考虑制氢储能参与的互联电力系统优化调度研究

刘志坚，余莎，梁宁

（昆明理工大学电力工程学院，云南昆明650504）

摘要：在能源互联网背景下，可再生能源发电并网比例快速增长，而由于风电出力特性等因素的影响，风电并网时出现大量弃风，未能实现全消纳。以减少弃风为前提，运行成本和环境成本最小为目标，构建含制氢储能的电-气综合能源日前经济调度模型。通过对比系统中制氢储能单元参与前后的弃风电量、运行成本和环境成本，验证了制氢储能对减少弃风，提高系统经济性和环保性的作用。仿真算例表明：构建的电-气综合能源系统，在很大程度上实现了风电全额消纳，且制氢储能的参与使整个系统的经济性和环保性都有所提高。在能源互联网的背景下，该模型的提出对系统能够经济、环保地运行具有重要意义。

引言

随着可再生能源发电系统的不断开发，将逐渐减少化石能源的使用，这对于能源短缺、环境污染等一系列问题的解决具有重要意义[1]。我国电力系统的电能生产及消费结构随着可再生能源的快速发展也发生了深刻的变革，能源互联网的概念在这一时代背景下顺应提出，微电网、智能电网等新兴电网技术与互联网技术相互结合，同时能源网络与信息网络深度融合，共同构建新一代能源互联网[2]。在能源互联网背景下，新能源发电将在能源系统中扮演重要角色[3]。风电出力特性具有不确定性，在统筹协调风电、储能和火电等出力来实现优化调度时需考虑这一不确定因素，通过发展储能，可减少该不确定性对电力系统经济运行产生的影响，增加系统的新能源消纳[3]。对于抽水蓄能、压缩空气储能等常规储能方式，对新能源消纳虽有一定的优势，但在应对大容量、长周期储能需求时尚有不足之处[4]。因此，本文通过构建含制氢储能的电-气综合能源日前经济调度模型，在系统中引入了制氢储能这一跨能源领域的储能方式，利用新能源弃电量将电能转化为氢能，在大能源互联网的背景下，该模型的提出对系统能够经济、环保的运行具有重要意义。

新能源发电技术发展的同时系统的弃风问题也日益严重，为保证新能源能够尽可能全额消纳，在电源侧或电网侧投资兴建大型消纳设备的技术手段具有良好的可行性[5]。文献[6]在发电侧引入储能技术，提出分散式调度模型，实现风电的跨区域消纳；文献[7]基于风储一体化电站中电池储能系统，建立含弃风量最小的多目标优化模型，实现风电消纳。文献[8]基于微网型能源集线器模型，对含电转气（P2G）多源储能型微网系统进行建模，验证了P2G消纳可再生能源的潜力；文献[9]提出的P2G考虑了电转氢和电转天然气两阶段能量流动，将混合储能系统与微网结合，在风电并网时保证了系统的经济性和环保性。

综上所述，本文在对氢储能系统建模的基础上，以减少弃风为前提，运行成本和环境成本最小为目标，构建含制氢储能的电-气综合能源日前经济调度模型。算例分析结果表明，本文所构建的电-气综合能源系统，在实现弃风量最小的同时，可保证系统的经济性，并兼顾环境效益。验证了制氢储能对减少弃风，提高系统经济性和环保性的作用。

1制氢混合储能系统在电-气综合能源系统中的构建

1.1氢储能系统数学模型

氢是一种高能燃料，其单位燃烧热值为1.4×10^{8} J/kg，是仅次于核燃料的高能燃料，且氢能作为清洁能源无污染，适合大规模的储能。在能源互联网中的应用前景广泛。

氢储能系统包括燃料电池、电解槽和氢罐3部分，由于经济调度问题涉及氢储能系统在能量转化过程中的能量损失，故首先对燃料电池和电解槽建立数学模型，氢罐作为储氢设备暂且不计。二者的数学模型本文采用通用模型，详见文献[10]。

（1）燃料电池模型

氢燃料电池是利用氢气和氧气发生电化学反应生成水并发电的设备，由于电池内部的各种电压损失，电池的电压要小于热力学上的理论电压。电池电势如式（1）所示。

$$U_{\text{cell}} = U_0 - U_{\text{conc,a}} - U_{\text{conc,c}} - U_{\text{act,a}} - U_{\text{act,c}} - U_{\text{ohm}} \quad (1)$$

$$U_{\text{conc}} = \frac{RT}{nF}\ln\left(1 - \frac{i}{i_{\text{L}}}\right) \quad (2)$$

$$U_{\mathrm{act}}=\frac{RT}{\alpha nF}\ln(\frac{i}{i_0}) \quad (3)$$

$$U_{\mathrm{ohm}}=iR_i \quad (4)$$

对于不在标况下的电极电势，U_0 可表示为

$$U_0=1.229(T-298.15)\frac{\Delta S}{nF}+\frac{RT}{nF}\ln[p_{\mathrm{H_2}}(p_{\mathrm{O_2}})^{0.5}] \quad (5)$$

