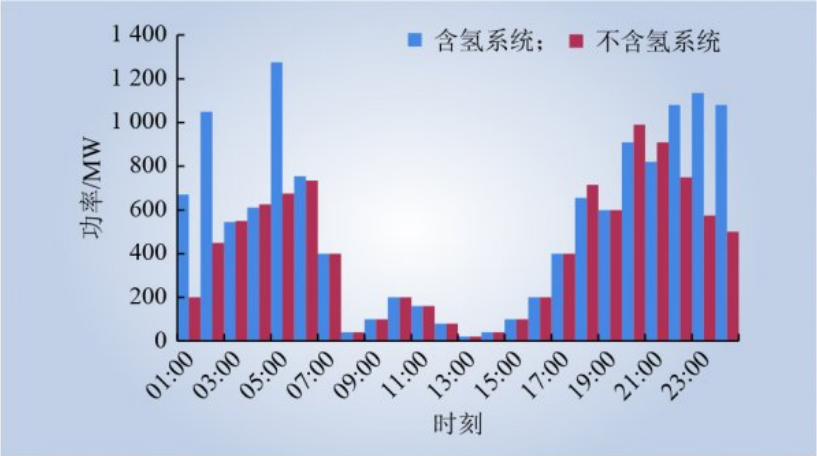

图 6 风电机组投入系统总出力情况对比

Fig. 6 Comparison of total output of wind turbines to the power system

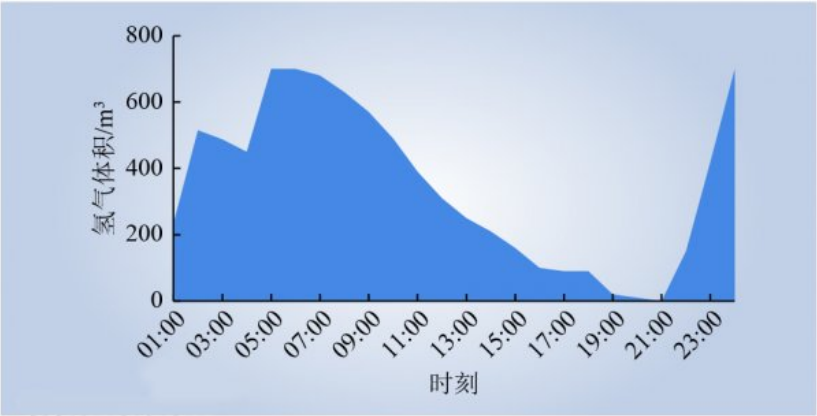

图 7 氢气储存量

Fig. 7 Hydrogen storage amount

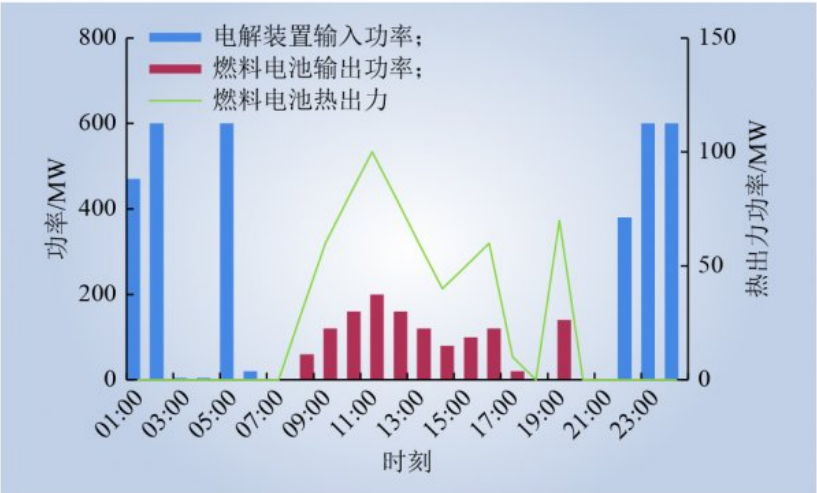

图 8 含氢装置运行情况

