

基于碱性电解槽和质子交换膜电解槽协同制氢的风光互补制氢系统优化

黄启帆¹, 陈洁¹, 曹喜民¹, 刘俊², 张育超², 包洪印²

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306; 2. 中船海为(新疆)新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830099)

摘要:工程应用中碱性电解槽(AEL)和质子交换膜电解槽(PEMEL)在制氢效率和经济性上各有优劣。对此, 提出AEL和PEMEL协同的复合电解槽制氢方案。利用网络层次分析法确定2类电解槽的最优容量比, 将复合电解槽应用在风光互补制氢系统中, 对单一AEL制氢、单一PEMEL制氢、复合电解槽制氢3种方案的多项指标进行对比分析。结果表明: 在相同容量下, 复合电解槽制氢设备成本是单一PEMEL制氢设备成本的52.26%, 制氢量可达单一PEMEL制氢量的97.69%, 比单一AEL制氢量多46.13%, 显著优化了系统的经济性和制氢效率, 验证了所提复合电解槽协同制氢方案的有效性。

关键词:碱性电解槽; 质子交换膜电解槽; 网络层次分析法; 制氢效率; 经济性

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202310024

0 引言

当前, 能源行业的碳排放问题正随着化石能源的大量使用而愈发突出。在“双碳”目标与能源清洁化转型背景推动下, 大力发展可再生能源技术, 提高风光等可再生能源占比是我国实现“双碳”目标的必经之路^[1-3]。目前, 风电和光伏的装机容量不断攀升, 以风电、光伏为代表的可再生能源存在显著的波动性和间歇性, 严重影响了风光资源的高效利用与稳定转化^[4-5]。借助电解水制氢技术能有效地实现可再生能源的高效转化和灵活消纳^[6]。

电解水制氢技术中碱性电解槽(alkaline electrolyzer, AEL)和质子交换膜电解槽(proton exchange membrane electrolyzer, PEMEL)已在工程领域中广泛应用。AEL电解水技术是发展时间最长、技术最为成熟的电解水制氢技术, 具有操作简单、成本低的优点。但AEL在额定负载下启动时间较长, 对负荷的响应速度较慢, 难以适应波动性强的风光出力条件^[7]。相比于AEL, PEMEL采用质子交换膜传导质子, 在额定负载下启动快, 有快速响应和能效高的优势, 并且PEMEL能适应快速变化的可再生能源电力输入, 具有较高的制氢效率。然而, PEMEL过高的设备成本是制约其在可再生能源制氢领域大规模应用的主要因素^[8]。

近年来, 针对风光互补制氢系统的研究不断深入。文献[9]考虑系统的弃风、弃光现象, 提出了一

种基于深度强化学习算法的风光互补制氢系统调度方案; 文献[10]计及风光出力的波动性, 构建了基于自适应粒子群优化算法的风光互补制氢系统容量配置优化方案; 文献[11]为保证风光互补制氢系统平稳运行以及蓄电池容量最优化, 提出一种结合实际环境的改进蓄电池容量确定法。但上述文献均未考虑利用AEL和PEMEL这2类电解槽(以下简称复合电解槽)协同制氢方案对风光互补制氢系统进行优化。

为了提高风光互补制氢系统中风光资源的利用率以及制氢量, 本文在考虑2类电解槽的优缺点的基础上, 提出了一种复合电解槽协同制氢方案, 实现对风光资源的灵活消纳, 在提高系统制氢量的基础上降低了系统制氢成本。如何合理地选择AEL和PEMEL的容量比, 形成高性价比的复合电解槽系统, 是现在待解决的问题。文献[12]提出了多类型电解协同的风光互补制氢系统, 采用非劣分层遗传算法计算AEL和PEMEL这2类电解槽的最优容量配置, 但是此方法仅考虑了这2类电解槽的动态响应速度和经济性特点; 文献[13]考虑了AEL和PEMEL的多个指标, 提出一种基于层次分析法的复合电解槽选型评估方法, 并在方案层中选出最优方案, 但此方法没有考虑到指标之间的相互影响以及方案层中方案对每个指标的反馈。基于此, 本文提出利用网络层次分析法(analytic network process, ANP)来对复合电解槽进行最优容量配置。文献[14]通过采用ANP评价不同地区光伏电站站址优选的决策方法, 构建系统的评价指标体系, 建立了一套科学的光伏电站选址的评价方法, 并验证了其有效性; 文献[15]将ANP评价模型应用于某牵引站输变电项目后的评价工作中, 建立评价指标体系, 对项目的全寿命周

收稿日期: 2023-08-03; 修回日期: 2023-10-25

在线出版日期: 2023-11-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2022D01C366)

Project supported by the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2022D01C366)

期进行评价;文献[16]利用 ANP 建立 270 V 直流电能质量评估体系,使用仿真数据进行电能质量评估,结果表明,所构建评估体系能够得到合理的电能质量评估等级,验证了所用方法的有效性。ANP 考虑决策系统中每层指标之间的相互作用以及层次之间的反馈,允许决策者考虑复杂动态系统中各要素的相互作用,从而更符合决策问题的实际情况。相比于其他决策方法,ANP 的决策结果更为准确。

综上,本文提出一种基于 ANP 的复合电解槽最优选型评估模型,考虑 2 类电解槽的 7 个指标以及各指标之间的相互影响,提出 4 种复合电解槽待选方案,并考虑每种方案对每个指标的反馈作用。最终求得复合电解槽的最优选型,并在风光互补制氢系统中验证此选型方案的有效性,同时优化系统的制氢效率和经济性。

1 复合电解槽最优选型评估模型以及计算

ANP 能够充分考虑复杂网络结构中各簇内部元素间及不同簇元素间的依赖与反馈关系,通过专家判断确定各指标相对优先级,更符合实际需求^[17]。ANP 评估模型流程图如附录 A 图 A1 所示。