式中：U_0 为电极电势；U_{conc} 为浓度差损失；U_{act} 为活化损失电压；U_{ohm} 为欧姆电压降；$U_{\mathrm{conc,a}}$、$U_{\mathrm{conc,c}}$、$U_{\mathrm{act,a}}$、$U_{\mathrm{act,c}}$ 分别表示在电池阴阳两极的活化和浓度损失；T 为电池的使用温度，K；R 为普适气体常数，8.314 J/(mol·K)；F 为法拉第常数；α 为交换系数；i 为电流密度，A·cm^{-2}；i_0 为交换电流密度，A·cm^{-2}；i_{L} 为极限电流密度，A·cm^{-2}；R_i 为电池阻抗，（Ω·cm^2）；$p_{\mathrm{H_2}}$、$p_{\mathrm{O_2}}$ 为氢气和氧气分压。

燃料电池输出电能（即功率）为

$$P_{\mathrm{FC}}=U_0\cdot I \quad (6)$$

式中：I 为输出电流。

（2）电解槽模型

电解槽是电解水制氢的关键部分。单位氢气电耗的计算方法如下：

$$M=\frac{UI}{Q} \quad (7)$$

式中：M 为单位氢气电耗；U 为电解槽电压，V；I 为电解槽电流，A；Q 为氢气产量，m^3。

$$Q=4.18\times10^{-4}nI \quad (8)$$

式中：n 为电解槽小室数。

$$U=nU_i \quad (9)$$

式中：U_i 为小室电压。

将式（8）（9）代入式（7）得单位氢气电耗为 $0.24\times10^{-4}U_i$。

因此，单位氢气电耗只与电解槽小室电压有关。电解槽的小室电压为

$$U_i=E+IR+\delta_{\mathrm{an}}+\delta_{\mathrm{ca}} \quad (10)$$

式中：E 为水的理论分解电压；R 为电解槽的总电阻，（Ω·cm^2）；即为电解液电阻、隔膜电阻、电极电阻和接触点电阻的总和；δ_{an}、δ_{ca} 分别为阳极、阴极过单位（即极化量）。

则该氢储能系统剩余电量可表示为

$$E_t^{\mathrm{H}}=E_{t-1}^{\mathrm{H}}-(\alpha_{\mathrm{E2H}}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{EL}}}P_{i,t}^{\mathrm{EL}}+\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{FC}}}P_{i,t}^{\mathrm{FC}}\div\beta_{\mathrm{H2E}})\Delta t,\forall t \quad (11)$$

式中：E_t^{H}、E_{t-1}^{H}分别为系统在 t、t–1 时刻末剩余电量；α_{E2H} 为电解制氢效率；β_{H2E} 为燃料电池发电效率；N_{EL} 为系统电解槽总数；$P_{i,t}^{\mathrm{EL}}$ 为 t 时刻电解槽消耗的有功功率；N_{FC} 为燃料电池总数；$P_{i,t}^{\mathrm{FC}}$ 为 t 时刻燃料电池 i 的有功出力。

1.2电-气互联综合能源系统

电-气互联综合能源系统如图1所示，该系统由风电场、常规机组、电解槽、燃料电池、氢缓存等部分构成。若系统风电功率配合其他出力单元满足负荷需求后还有剩余，为避免弃风，此部分弃风电量可对氢储能单元进行电解水制氢，所得H_2
可直接供应氢负荷，或储存于氢储存设备中；若系统出现功率缺额，氢储能单元可通过燃料电池进行放电，与其他出力单元配合，共同满足负荷需求，保证电网安全可靠运行。故此，该互联系统利用电解制氢以及燃料电池发电两个环节之间的双向电气耦合，形成电-气-电的能量闭环流动圈[9]。