Fig. 8 Operation of devices with hydrogen

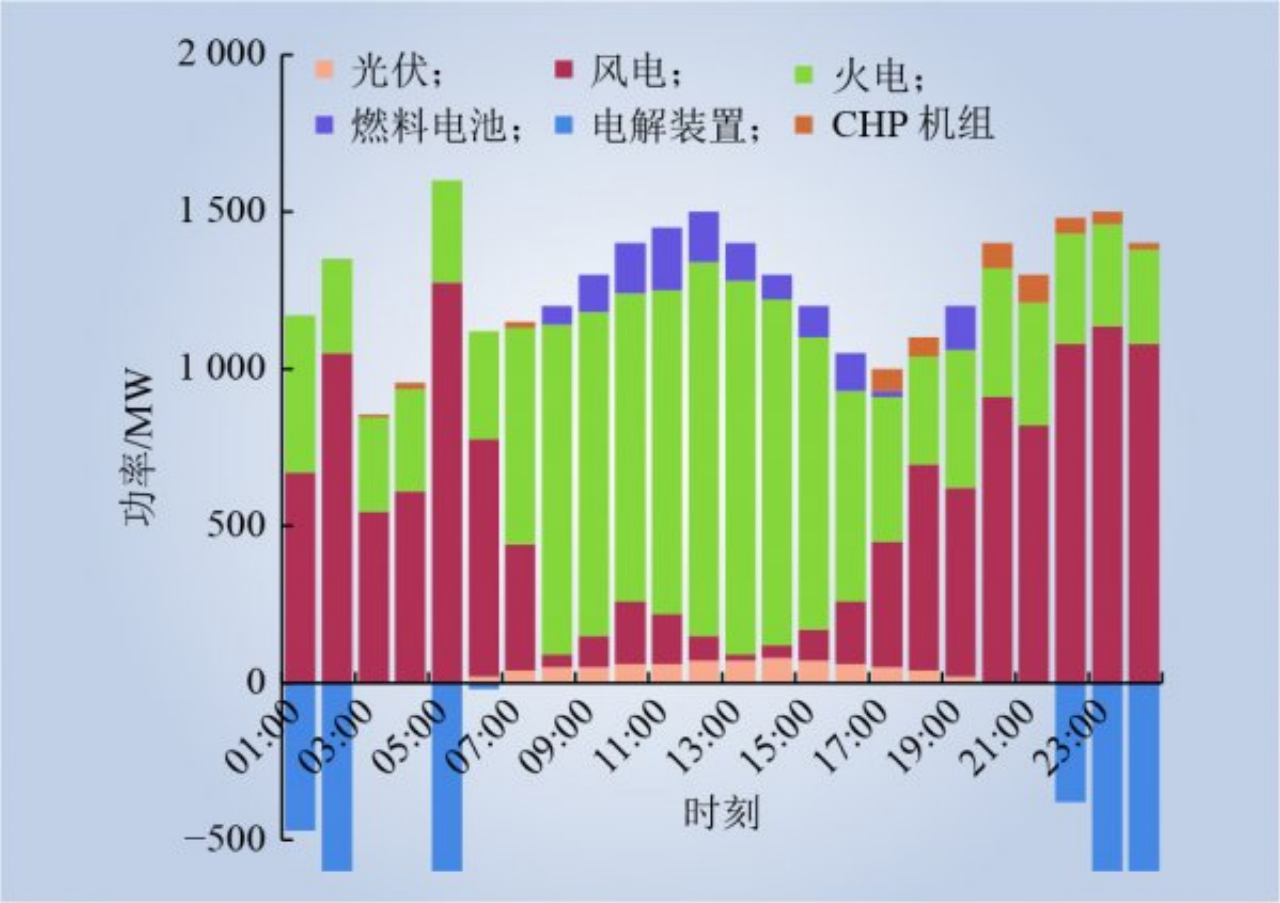

图 9 含电制氢装置的综合能源系统各机组出力分布

Fig. 9 Power output of integrated energy system with hydrogen production

表2为是否含有风电制氢-燃料电池装置的综合能源系统运行成本对比，引入风电制氢-燃料电池装置后系统的总运行经济成本降低了7.80万元。在不考虑装置本身成本的条件下，引入风电制氢-燃料电池装置提高了综合能源系统的经济性。