1.1 构造评估模型

在评估模型中,控制层为复合电解槽最优选型,网络层分为方案簇和指标簇 2 个簇。考虑到 AEL 和 PEMEL 2 类电解槽运行特性、响应速度、设备成本、制氢效率等各有优劣,共提取 7 个相关指标构成指标簇 U_1 ,包括额定电流密度(u_{11})、制氢量(u_{12})、热启动时间(u_{13})、动态响应时间(u_{14})、电解槽寿命(u_{15})、组件老化速率(u_{16})、设备成本(u_{17});利用专家经验法确定 4 个待选方案构成方案簇 U_2 ,包括 AEL 与 PEMEL 容量比为 1:1(u_{21})、AEL 与 PEMEL 容量比为 1.5:1(u_{22})、AEL 与 PEMEL 容量比为 2:1(u_{23})、AEL 与 PEMEL 容量比为 2.5:1(u_{24})。用专家调查法判断各指标之间是否独立、是否有相互作用关系以及各方案对各指标之间是否存在反馈关系,最终确定系统中所有指标均有相互作用的关系,并且每种方案对每个指标均存在反馈关系,方案与方案之间相互独立,无相互影响。评估模型如附录 A 图 A2 所示。

1.2 构造 ANP 判断矩阵

共生成 3 类判断矩阵:第 1 类为各指标之间的影响力大小,即每个指标相对于其他指标的重要程度,一共可以生成 7 个判断矩阵;第 2 类为每个指标对每种方案的影响力大小,即每种方案相对于每个指标的重要程度,一共可以生成 7 个判断矩阵;第 3 类为每种方案对每个指标的影响力大小,即每个指标相对于每种方案的重要程度,一共可以生成 4 个判断矩阵。判断矩阵中的元素取值采用 Satty 的 9 级标度法,见附录 B 表 B1。

在使用 Satty 的 9 级标度法的基础上,共邀请 4 位专家对每个判断矩阵进行打分,每位专家的评分结果可生成 18 个判断矩阵,则共生成 72 个判断矩阵。ANP 的计算过程非常复杂,手工运算几乎不可能,故本文采用 Yaanp 软件进行计算。由于文章篇幅有限,仅展示 1 位专家评分结果所生成判断矩阵在使用 Yaanp 软件计算后得到的部分计算数据。附录 B 表 B2—B4 分别展示了使用 Yaanp 软件后 3 类判断矩阵中的部分计算数据。

1.3 判断矩阵一致性检验

计算判断矩阵的随机一致性比率 ξ_{CR} :若 $\xi_{CR} < 0.1$,则认为该判断矩阵的一致性满足条件的;若 $\xi_{CR} \geq 0.1$,则适当调整判断矩阵中的赋值大小,直到满足 $\xi_{CR} < 0.1$ 的条件为止。 ξ_{CR} 的计算公式为^[18]:

$$\begin{cases} \xi_{CR} = \frac{\xi_{CI}}{\xi_{RI}} \\ \xi_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ξ_{CI} 为判断矩阵一致性指标; ξ_{RI} 为判断矩阵平均随机一致性指标, ξ_{RI} 的取值见附录 B 表 B5; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; n 为判断矩阵阶数。

1.4 构造 ANP 超矩阵

设网络层中簇 $U_i (i=1, 2, \dots, N)$ 中元素为 $u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in_i}$, $U_j (j=1, 2, \dots, N)$ 中元素为 $u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{jn_j}$ 。将 U_i 和 U_j 中元素两两比较得到判断矩阵,若判断矩阵满足一致性检验,则可由矩阵的特征根法求得判断矩阵的权重列向量 $[w_{i1,jk}, w_{i2,jk}, \dots, w_{in_i,jk}]^T (k=1, 2, \dots, n_j)$,将其写成矩阵形式,可得到权重向量矩阵 W_{ij} 为:

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1,j1} & w_{i1,j2} & \cdots & w_{i1,jn_j} \\ w_{i2,j1} & w_{i2,j2} & \cdots & w_{i2,jn_j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{in_i,j1} & w_{in_i,j2} & \cdots & w_{in_i,jn_j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

W_{ij} 的列向量即为 U_i 中元素 $u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in_i}$ 对 U_j 中元素 $u_{j1}, u_{j2}, \dots, u_{jn_j}$ 的重要度权重向量。若 U_j 中元素不受 U_i 中的元素影响,则 $W_{ij} = 0$,进而可得超矩阵 W ,由于本文的网络层中只有 2 个簇,即 $N=2$,则超矩阵 W 为:

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

超矩阵中每一个元素都是一个矩阵,但 W 不是归一化矩阵。为了方便计算,需要将超矩阵列归一化,即对超矩阵 W 的元素加权,得到加权超矩阵 $\bar{W}$,其中的元素 $\bar{w}_{ij} = a_{ij} w_{ij}$, a_{ij} 为加权因子,计算所得加权超矩阵见附录 B 表 B6。

1.5 对 ANP 加权超矩阵稳定处理

为了反映元素之间的依存关系,需要对加权超矩阵 $\bar{W}$ 进行稳定处理,即计算式(4)所示极限值。

$$\bar{W}_{\infty} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{W}^k \quad (4)$$

若此极限收敛且唯一,则该矩阵中的列向量即为各评价指标的稳定权重。

附录 B 表 B7 为 1 位专家对各判断矩阵赋值输出的各指标以及方案的权重及其对应的极限。由于各极限收敛且唯一,所得权重是稳定权重。由表可知,在指标簇中这 1 位专家对制氢量(u_{12})赋值最高,其次是额定电流密度(u_{11}),对热启动时间(u_{13})赋值最低;在方案簇中,对 AEL 与 PEMEL 容量比为 2.5:1 (u_{24})赋值最高。

1.6 计算最优选型

由 4 位专家分别对判断矩阵赋值,最终可得 4 组稳定的权重数据,用算数平均法计算这 4 组数据的权重平均值,得到最终的指标与方案权重,如表 1 所示。

由表 1 可以看出:在 7 个指标中,制氢量(u_{12})所占权重最大,专家对制氢量赋值最高,其次是设备成本(u_{17})和额定电流密度(u_{11}),组件老化速率(u_{16})权重最小。4 种方案中,AEL 与 PEMEL 容量比为 2.5:1 (u_{24})所占权重最高,为最优选型方案。