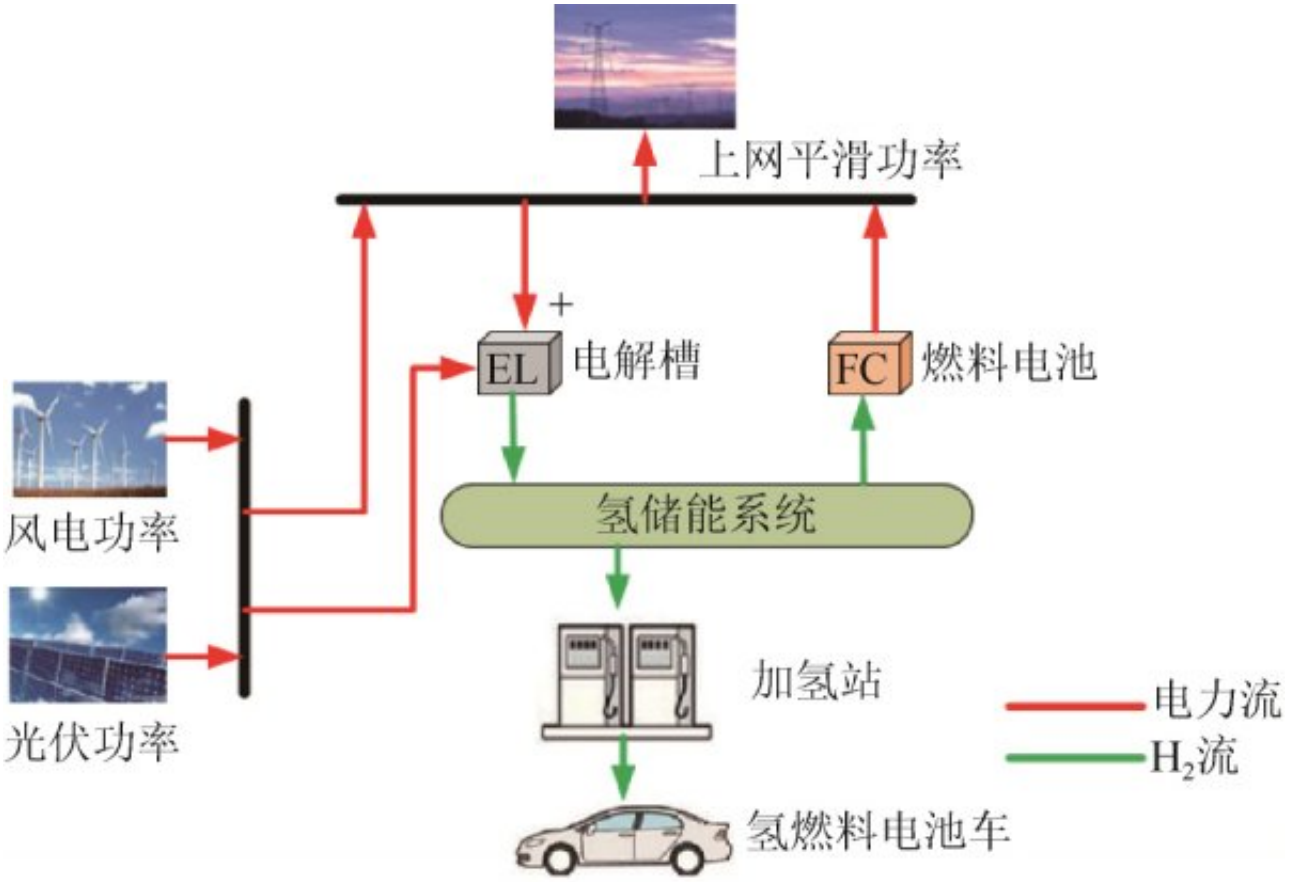

图 1　电–气综合并网系统

氢储能技术适合与大规模集中式可再生能源相结合，解决我国风电并网消纳难题。系统经济运行目标下，水电解制氢装置和燃料电池容量优化，受制氢和燃料电池投资成本、储氢容量及氢市场价格等因素影响[11]，故在能源互联网

发展趋势的背景下，对含氢储能参与的高比例风光互联电力系统优化调度的研究有一定意义。

2考虑氢储能参与的风电互联电力系统优化调度模型

本文所提模型建立了系统综合经济成本最低这一目标函数，并考虑了常规机组约束、负荷平衡约束、备用约束、储能单元约束。

2.1 目标函数

通过构建电–气综合能源系统，同时考虑系统的运行成本和环境成本。在很大程度上实现了风电全额消纳，使得整个系统的经济性和环保性都有所提高。

$$\min F = \{F_1, F_2\} \tag{13}$$

式中：F_1 为系统运行成本；F_2 为环境成本。

（1）系统运行成本：火电机组运行成本、弃风惩罚成本、制氢储能单元运行成本。

$$F_1 = F_G + F_W + F_H \tag{14}$$

式中：F_G 为火电机组常规运行成本；F_W 为弃风惩罚成本，在含风电的能源系统中，风电出力的不确定性给系统调度运行、机组的出力配合带来影响，降低系统整体运行的经济性[12]，因此在综合成本中需考虑弃风引发的成本问题，对其进行优化处理；F_H 为制氢储能单元运行成本，不同于普通电池储能，氢储能单元在充、放电过程中有较大的能量损失。因此，当能源互联系统中含有大规模氢储能单元时，在做系统经济调度时需合理考虑这部分运行成本。