表 2 两种综合能源系统运行结果对比

Table 2 Comparison of operational results between two integrated energy systems

系统	系统运行总成本/万元	风电消纳量/MW
含氢	47.43	12 925
不含氢	55.23	10 015

5.2.2氢负荷变化对系统影响分析

对于工业氢气的使用在综合能源系统中可视为氢负荷，为进一步分析氢负荷变化对综合能源系统运行的影响，设计3种氢气负荷需求变化如图10所示，3种情景下氢气的总负荷相同，对比不同时段氢气负荷的峰谷需求对清洁能源消纳以及系统经济成本的影响。

图11、图12分别为氢气储存量和风电消纳量的变化情况，在情景1时，由于氢负荷的峰值与风电出力的峰值重合，风电制氢装置会尽可能增加氢气的产出以满足氢负荷的需求，相应的情景1的氢气储存量有所降低，氢气主要供给氢负荷使用。情景3在07:00—21:00氢气储存量缓慢下降，其氢负荷需求的高峰期暂未来临，因此氢气主要通过燃料电池装置进行发电满足电负荷需求。

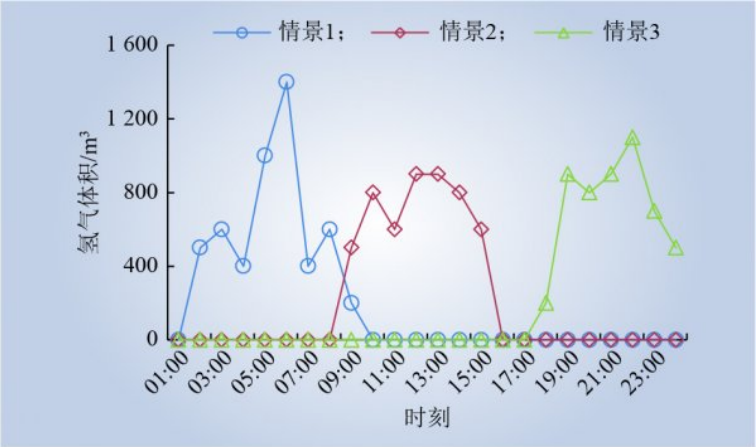

图 10　3 种情况下的氢气负荷需求

Fig. 10　Hydrogen load demand in the three testing cases

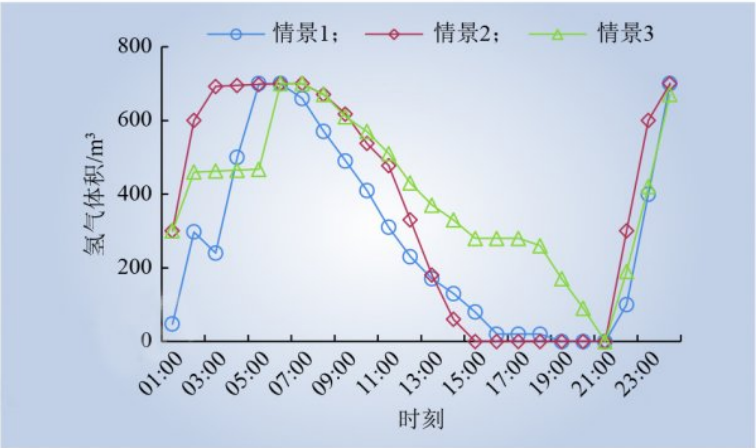

图 11　3 种情况下的储氢量

Fig. 11　Hydrogen storage in the three cases

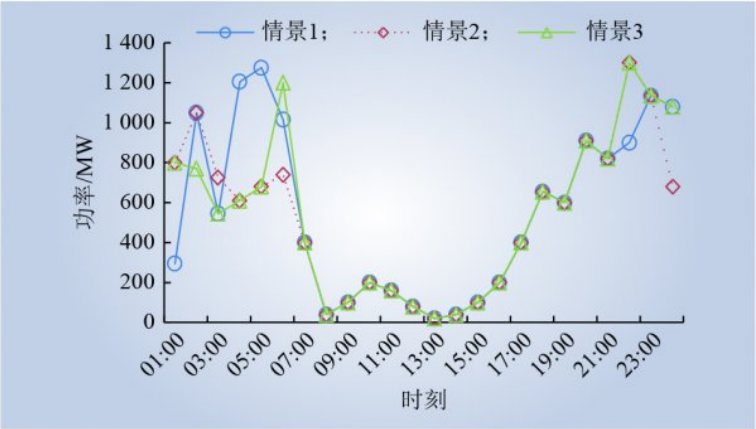

图 12　3 种情况下风电消纳量的对比

Fig. 12　Comparison of wind power consumption in the three cases

表3为不同氢气负荷需求下系统的运行成本和风电的弃风量。在情景1的条件下，氢负荷需求与风电机组出力的峰谷趋势相同，即同峰同谷，此时综合能源系统的运行成本最低为52.19万元，风电的总弃风功率也最小为5415MW；在情景2的条件下，氢负荷需求与风电机组出力的峰谷趋势相反，即氢气负荷的峰值出现在风电机组出力的谷值，此时综合能源系统的运行成本最高为66.17万元，风电的总弃风功率最大为6195MW。因此，不同时段下的氢气负荷需求会对新能源的消纳以及经济成本造成影响，且在最大风电机组出力波动趋势与氢气负荷需求波动趋势相同时，能够获得较好的经济效益并促进新能源的消纳，减少了含碳气体的排放，提升了系统的总体效益。

表 3　3种情况下综合能源系统运行结果对比

Table 3　Results of integrated energy systems in the three cases

情景	系统运行总成本/万元	总弃风功率/MW
1	52.19	5 415
2	66.17	6 195
3	57.92	5 795

6结论

本文考虑了风电制氢装置在综合能源系统中的应用，基于综合能源系统的不同控制方式，提出了含电制氢装置的综合能源系统优化模型，计及了多种能源之间的相互转化，能够同时满足电力、氢气以及热负荷需求。算例仿真结果验证了所提模型的有效性，分析了风电制氢装置对于降低系统运行成本、提高清洁能源消纳量的重要作用，对比了不同氢气负荷需求下系统的运行情况，合理安排氢气负荷有利于进一步促进系统绿色、经济运行。