2 风光互补制氢系统与建模

为进一步探索可再生能源制氢技术,促进风光资源的灵活消纳并验证所选最优方案的有效性,本文充分利用 AEL 和 PEMEL 2 类电解槽的制氢技术特点,构建了基于复合电解槽协同制氢的风光互补制氢系统,以优化系统的制氢效率和经济性。

2.1 风光互补制氢系统结构

基于复合电解槽协同优化制氢方案,构建的风光互补协同制氢系统如图 1 所示。该系统主要包括发电模块、控制模块、电解水制氢模块和储氢模块,其中发电模块借助风机和光伏阵列分别将风能和太阳辐射能转化为电能;控制模块可以保证系统内部各装置单元之间的能量传输平衡;电解水制氢模块利用 AEL 和 PEMEL 2 类电解槽耦合协同进行高效稳定的制氢;储氢模块中储氢罐对所制氢气进行稳

定存储。

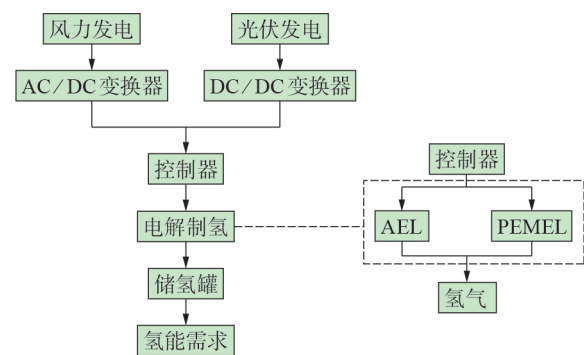


图 1 风光互补协同制氢系统

Fig.1 Wind-photovoltaic complementation hydrogen production system

2.2 系统建模

2.2.1 风光发电模型

风力发电设备是系统发电模块之一,风机的输出功率 P_{wt} 为^[19]:

$$P_{wt} = T_{wt} \omega_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R_0^2 v^3 C_p \quad (5)$$

式中: T_{wt} 为风力机的输出机械转矩; ω_{wt} 为风力机角速度; ρ 为空气密度; R_0 为风力机叶轮半径; v 为实时风速; C_p 为效率值,该值的大小与风轮启动参数密切相关,如式(6)所示^[20]。

$$\begin{cases} C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left(\frac{-21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: λ 为叶尖速比; β 为桨距角。

光伏发电设备将太阳辐射能转化为电能,根据伏安特性原理,光伏发电功率 P_{pv} 如式(7)所示^[21]。

$$\begin{cases} P_{pv} = V_{pv} I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{V_{pv}}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \\ C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp \left(\frac{-V_m}{C_2 V_{oc}} \right) \\ C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_1 和 C_2 为伏安特性调整系数; I_m 为最大电流; V_m 为最大电压; I_{sc} 为短路电流; V_{oc} 为开路电压; V_{pv} 为

表 1 4 组权重及其平均值

Table 1 Four sets of weights and their averages

专家	指标权重值							方案权重值			
	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	u_{17}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}
1	0.203	0.322	0.036	0.123	0.080	0.054	0.182	0.092	0.154	0.282	0.472
2	0.187	0.344	0.048	0.101	0.079	0.042	0.198	0.106	0.172	0.268	0.454
3	0.192	0.356	0.059	0.089	0.077	0.031	0.193	0.082	0.148	0.292	0.478
4	0.175	0.336	0.067	0.109	0.082	0.023	0.210	0.094	0.163	0.269	0.474
平均值	0.189	0.340	0.053	0.105	0.079	0.038	0.196	0.094	0.159	0.278	0.469

光伏发电设备输出电压。

2.2.2 电解水制氢模型

系统中电解水制氢模块的电解槽有 AEL 和 PEMEL 2 类,任意温度下,AEL 的 U - I 方程^[22]为:

$$U_{\text{cell}} = U_{\text{rev}} + \frac{r_1 + r_2 T_{\text{el}}}{A_{\text{cell}}} I_{\text{el}} + (s_1 + s_2 T_{\text{el}} + s_3 T_{\text{el}}^2) \times \ln \left(\frac{t_1 + t_2 / T_{\text{el}} + t_3 / T_{\text{el}}^2}{A_{\text{cell}}} I_{\text{el}} + 1 \right) \quad (8)$$

式中: r_1 、 r_2 为电解液欧姆电阻参数; U_{rev} 为可逆电压; T_{el} 为电解槽温度; A_{cell} 为电解模块面积; I_{el} 为直流电流; s_1 、 s_2 、 s_3 、 t_1 、 t_2 、 t_3 为电极过电压系数。

PEMEL 电解水制氢工作特性可以用电压和电流密度的关系来表示,电解总电压 V_{pem} 由开路电压 V_{ocv} 、活化过电势 V_{act} 、扩散过电势 V_{diff} 和欧姆过电势 V_{ohm} 组成^[23],如式(9)所示。

$$\begin{cases} V_{\text{pem}} = V_{\text{ocv}} + V_{\text{act}} + V_{\text{diff}} + V_{\text{ohm}} \\ V_{\text{ocv}} = V_0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{\text{H}_2} a_{\text{O}_2}^{0.5}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \\ V_{\text{act}} = \frac{RT_a}{\alpha_a F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,a}} \right) + \frac{RT_c}{\alpha_c F} \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2J_{0,c}} \right) \\ V_{\text{diff}} = \frac{RT_a}{4F} \ln \frac{C_{\text{O}_2,m}}{C_{\text{O}_2,mo}} + \frac{RT_c}{2F} \ln \frac{C_{\text{H}_2,m}}{C_{\text{H}_2,mo}} \\ V_{\text{ohm}} = \delta_m \frac{J}{\sigma_m} \end{cases} \quad (10)$$