①火电机组运行成本

$$F_G = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t}(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \tag{15}$$

式中：T 为调度周期的总时间段数；N_G 为机组数；$u_{i,t}$ 为 0~1 变量，表示第 i 个机组在 t 时刻的启停状态；a_i，b_i，c_i 为第 i 个机组的成本系数；$P_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时刻的输出功率。

②弃风惩罚成本

$$F_W = \sum_{t=1}^{T} C_W (P'_{Wt} - P_{Wt}) \tag{16}$$

式中：C_W 为弃风惩罚费用系数；P'_{Wt} 为风电场在 t 时段的出力预测值；P_{Wt} 风电场在 t 时段的实际出力值。

③制氢储能单元运行成本

$$P_H = \sum_{t=1}^{T} \Delta t \delta_t \left\{ (1-\alpha_{E2H}) \sum_{i=1}^{N_{EL}} P_{i,t}^{EL} + \left(\frac{1-\beta_{H2E}}{\beta_{H2E}}\right) \sum_{i=1}^{N_{FC}} P_{i,t}^{FC} \right\} \tag{17}$$

式中：P_H 为制氢混合储能单元运行过程中的能量损失；δ_t 为第 t 时刻的电网分时电价。

（2）环境成本：包括火电机组各类污染物排

放量引发的环境成本。

$$F_2=\sum_{i=1}^{N_G}\left\{\sum_{j=1}^{m}[(V_{ej}+V_j)\cdot Q_{ij}\cdot P_{i,t}]\right\} \tag{18}$$

式中：V_{ej} 为第 j 项污染物的环境价值；V_j 为第 j 项污染物所受罚款；Q_{ij} 为第 i 台发电机组的第 j 项污染物排放量；m 为污染物的种类。参数取值见文献[13]。

2.2 约束条件

（1）功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G}P_{i,t}+P_{Wt}+\sum_{i=1}^{N_{FC}}P_{i,t}^{FC}-\sum_{i=1}^{N_{EL}}P_{i,t}^{EL}=P_{Lt} \tag{19}$$

式中：P_{Lt} 在 t 时段内系统的总负荷量。

（2）热备用约束

$$\sum_{i=1}^{N_G}(u_{i,t}P_{i,\max}-P_{i,t})+(P'_{Wt}-P_{Wt})=\rho P_{Lt} \tag{20}$$

式中：$P_{i,\max}$ 为机组 i 的出力上限；ρ 为热备用系数。

（3）火电机组运行约束

$$\begin{aligned}&u_{i,t}P_{i,\min}\leqslant P_{i,t}\leqslant u_{i,t}P_{i,\max}\\&-R_d\leqslant P_{i,t}-P_{i,t-1}\leqslant R_u\\&\sum_{k=t}^{t+TS-1}(1-u_{i,k})\geqslant TS(u_{i,t-1}-u_{i,t})\\&\sum_{k=t}^{t+TO-1}(u_{i,k})\geqslant TO(u_{i,t}-u_{i,t-1})\end{aligned} \tag{21}$$

式中：$P_{i,\min}$ 为机组 i 的出力下限；R_u，R_d 为机组的上、下爬坡速率；TS，TO 为机组最小关停、开机时间。

（4）风电出力约束

$$0\leqslant P_{Wt}\leqslant P'_{Wt} \tag{22}$$

（5）氢储能单元约束

$$E_{\min}^{H}\leqslant E_t^{H}\leqslant E_{\max}^{H} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}&P_{\min}^{EL}\tau_t^{EL}\leqslant P_{i,t}^{EL}\leqslant P_{\max}^{EL}\tau_t^{EL},\forall t,\forall i\in B^{EL}\\&P_{\min}^{FC}\tau_t^{FC}\leqslant P_{i,t}^{FC}\leqslant P_{\max}^{FC}\tau_t^{FC},\forall t,\forall i\in B^{FC}\\&\tau_t^{EL}+\tau_t^{FC}\leqslant 1,\forall t\end{aligned} \tag{24}$$

式（23）为氢储能系统容量约束；式（24）氢储能系统充放电功率约束。

以上各式中：$E_{\min}^{H}$和 $E_{\max}^{H}$为氢储能单元的最小、最大容量限制；$P_{\max}^{EL}$和 $P_{\min}^{EL}$、$P_{\max}^{FC}$和 $P_{\min}^{FC}$分别表示电解制氢功率、燃料电池放电功率的上下限约束；τ_t^{EL}，τ_t^{FC} 为 0~1 变量，分别表示氢储能系统的充电和放电状态；B^{EL}，B^{FC} 分别为电解槽集合、燃料电池集合。