（1）相比于传统的综合能源系统，本文所提含风电制氢的综合能源系统可利用电制氢装置实现电能向氢能的转换，一方面满足工业氢气的使用，另一方面有利于提高富余风电的消纳，同时降低了系统的运行成本。

（2）对比综合能源系统中不同的氢负荷需求下的运行结果可知，合理安排氢气负荷需求有利于进一步促进综合能源系统的绿色、经济运行。

下一步将考虑可再生能源不确定性对综合能源系统运行的影响。

参考文献：

[1] 于晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1–13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, *et al*. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1–13.

[2] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考 [J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16–25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16–25.

[3] 李更丰, 别朝红, 王睿豪, 等. 综合能源系统可靠性评估的研究现状及展 [J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 114–121.
LI Gengfeng, BIE Zhaohong, WANG Ruihao, *et al*. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114–121.

[4] PATRCIO R A, SALES A D, SACRAMENTO E M, *et al*. Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceara Brazil[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(9): 7355–7364.

[5] 吉平, 周孝信, 宋云亭, 等. 区域可再生能源规划模型述评与展望 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2071–2079.
JI Ping, ZHOU Xiaoxin, SONG Yunting, *et al*. Review and prospect of regional renewable energy planning models[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2071–2079.

[6] 韩爽, 刘永前, 杨勇平, 等. 风氢混合能源系统 [J]. 电力建设, 2009, 30(4): 15–18.
HAN Shuang, LIU Yongqian, YANG Yongping, *et al*. Wind-hydrogen hybrid energy system[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(4): 15–18.