式中: R 为气体常数; T 为电解温度; z 为电解反应过程中参与的摩尔电子数; F 为法拉第常数; a_{H_2} 、 a_{O_2} 、 $a_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为氢气、氧气、水的活度,且 $a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$; T_a 和 T_c 分别为阳极和阴极的反应温度; α_a 和 α_c 分别为阳极和阴极的电荷转移系数; J 为电流密度; $J_{0,a}$ 和 $J_{0,c}$ 分别为阳极和阴极的交换电流密度; $C_{\text{O}_2,m}$ 和 $C_{\text{H}_2,m}$ 分别为膜和多孔电极交界面上的氧气和氢气浓度; $C_{\text{O}_2,mo}$ 和 $C_{\text{H}_2,mo}$ 分别为膜和多孔电极交界面上的氧气和氢气浓度的标准参考值; δ_m 为膜的厚度; σ_m 为膜的电阻率。

AEL 和 PEMEL 2 类电解槽的制氢量 y_{H_2} 如式(11)所示。

$$y_{\text{H}_2} = \eta_F \frac{MI}{zF} \quad (11)$$

式中: η_F 为法拉第效率; M 为电解槽单元个数; I 为电解槽电流。

2.2.3 储氢模型

储氢模块中主要使用储氢罐进行氢气存储,储氢罐净储氢率^[24]为:

$$\dot{n}_{\text{sto}}(t) = \dot{n}_{\text{inH}_2}(t) - \dot{n}_{\text{outH}_2}(t) \quad (12)$$

式中: $\dot{n}_{\text{sto}}(t)$ 为 t 时刻储氢罐净储氢率; $\dot{n}_{\text{inH}_2}(t)$ 、 $\dot{n}_{\text{outH}_2}(t)$ 分别为 t 时刻储氢罐进、出氢率。

储氢量为:

$$n_{\text{sto}}(t_0 + \Delta t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \dot{n}_{\text{sto}}(\tau) d\tau + n_{\text{sto}}(t_0) \quad (13)$$

式中: $n_{\text{sto}}(t_0)$ 为 t_0 时刻储氢罐储氢量; Δt 为时间间隔。

2.3 制氢成本

风光互补制氢系统的单位制氢成本 C_{H_2} 主要与设备的投资和运维有关:

$$C_{\text{H}_2} = \frac{C_{\text{inv}} \sum C_{\text{pur},i} + L \sum C_{r,i}}{n_{\text{H}_2}} \quad (14)$$

式中: C_{inv} 为设备投资系数; L 为系统的全生命运行周期,取 20 a; n_{H_2} 为系统全生命运行周期的总制氢量; $C_{\text{pur},i}$ 和 $C_{r,i}$ 分别为设备的购置成本和运维成本,其中包括风机、光伏阵列、AEL 和 PEMEL 的设备购置成本和运维成本,具体见附录 B 表 B8^[25]。

3 结果对比与分析

根据复合电解槽耦合协同制氢方案,建立了风光互补制氢系统,以提高系统的制氢效率以及对风光资源的灵活消纳。下面将结合案例进行具体分析。

3.1 参数设置

附录 C 图 C1 为某地区典型日风光出力以及全年风光出力曲线。从典型日风光出力曲线中可以看出:由于光照强度低,光伏出力接近于 0,光伏功率从 08:00 开始逐渐增大,15:00 开始光伏功率逐渐减小;在 [00:00, 07:00]、[19:00, 24:00],光伏功率逐渐衰减到 0;在 [12:00, 13:00],光伏可提供最大功率约为 45 kW,风电可提供最大功率约为 77 kW。

考虑安装总容量分别为 80 kW 的风机和 50 kW 的光伏阵列,AEL 和 PEMEL 的装机容量均为 130 kW,当复合电解槽协同运行时,AEL 容量为 92.86 kW,PEMEL 容量为 37.14 kW。

3.2 运行结果对比分析

根据上述所建模型,对 3 类电解槽进行对比分析。第 1 类为单一 AEL 制氢,第 2 类为单一 PEMEL 制氢,第 3 类为 1.6 节中选出的最优选型,即 AEL 与 PEMEL 容量比为 2.5:1 配置的复合电解槽制氢。

图 2 为 AEL、PEMEL 和复合电解槽的 U - I 特性曲线

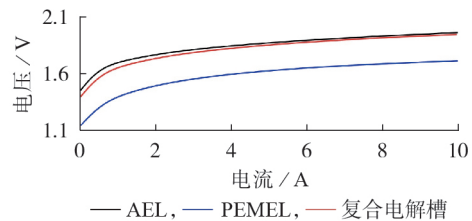


图 2 3 类电解槽的 U - I 特性曲线

Fig.2 U - I characteristic curves of three types of electrolyzers

线。由图可知:复合电解槽的 $U-I$ 特性曲线在 AEL 和 PEMEL 之间,且更靠近 AEL。

图3、4分别为 AEL、PEMEL 以及复合电解槽的电解效率随电流、运行时间变化的关系曲线。由图3可知:AEL 和复合电解槽的电解效率在一定范围内随着电流的增加而增大;PEMEL 的电解效率在一定范围内随着电流的增大而减小。由图4可知:当3类电解槽正常运行时,AEL 的电解效率最高,平均可达约92.8%,但是 AEL 的浮动范围最大。复合电解槽的电解效率与 AEL 电解效率接近,平均可达约91.7%,且复合电解槽的电解效率浮动范围要比 AEL 窄。PEMEL 的电解效率浮动范围最小。

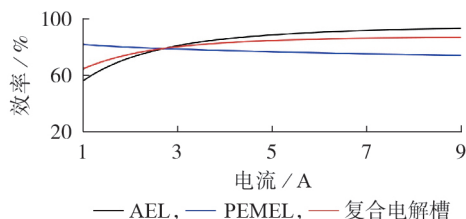


图3 3类电解槽电解效率与电流关系曲线

Fig.3 Relationship curves between electrolytic efficiency and current for three types of electrolyzers