3经济调度模型求解

在解决综合目标优化问题时采用权重系数法将多目标转化为单目标优化问题进行求解[14]。由于 F_1、F_2 是两个不同量纲的参数，利用标幺值概念将其折算成无量纲的参数，再做归一化处理，通过引入各目标权重系数 ω_1、ω_2，得到综合运行成本表达式为：

$$\min F = \omega_1 \frac{F_1}{F_1^{\max}} + \omega_2 \frac{F_2}{F_2^{\max}} \tag{25}$$

式中：$F_1^{\max}$、$F_2^{\max}$ 分别为系统运行成本、环境成本的最大值。ω_1、ω_2 需要满足以下条件：

$$\omega_1 + \omega_2 = 1, \omega_1 \geqslant 0, \omega_2 \leqslant 1$$

模型的求解选择优化软件 Gurobi 8.1.1，在 MATLAB2018 平台上采用 Yalmip 进行编程求解，计算机环境为：CPU 为 Intel 2.90GHz，8GB 内存。

4算例分析

针对一个容量为400MW的风电场和6台常规火电机组的电力系统进行仿真。负荷需求见文献[6]，机组相关数据见文献[15]，氢储能单元参数取值见文献[16,17]。一天24h分时电价见文献[9]。

4.1单目标优化结果

4.1.1系统运行成本最小

优先利用风电场进行发电，以实现风电的最大化消纳，弃风量达到最小。对一天24h内互联系统在无储能、有储能两种情况下的经济优化调度进行分析。

图2在没有氢储能单元参与的情况下，本着新能源发电优先上网原则，在风电出力较少时，风电基本可实现满发，配合火电机组出力来满足负荷需求。1—4、10—15时段出现大量弃风，从而使系统的惩罚成本增加。在图3中，加入制氢储能单元，结果表明一天全时段可基本实现风电的全消纳，相应的火电机组出力减少，10—15时段系统有大量风电剩余，利用此时段的弃电量对制氢储能单元通过电解氢充电。由以上两种结果对比可知，由于制氢储能的加入，增加了风电消纳，实现全天最优经济调度。