[7] 王冰, 侍崇诗, 黄明宇, 等. 燃料电池供氢系统的研究进展 [J]. 现代化工, 2018, 38(1): 35–39, 41.
WANG Bing, SHI Chongshi, HUANG Mingyu, *et al*. Research progress of hydrogen supply system in fuel cells[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(1): 35–39, 41.

[8] 蔡国伟, 孔令国, 薛宇, 等. 风氢耦合发电技术研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 130–131.
CAI Guowei, KONG Lingguo, XUE Yu, *et al*. Overview of research on wind power coupled with hydrogen production technology[J].

Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 130–131.

[9] BERNALAGUSTIN J, DUFOLOPEZ R. Hourly energy management for grid-connected wind hydrogen systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(22): 6401–6413.

[10] 方世杰, 邵志芳, 张存满. 并网风电耦合制氢系统经济性分析 [J]. 能源技术经济, 2012, 24(3): 39–43.
FANG Shijie, SHAO Zhifang, ZHANG Cunman. Economic analysis on on-grid wind power coupling with hydrogen production system[J]. Energy Technology Economics, 2012, 24(3): 39–43.

[11] 张建良, 吴越, 齐冬莲. 风电制氢-燃料电池微网试验系统的设计 [J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(1): 54–58.
ZHANG Jianliang, WU Yue, QI Donglian. Design of wind power hydrogen coupled with fuel cell microgrid experimental system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2017, 36(1): 54–58.

[12] ULLEBERG Ø. Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 1998.

[13] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合系统控制策略 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 84–94.
CAI Guowei, CHEN Chong, KONG Lingguo, *et al*. Control of hybrid system of wind/hydrogen/fuel cell/supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 84–94.

[14] 邹云阳, 杨莉, 冯丽, 等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13–19.
ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, *et al*. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13–19.

[15] 王婉璐, 杨莉, 王蕾, 等. 考虑供热网储热特性的电-热综合能源系统优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 45–55.
WANG Wanlu, YANG Li, WANG Lei, *et al*. Optimal dispatch of integrated electricity-heat energy system considering heat storage characteristics of heating network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 45–55.

[16] 陈群, 郝俊红, 陈磊, 等. 电-热综合能源系统中能量的整体输运模型 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 7–13.
CHEN Qun, HAO Junhong, CHEN Lei, *et al*. Integral transport model for energy of electric-thermal integrated energy system[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(13): 7–13.

[17] 石兆玉. 供热系统运行调节与控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.

[18] 余东津, 端木琳. 光伏光热系统提高效率的方法 [J]. 区域供热, 2019(1): 94–102.

[19] 全然, 韦化, 简金宝. 求解大规模机组组合问题的二阶锥规划方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 101–107.
QUAN Ran, WEI Hua, JIAN Jinbao. Solution of large scale unit commitment by second-order cone programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 101–107.

[20] 刘天琪, 卢俊, 何川, 等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 261–268.
LIU Tianqi, LU Jun, HE Chuan, *et al*. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 261–268.

[21] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305–1315.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, *et al*. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceeding of the CSEE, 2017, 37(5): 1305–1315.

[22] 董帅, 王成福, 徐士杰, 等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 12–19.
DONG Shuai, WANG Chengfu, XU Shijie, *et al*. Day -ahead optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 12–19.

作者简介：

郭梦婕 (1994—)，女，硕士研究生，从事综合能源系统、多能互补研究，E-mail: conygmj@foxmail.com；

严正 (1964—)，男，通信作者，教授，博士生导师，从事电力系统优化运行、综合能源系统研究，E-mail: yanz@sjtu.edu.cn；

周云 (1990—)，男，博士，讲师，从事电力系统及综合能源系统运行优化与韧性提升研究，Email: yun.zhou@sjtu.edu.cn；

张沛超 (1979—)，男，博士，副教授，从事电力系统保护与控制、能源互联网研究，E-mail: pezhang@sjtu.edu.cn。

（责任编辑　蒋东方）

（下转第 161 页）

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/168461.html