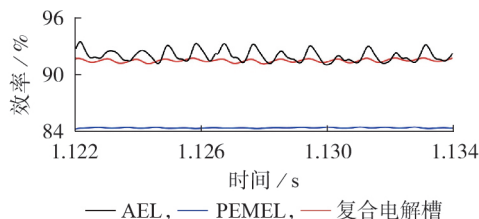


图4 3类电解槽电解效率与运行时间关系曲线

Fig.4 Relationship curves between electrolytic efficiency and running time for three types of electrolyzers

图5为 AEL、PEMEL 以及复合电解槽制氢量随电流变化的曲线图。由图可知:3类电解槽的制氢量均随电流的增大而增加;AEL 的制氢量最低,PEMEL 制氢量最多,复合电解槽介于二者之间,与 PEMEL 更接近,并且在电流为 7.3 A 时,复合电解槽基本达到 PEMEL 制氢量。

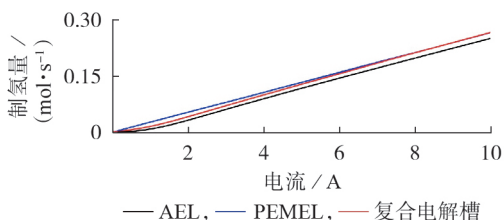


图5 3类电解槽制氢量随电流变化曲线

Fig.5 Variation curves of hydrogen production vs. current for three types of electrolyzers

图6为 AEL、PEMEL 以及复合电解槽的 1 d 制氢量随时间变化曲线。由图可知:在 [00:00, 08:00), 由

于此时光伏出力接近于 0, 只有风电出力, 所以 3 类电解槽的制氢量都较少; 在 [08:00, 12:00) 内, 光伏出力逐渐增大, 3 类电解槽制氢量也逐渐增多; 在 12:00 时, 光伏出力达到最大, 此时 3 类电解槽的制氢量也达到 1 d 内的巅峰; 在 (12:00, 15:00) 内, 光伏出力略微减少, 这段时间内 3 类电解槽制氢量最多; 在 [15:00, 19:00) 内, 由于光伏出力逐步减少到 0, 3 类电解槽制氢量也逐步下降; 在 [19:00, 24:00) 内, 由于光伏出力为 0, 风电出力也逐渐下降接近于 0, 3 类电解槽制氢量也为 1 d 内最低。

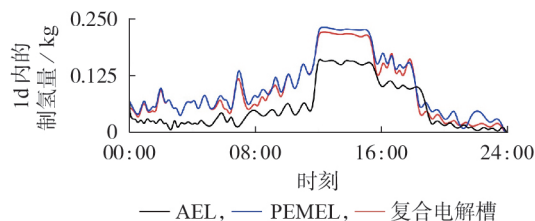


图6 3类电解槽 1 d 内制氢量随时间变化曲线

Fig.6 Curves of hydrogen production in one day vs. time for three types of electrolyzers

由于 AEL 启动时间长, 运行响应慢, 并且 AEL 无法适应风光的强波动性, 所以 AEL 的 1 d 制氢量为 3 类电解槽中最少。而 PEMEL 启动时间短, 运行响应速度快, 且能适应快速变化的可再生能源电力输入, 所以 PEMEL 的 1 d 制氢量为 3 类电解槽中最多。AEL 制氢量少但设备成本低, PEMEL 制氢量多但是设备成本昂贵, 而复合电解槽则充分地利用了 2 类电解槽的优点并互补其缺陷, 在风光出力波动性低时使用 AEL 制氢, 节约了成本, 在风光出力波动性高时使用 PEMEL 制氢, 提高了制氢效率。复合电解槽 1 d 的总制氢量在 AEL 和 PEMEL 之间且非常接近于 PEMEL。

表2为风光互补制氢系统的最终优化结果。由表可知:相较于单一 AEL 制氢, 复合电解槽年制氢量比其高出 46.13%, 而且采用复合电解槽制氢的风光互补制氢系统初投资只增加了 18.8%; 相较于单一 PEMEL 制氢, 复合电解槽年制氢量可达其 97.69%, 并且系统初投资是采用单一 PEMEL 制氢系统初投资的 52.26%。所以, 采用复合电解槽制氢具有最高的系统收益, 对比于单一 AEL 制氢, 在提高极少系

表2 风光互补制氢系统优化结果

Table 2 Optimization results of wind-photovoltaic complementation hydrogen production system

电解槽类型	AEL 容量 / kW	PEMEL 容量 / kW	总制氢量 / (t·a ⁻¹)	制氢成本 / (元·kg ⁻¹)
复合电解槽	92.86	37.14	10.58	29.6
单一 AEL	130		7.24	32.9
单一 PEMEL		130	10.83	37.2

统成本的情况下极大地增加了系统的制氢量,接近于单一PEMEL制氢,优化了系统的制氢效率和经济性。

4 结论

基于复合电解槽协同制氢方案,利用ANP最优选型评估方法构建了风光互补制氢系统,通过对AEL、PEMEL、复合电解槽3类电解槽的各指标特性进行分析,并结合某地的风光资源禀赋,验证了复合电解槽性能的优越性,具体结论如下。