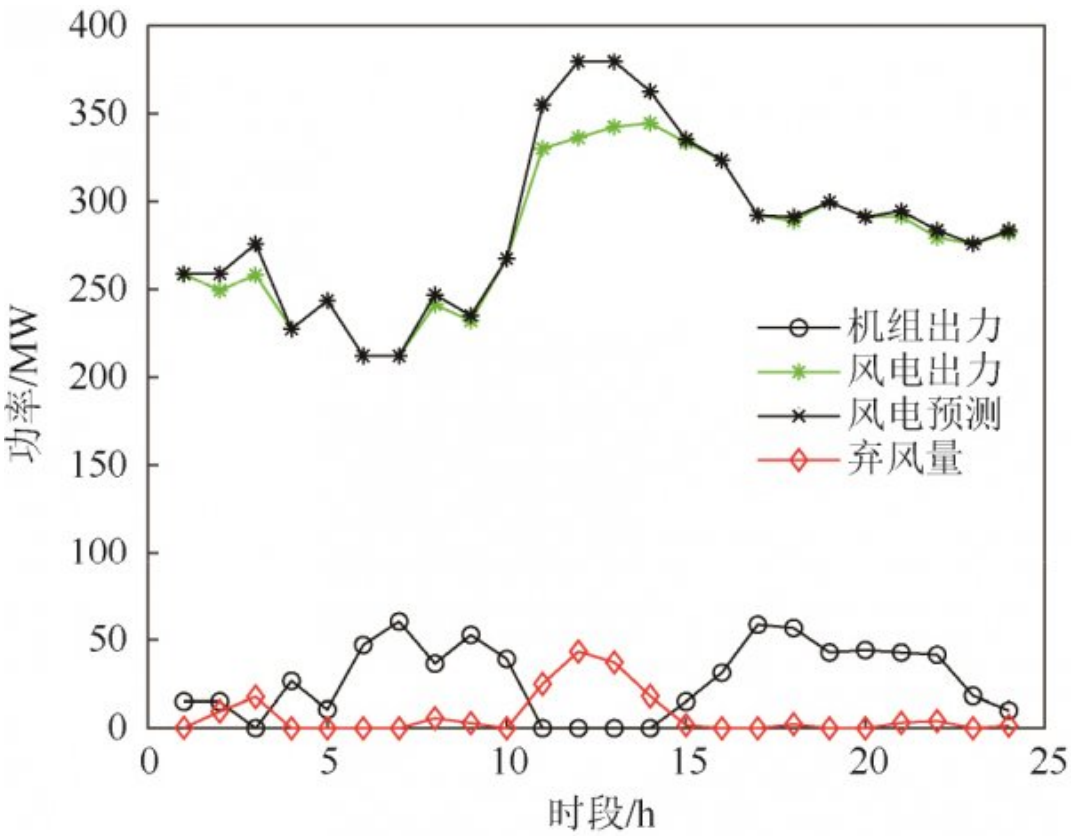

图 2　无储能系统运行成本优化结果

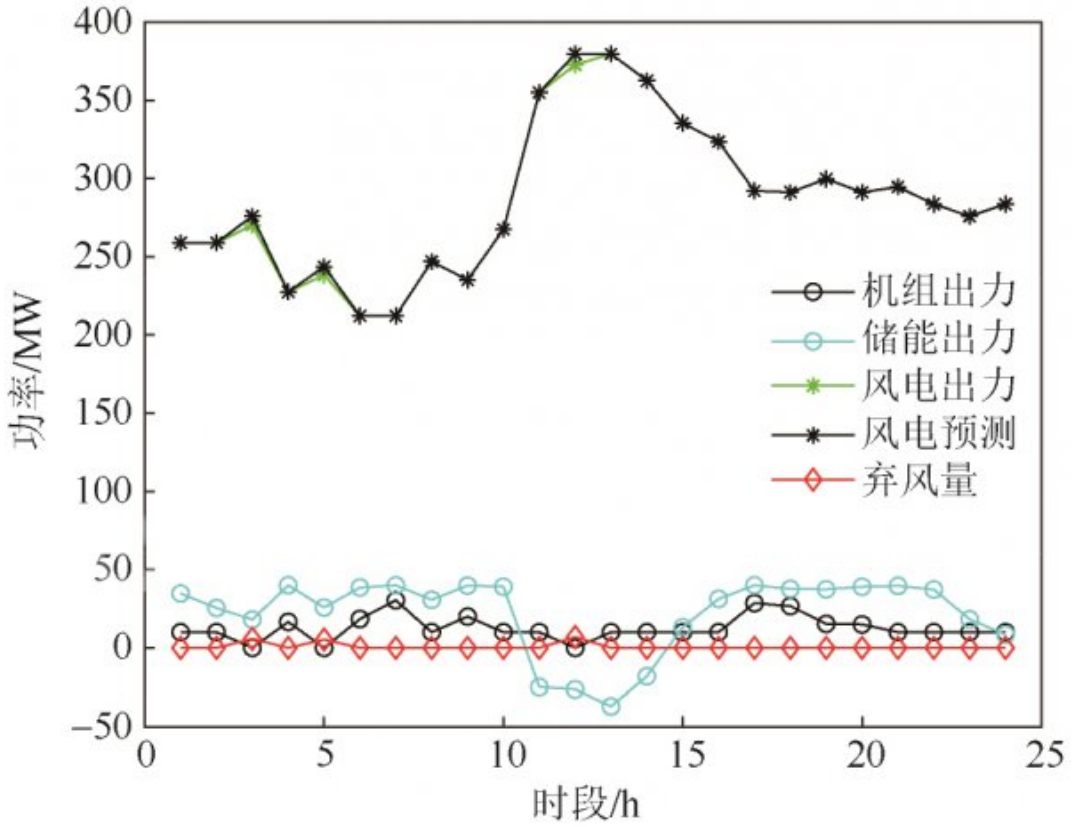

图 3　有储能系统运行成本优化结果

4.1.2环境成本最小

在互联电力系统中考虑有、无储能两种情况下的以环境成本最小为目标的优化结果如图4、图5所示。

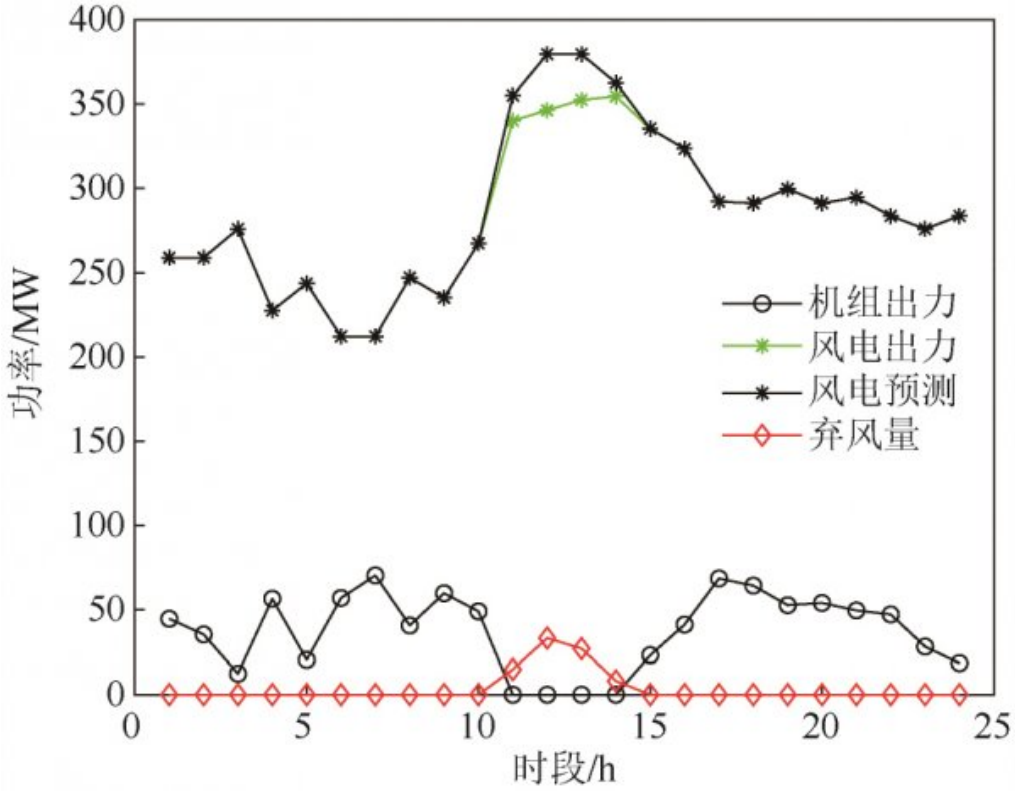

图 4　无储能系统环境成本优化结果

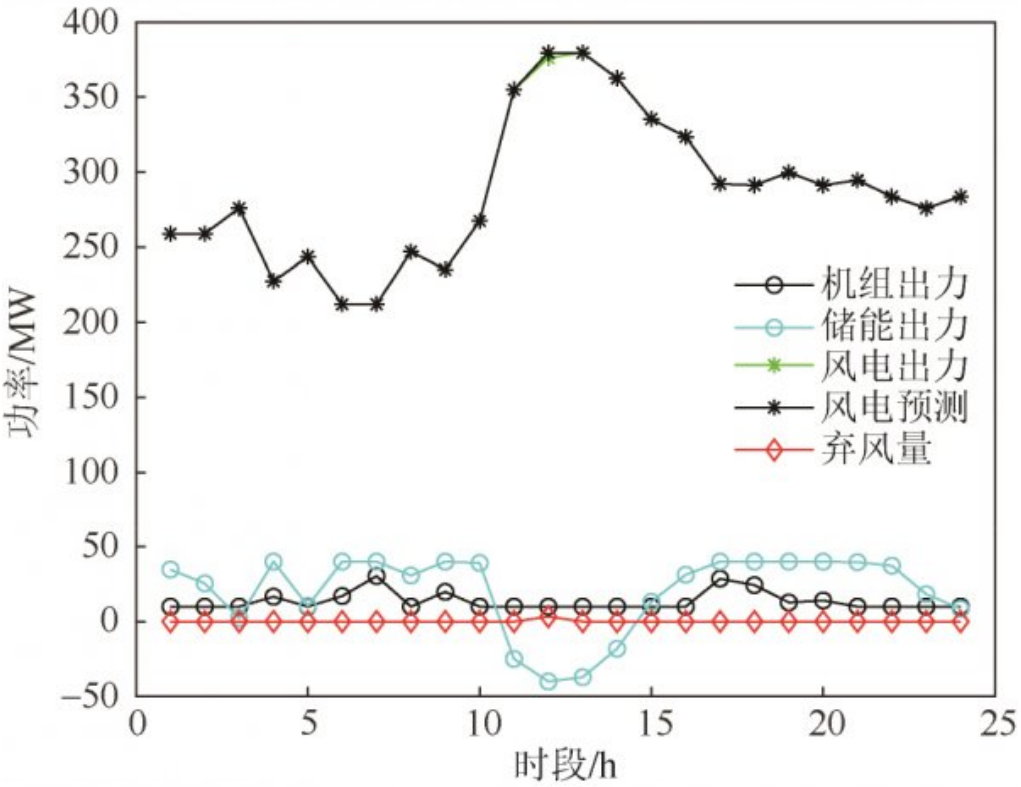

图 5　有储能系统环境成本优化结果

图4表明在无储能参与的情况下，系统风电既不能实现全额消纳，火电机组出力也相对较高，各类气体污染物的排放相应增加，从而使系统环境成本较高。图5中考虑制氢储能单元系统弃风量几乎为0，且由于储能出力的配合，减少了火电机组的出力，环境成本减少。

互联电力系统中有、无储能参与两种情况下系统运行成本、环境成本对比结果如表1所示。考虑制氢储能单元基本可实现风电全消纳，即使在考虑储能运行成本的情况下，系统整体运行成本也较无储能参与时低。由于储能分担了火电机组的一部分出力，故环境成本也相对无储能参与时低。