1)复合电解槽电解效率平均可达91.7%,虽略低于AEL电解效率,但是其电解效率浮动范围比AEL窄。

2)当电流为7.3 A时,复合电解槽制氢量基本达到PEMEL制氢量,且高于AEL制氢量。

3)相较于单一AEL制氢,使用复合电解槽制氢,系统初投资只增加了18.8%,制氢量可增加46.13%。利用复合电解槽制氢的系统初投资为单一PEMEL制氢的系统初投资的52.26%,制氢量可达单一PEMEL制氢的97.69%,显著优化了系统的经济性和制氢效率。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 左冠林,郭红霞,林文智,等. 考虑低碳制氢的微电网优化配置[J]. 电力自动化设备,2023,43(2):9-18.
ZUO Guanlin, GUO Hongxia, LIN Wenzhi, et al. Optimal configuration of microgrid considering low-carbon hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2):9-18.
- [2] 陈锦鹏,胡志坚,陈颖光,等. 考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):48-55.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermo-electric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):48-55.
- [3] 潘郑楠,梁宁,徐慧慧,等. 基于纳什谈判理论的风电-虚拟氢厂参与现货市场合作运行策略[J]. 电力自动化设备,2023,43(5):129-137.
PAN Zhengnan, LIANG Ning, XU Huihui, et al. Cooperative operation strategy of wind power-virtual hydrogen plant participating in spot market based on Nash bargaining theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5):129-137.
- [4] 黄伟栋,李杨,李璟延,等. 考虑可再生能源不确定性的风光-储-蓄多时间尺度联合优化调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(4):91-98.
HUANG Weidong, LI Yang, LI Jingyan, et al. Multi-time scale joint optimal scheduling for wind-photovoltaic-electrochemical energy storage-pumped storage considering renewable energy uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4):91-98.
- [5] 丁剑,方晓松,宋云亭,等. 碳中和背景下西部新能源传输的氢综合能源网构想[J]. 电力系统自动化,2021,45(24):1-9.
- [6] SHIN H, JANG D, LEE S, et al. Techno-economic evaluation of green hydrogen production with low-temperature water electrolysis technologies directly coupled with renewable power sources[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 286:117083.
- [7] 司杨,陈来军,陈晓弢,等. 基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):3-10.
SI Yang, CHEN Laijun, CHEN Xiaotao, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):3-10.
- [8] 马晓峰,张舒涵,何勇,等. PEM电解水制氢技术的研究现状与应用展望[J]. 太阳能学报,2022,43(6):420-427.
MA Xiaofeng, ZHANG Shuhan, HE Yong, et al. Research status and application prospect of PEM electrolysis water technology for hydrogen production[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(6):420-427.
- [9] 梁涛,孙博峰,谭建鑫,等. 基于深度强化学习算法的风光互补可再生能源制氢系统调度方案[J]. 高电压技术,2023,49(6):2264-2275.
LIANG Tao, SUN Bofeng, TAN Jianxin, et al. Scheduling scheme of wind-solar complementary renewable energy hydrogen production system based on deep reinforcement learning[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6):2264-2275.
- [10] 陈昱杉,李琦,郑博,等. 基于风光氢储一体化系统的容量配置优化及经济评价[J]. 油气储运,2023,42(7):763-773.
CHEN Yushan, LI Qi, ZHENG Bo, et al. Capacity allocation optimization and economic evaluation based on wind-solar-hydrogen-storage integrated system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(7):763-773.
- [11] 帅逸轩,赵培轩,刘慧敏,等. 基于多功率耦合的风光互补制氢系统容量配置优化方法[J]. 太阳能学报,2022,43(11):474-481.
SHUAI Yixuan, ZHAO Peixuan, LIU Huimin, et al. Optimization of battery capacity for wind-solar complementary hydrogen production system under multi-power conditions[J]. Energetica Sinica, 2022, 43(11):474-481.
- [12] 郑博,白章,袁宇,等. 多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化[J]. 中国电机工程学报,2022,42(23):8486-8496.
ZHENG Bo, BAI Zhang, YUAN Yu, et al. Hydrogen production system and capacity optimization based on synergistic operation with multi-type electrolyzers under wind-solar power[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23):8486-8496.
- [13] 李建林,梁忠豪,赵文鼎,等. 混合电解槽制氢系统选型及评估方法[J/OL]. 高电压技术. (2023-03-15)[2023-07-27]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221949>.
- [14] 王恒田,杨晓龙. 基于网络层次分析法的平价上网光伏电站站址优选的决策研究[J]. 太阳能,2020(12):24-32.
WANG Hengtian, YANG Xiaolong. Decision making research on site optimization of PV power station with grid-parity based on ANP method[J]. Solar Energy, 2020(12):24-32.
- [15] 王静怡,孙海森,张成林,等. 基于网络层次分析法的输变电工程后评价研究[J]. 电力学报,2020,35(6):553-562.
WANG Jingyi, SUN Haisen, ZHANG Chenglin, et al. Research on post-evaluation of power transmission project based on ANP[J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(6):553-562.
- [16] 董慧芬,金晨阳,史志波. IF-ANP组合赋权的灰聚类飞机电能质量评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(7):49-55.
DONG Huifen, JIN Chenyang, SHI Zhibo. Aircraft electrical

- power quality evaluation of grey clustering with if-anp combination weight[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(7): 49-55.
- [17] 李猛, 李可民, 彭勃, 等. 基于网络层次分析法和模糊综合评判的配电网运行管理水平综合评价体系研究[J]. 供用电, 2019, 36(8): 23-29.
- LI Meng, LI Kemin, PENG Bo, et al. Research on comprehensive evaluation system of distribution network operation and management level based on ANP and Fuzzy[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(8): 23-29.
- [18] 徐培真. 基于多源微电网的优化配置研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2021.
- XU Peizhen. Research on optimal configuration based on multi-source microgrid[D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2021.
- [19] MA J, ZHAO D W, YAO L Z, et al. Analysis on application of a current-source based DFIG wind generator model[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3): 352-361.
- [20] 张蕊. 风光互补制氢系统的建模与优化运行方法的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.
- ZHANG Rui. Research on modeling and optimal operation method of wind-solar hybrid hydrogen production system[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2021.
- [21] 杨洪明, 陈博文, 王懂, 等. 局部阴影遮挡下太阳能电池-超级电容器阵列建模及其缺失电流协同补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 15-23.
- YANG Hongming, CHEN Bowen, WANG Dong, et al. Modeling of solar cell-supercapacitor device array under local shadow and its cooperative compensation method of missing current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 15-23.
- [22] 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.
- KONG Lingguo. Study on optimal configuration and coordinated control strategy of wind, solar and hydrogen integrated energy system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [23] 戴凡博. PEM电解水制氢催化剂及直接耦合光伏发电系统建模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- DAI Fanbo. Study on PEM catalyst for hydrogen production by electrolysis of water and modeling of direct coupling photovoltaic power generation system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [24] 孔令国, 于家敏, 蔡国伟, 等. 基于模型预测控制的离网电氢耦合系统功率调控[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3139-3149.
- KONG Lingguo, YU Jiamin, CAI Guowei, et al. Power regulation of off-grid electro-hydrogen coupled system based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3139-3149.
- [25] 张轩, 王凯, 樊昕晔, 等. 电解水制氢成本分析[J]. 现代化工, 2021, 41(12): 7-11.
- ZHANG Xuan, WANG Kai, FAN Xinye, et al. Cost analysis on hydrogen production via water electrolysis[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(12): 7-11.

作者简介:

黄启帆(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为氢储能、综合能源优化调度(E-mail: m13569723919@163.com);

陈洁(1975—), 女, 教授, 博士, 研究方向为新能源储能技术、智能新型材料在机电领域中的应用(E-mail: xj_cj@163.com);

曹喜民(1985—), 男, 讲师, 博士, 通信作者, 研究方向为风电并网后电力系统调度策略、多能互补系统优化(E-mail: caoxm@sdju.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Optimization of wind-photovoltaic complementation hydrogen production system based on synergistic hydrogen production by alkaline electrolyzer and proton exchange membrane electrolyzer

HUANG Qifan¹, CHEN Jie¹, CAO Ximin¹, LIU Jun², ZHANG Yuchao², BAO Hongyin²

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. CSSC Haiwei(Xinjiang) New Energy Co., Ltd., Urumqi 830099, China)

Abstract: For engineering applications, alkaline electrolyzer(AEL) and proton exchange membrane electrolyzer(PEMEL) have their own advantages and disadvantages in terms of hydrogen production efficiency and economy. For this reason, a synergistic composite electrolyzer scheme for hydrogen production of AEL and PEMEL is proposed. The optimal capacity ratios of the two types of electrolyzers are determined using analytic network process, and the composite electrolyzer is applied to the wind-photovoltaic complementation hydrogen production system, and a number of indexes of three schemes, namely, single AEL, single PEMEL, and composite electrolyzer, are compared and analyzed. The results show that under the same capacity, the cost of the composite electrolyzer hydrogen production equipment is 52.26% of the cost of the single PEMEL hydrogen production equipment, and the amount of hydrogen production can be up to 97.69% of the amount of hydrogen produced by a single PEMEL, which is 46.13% higher than that by a single AEL, which significantly optimizes the system's economy and efficiency of hydrogen production, and verifies the validity of the proposed scheme of composite electrolyzer synergistic hydrogen production.

Key words: alkaline electrolyzer; proton exchange membrane electrolyzer; analytic network process; hydrogen production efficiency; economy

附录 A

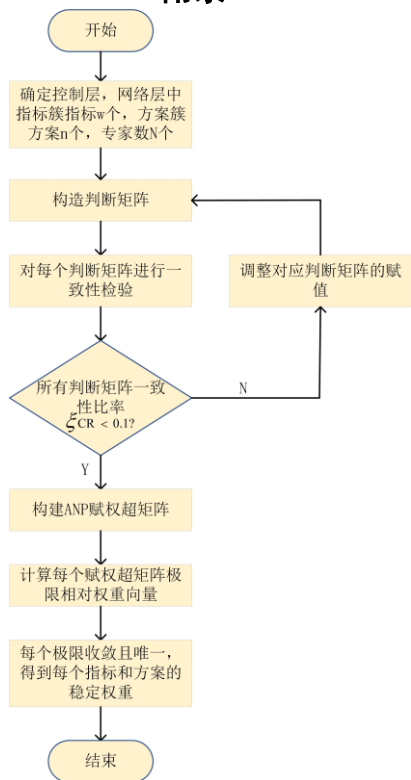


图 A1 ANP 评估模型流程图
Fig.A1 Flowchart of ANP evaluation model

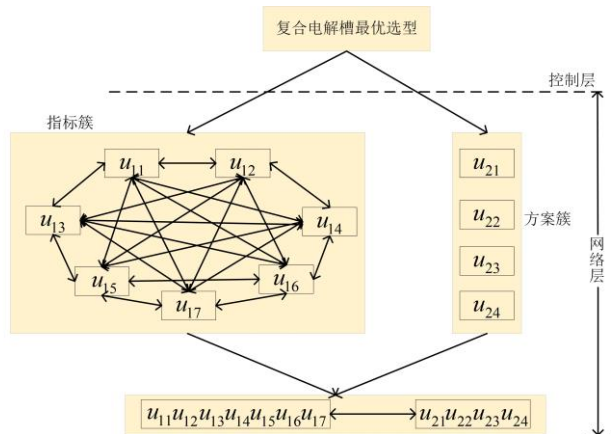


图 A2 复合电解槽最优选型评估模型
Fig.A2 Composite electrolyzer optimal selection evaluation model

附录 B

表 B1 Satty 的 9 级标度表
Table B1 9-level scale table of Satty

相对重要性	取值
同等重要	1
略微重要	3
比较重要	5
非常重要	7
极为重要	9
相邻标度中间值	2,4,6,8
反向比较	以上的倒数

表 B2 Yaanp 软件中第 1 类判断矩阵示例

Table B2 Example of Type I judgment matrix in Yaanp software

指标	额定电流 密度	制氢量	动态响应 时间	电解槽寿命	组件老化 速率	设备成本	W_i
额定电流密度	1	1/2	2	3	4	1	0.195 291
制氢量	2	1	4	5	6	3	0.394 521
动态响应时间	1/2	1/4	1	2	3	1/2	0.110 828
电解槽寿命	1/3	1/5	1/2	1	2	1/3	0.069 222
组件老化速率	1/4	1/6	1/3	1/2	1	1/4	0.045 646
设备成本	1	1/3	2	3	4	1	0.184 491