表 1　有、无储能参与时系统运行成本和环境成本

目标函数	运行成本/元	环境成本/元
无储能	179 138.29	55.296
有储能	138 236.38	39.896

4.2综合目标优化结果

在系统的实际应用中，往往需要同时考虑运行成本和环境成本，二者的权衡可通过调整 ω_1、ω_2 的值来确定不同运行方案，通过对各方案的比较达到综合运行成本最优的目的，如表 2 所示。其中，根据调度模型有储能的单目标优化得到 $F_1^{\max}$=260 853.932 8 元、$F_2^{\max}$=114.73 元。

表 2　不同参数下有储能参与时系统综合运行成本

编号	ω_1	ω_2	综合成本最小	
			运行成本/元	环境成本/元
1	1	0	140 521.42	47.018
2	0.75	0.25	149 026.50	44.857
3	0.25	0.75	151 245.01	43.402
4	0	1	152 086.72	41.836

由表2可以看出，通过对ω1、ω2不同权重值的设置，随着ω1的逐渐减小，ω2的增加，运行成本逐渐增加，环境成本逐渐降低。情况1和4可看做为单目标模型。情况1中，综合运行成本忽略环境效益的影响，在综合目标优化结果中得出的运行成本高于只考虑运行成本最低的单目标模型，而此时的环境成本也在有储能参与的各种情况下达到最高；情况4中，综合运行成本侧重于环境效益，得出的环境成本高于只考虑环境成本最低的单目标模型，此时运行成本在有储能参与的各种情况下也达到最高。以上，单目标优化下容易顾此失彼，经济性和环保性不能同时兼顾，综合目标优化能较好的权衡二者关系，使得在综合运行成本最低这一目标下的运行成本和环境成本相对最优。因此，在实际应用中，建立综合目标模型更具有实际意义。

5结论

在能源互联网背景下，构建了含制氢储能的电-气综合能源日前经济调度模型，并通过对比系统中制氢储能单元参与前后的弃风电量、运行成本和环境成本，验证了制氢储能对减少弃风，提高系统经济性和环保性的作用。仿真结果表明：本文所构建的电-气综合能源系统，在很大程度上实现了风电全额消纳，且制氢储能的参与显著提高了整个系统的经济性和环保性，应用前景广阔。在此基础上，首先对单目标模型有、无储能参与两种情况优化值进行对比，有储能参与的情况下更能保证系统的经济性和环保性。其次对含氢储能单元的综合目标模型在不同方案下进行优化结果对比，表明综合目标模型更具实用价值，验证了所提模型的有效性和可行性。

参考文献：

[1]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.

[2]丁涛,牟晨璐,别朝红,等.能源互联网及其优化运行研究现状综述[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4318-4328.

[3]胡泽春,丁华杰,宋永华,等.能源互联网背景下储能应用的研究现状与展望[J].电力建设,2018,37(8):8-17.

[4]邹金,赖旭,汪宁渤.以减少电网弃风为目标的风电与抽水蓄能协调运行[J].电网技术,2015,39(9):2472-2477.

[5]魏繁荣,随权,林湘宁,等.一种电网多主体场景下的制氢装置新运营模式及其调度策略[J].中国电机工程学报,2018,38(11):3214-3225.

[6]任建文,许英强,董圣孝.考虑储能参与的含高比例风电互联电力系统分散式调度模型[J].电网技术,2018,42(4):1079-1085.

[7]孙辉,刘鑫,贲驰,等.含风储一体化电站的电力系统多目标风险调度模型[J].电力系统自动化,2018,42(5):94-101.

[8]陈沼宇,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.

[9]刘继春,周春燕,高红均,等.考虑氢能－天然气混合储能的电－气综合能源微网日前经济调度优化[J].电网技术,2018,42(1):170-178.

[10]李彦哲,郭小嘉,董海鹰,等.风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J].电力系统及其自动化学报.

[11]孔令国.风光氢综合能源系统优化配置与协调控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2017.

[12]张晓辉,赵翠妹,梁军雪,等.考虑发用电双侧不确定性的电力系统鲁棒模糊经济调度[J].电力系统自动化,2018,42(17):67-75.

[13]石庆均.微网容量优化配置与能量优化管理研究[D].杭州:浙江大学,2012.

[14]陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.

[15]黄杨,胡伟,陈立.基于两阶段优化的风储联合发电系统日前发电计划模式[J].电力系统自动化,2015,39(24):8-15.

[16]CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas(P2G)on electrical and gas transmission networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2015, 6(4): 1234-1244.

[17]李乐.微网的经济运行研究[D].北京:华北电力大学,2011.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/168521.html