注： W_i 为每个指标或每个方案在这个判断矩阵中的权重值，权重值越大，代表该指标或者方案越重要。

表 B3 Yaanp 软件中第 2 类判断矩阵示例

Table B3 Example of Type II judgment matrix in Yaanp software

方案	AEL:PEMEL=1:1	AEL:PEMEL=1.5:1	AEL:PEMEL=2:1	AEL:PEMEL=2.5:1	W_i
AEL:PEMEL=1:1	1	1/2	1/3	1/4	0.095 435
AEL:PEMEL=1.5:1	2	1	1/2	1/3	0.160 088
AEL:PEMEL=2:1	3	2	1	1/2	0.277 181
AEL:PEMEL=2.5:1	4	3	2	1	0.467 296

表 B4 Yaanp 软件中第 3 类判断矩阵示例

Table B4 Example of Type III judgment matrix in Yaanp software

指标	额定电流 密度	制氢量	热启动时间	动态响应 时间	电解槽 寿命	组件老化 速率	设备成本	W_i
额定电流密度	1	1/2	5	2	3	4	2	0.210 364
制氢量	2	1	7	4	5	6	3	0.361 059
热启动时间	1/5	1/7	1	1/4	1/3	1/2	1/5	0.032 667
动态响应时间	1/2	1/4	4	1	2	3	1/2	0.112 140
电解槽寿命	1/3	1/5	3	1/2	1	2	1/3	0.072 011
组件老化速率	1/4	1/6	2	1/3	1/2	1	1/4	0.047 269
设备成本	1/2	1/3	5	2	3	4	1	0.164 490

表 B5 判断矩阵平均随机一致性指标取值

Table B5 Average random consistency index of judgment matrix

阶数 n	ξ_{RI}	阶数 n	ξ_{RI}	阶数 n	ξ_{RI}
1	0	4	0.89	7	1.36
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.52	6	1.26	9	1.46

表 B6 加权超矩阵

Table B6 Weighted super matrix

加权值		指标							方案			
		u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	u_{17}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}
指标	u_{11}	0.000	0.143	0.098	0.106	0.101	0.100	0.119	0.210	0.210	0.210	0.210
	u_{12}	0.224	0.000	0.197	0.202	0.199	0.185	0.211	0.361	0.361	0.361	0.361
	u_{13}	0.019	0.023	0.000	0.019	0.018	0.017	0.020	0.033	0.033	0.033	0.033
	u_{14}	0.071	0.091	0.055	0.000	0.059	0.057	0.073	0.112	0.112	0.112	0.112
	u_{15}	0.045	0.056	0.035	0.044	0.000	0.037	0.047	0.072	0.072	0.072	0.072
	u_{16}	0.029	0.037	0.023	0.028	0.027	0.000	0.029	0.047	0.047	0.047	0.047
	u_{17}	0.110	0.149	0.092	0.100	0.095	0.103	0.000	0.164	0.164	0.164	0.164

方案	u_{21}	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000
	u_{22}	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.062	0.000	0.000	0.000	0.000
	u_{23}	0.139	0.139	0.139	0.139	0.139	0.139	0.153	0.000	0.000	0.000	0.000
	u_{24}	0.234	0.234	0.234	0.234	0.234	0.234	0.246	0.000	0.000	0.000	0.000

表 B7 各权重值以及所对应极限

Table B7 Value of each weight and corresponding limit

指标与方案	权重	极限
u_{11}	0.203	0.135
u_{12}	0.322	0.215
u_{13}	0.036	0.024
u_{14}	0.123	0.082
u_{15}	0.080	0.054
u_{16}	0.054	0.036
u_{17}	0.182	0.121
u_{21}	0.092	0.031
u_{22}	0.154	0.051
u_{23}	0.282	0.094
u_{24}	0.472	0.157

表 B8 风光发电及制氢设备成本

Table B8 Cost of main components for wind-photovoltaic power and electrolyzer

设备	设备购置成本/(元·kW ⁻¹)	年均运维成本/(元·kW ⁻¹)
风机	2 000	40
光伏阵列	3 500	35
AEL	4 000	160
PEMEL	12 000	480

附录 C

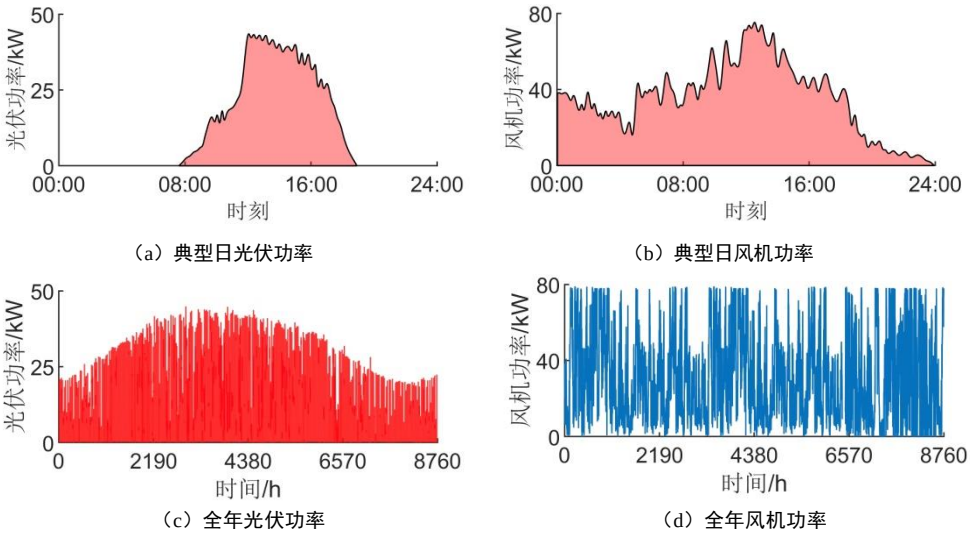


图 C1 风机、光伏阵列发电量

Fig.C1 Power production of wind turbine and photovoltaic array