doi:10.3969/j.issn.1672-1292.2026.03.001

面向氢-光-储源荷协同能源系统建模及综合评价研究

梁岩芳[1,2,3],高　林[4,5],万红廷[2,3,4,6],付经伦[6,7],李　想[8]

(1.南京师范大学能源科学与工程学院,江苏 南京 210023)
(2.中科南京未来能源系统研究院,江苏 南京 211135)
(3.中国科学院大学南京学院,江苏 南京 211135)
(4.中国科学院大学工程科学学院,北京 100149)
(5.北京怀柔实验室,北京 101400)
(6.中国科学院工程热物理研究所,北京 100190)
(7.内蒙古工业大学新能源学院,内蒙古 呼和浩特 010321)
(8.北京国能龙威发电技术有限公司,北京 100020)

[**摘要**] 为验证面向氢-光-储源荷协同的复杂能源系统方案的优劣,建立了系统模型并构建了综合评价体系. 基于 MATLAB 软件完成系统建模后,从能源效益、经济效益和环境效益 3 个维度出发,构建了包含 7 个二级指标的综合评价体系. 采用熵值法和 CRITIC 权重法计算指标权重,结合拉格朗日乘子法确定组合权重,并运用多准则妥协解排序法进行综合评价. 通过对比光伏输出功率的理论值与实际工厂运行值进行模型验证,结果显示平均绝对百分比误差为 3.53%,表明系统模型具有可靠性. 实例计算分析表明,S4 方案(包含电解槽、光伏、储氢罐、燃气轮机、余热锅炉、电化学储能、制冷机组及网电)是综合考虑各项指标后的最优选择,同时该评价方法能有效评估系统方案的优劣,为方案选择提供了科学依据.

[**关键词**] 综合能源系统,综合评价,熵值法,CRITIC 权重法,多准则妥协解排序法
[**中图分类号**]TK01　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1672-1292(2026)03-0001-13

Research on Modelling and Comprehensive Evaluation Method for Hydrogen Photovoltaic-Energy Storage-Load Collaborative System

Liang Yanfang[1,2,3], Gao Lin[4,5], Wan Hongting[2,3,4,6], Fu Jinglun[6,7], Li Xiang[8]

(1.School of Energy Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)
(2.Nanjing Institute of Future Energy System, Nanjing 211135, China)
(3.University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)
(4.School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
(5.Beijing Huairou Laboratory, Beijing 101400, China)
(6.Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(7.School of New Energy, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010321, China)
(8.Beijing Guoneng Longwei Power Generation Technology Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: In order to evaluate the performance of a complex energy system scheme that integrates hydrogen-photovoltaic-storage multi-energy complementarity and source-load synergy, a system model is developed and a comprehensive evaluation framework is established. Using MATLAB software, a system modeling is conducted to establish a comprehensive evaluation system encompassing seven secondary indicators from the perspectives of energy efficiency, economic benefits, and environmental benefits. The entropy method and CRITIC weight method are employed to calculate the weights of the indicators. The Lagrange multiplier method is utilized to determine the combined weights, and a vlse Kriterijumska optimizacijia I kompromisno resenje (VIKOR) method is applied for comprehensive evaluation. The theoretical output values of the PV output power are verified by comparing them with the actual plant operating values, yielding a mean

收稿日期:2025-03-14.
基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(重大科技示范)(BE2022614)、小流量工况下透平与非轴对称排气(汽)系统流动控制研究项目(51776201).
通讯作者:付经伦,博士,教授,研究方向:叶轮机械透平强耦合研究及燃机数字化. E-mail:fujl@iet.cn

absolute percentage error of 3.53%. Through computational analysis of the case study, it is determined that S4, which includes an electrolyzer, photovoltaic system, hydrogen storage tank, gas turbine, waste heat boiler, electrochemical energy storage, refrigeration unit, and grid electricity, represents the optimal solution when considering multiple indicators comprehensively. The system's model demonstrates reliability. Computational analysis of practical cases confirms that this evaluation method effectively assesses the quality of system solutions, offering a reliable basis for decision-making in system scheme selection.

Key words: integrated energy systems, comprehensive evaluation, entropy weight method, CRITIC weighting method, VIKOR method

作为全球最大的氯碱生产国,我国氯碱产业占据全球市场 50%以上份额的同时,正面临日益突出的可持续发展挑战. 截至 2023 年,我国氯碱系列产品年产能已达 7 754 万吨[1],虽然整体保持增长态势,但其典型的大规模、高能耗生产特征,以及副产氢气利用率不足等问题,导致行业存在显著的结构性矛盾. 在国家"双碳"战略深入推进的背景下,传统生产供能模式已难以适应行业转型升级需求. 为此,建立多能互补、源荷协同的新型综合能源系统(integrated energy systems,IES),成为推动氯碱产业能源改革、实现可持续发展的关键路径. 系统方案设计完成后,如何科学合理地评估不同能源系统的优劣成为决策关键,而构建面向综合能源系统的科学评价体系对于筛选合理的综合能源系统规划方案以及进行项目决策评价具有关键作用.

对于多能互补的综合能源系统,研究人员采用不同的方法进行衡量. 赵涛等[2]针对某氯碱化工生态工业园,利用层次分析(the analytic hierarchy process,AHP)和模糊综合评价法等方法,建立了主观评价体系,从经济、污染控制、生态环境和园区管理 5 个方面进行评价. 冯晓梅等[3]运用层次分析法和直接打分法对三联供+地源热泵+蓄能+燃气锅炉(冷水机组)多能源系统从技术、经济、环境等多个维度展开评价分析. Prayogo 等[4]结合层次分析法和理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution,TOPSIS)的主观评价的方法,对太阳能光伏和风力发电系统中的不同逆变器选项进行了综合评价. Georgiou 等[5]采用层次分析法和偏好排名组织方法对自治海水淡化装置的能源供应拓扑进行了优化研究. 他们针对 5 种不同的能源拓扑结构,在环境优先、经济优先以及无偏好倾向的三种场景下进行了排序分析,以确定最适合的能源供应方案. Wei 等[6]结合层次分析法和百分制评分体系,提出了一种用于评估工业企业能源效率的方法,然而该方法具有较强的主观性. Chen 等[7]将反熵法与网络分析法相结合,用以确定指标权重并构建评分函数,有效解决了因权重设定偏差引发的指标交叉与相互干扰问题. Peng 等[8]聚焦于电力用户的效率评价问题,构建了一个基于层次分析法的能源效率综合评价模型,并通过实证分析验证了该模型的有效性和合理性. 针对投资费用、运行费用及二氧化碳排放量等典型指标,Ren 等[9]基于层次分析法、综合判断分析法构建了主观性较强的评价体系并开展相关分析. 尽管上述研究在综合能源系统的评价方面具有一定的合理性,但多数研究多采用具有较强主观性的主观赋权法或仅依赖单一评价方法,可能导致结果客观性不足,无法全面反映系统的实际性能和潜在问题.

当前,随着可再生能源在能源系统中占比越来越高,新型能源系统的可靠性、稳定性以及源荷之间的耦合性日益突显,需要更客观、全面的评估和分析系统性能. 本文以一种面向氯碱化工的氢-光-储源荷协同能源系统为例,提出一种基于熵值法-CRITIC 权重法-多准则妥协解排序法的综合评价方法,兼顾能源效益、经济效益、环境效益等性能指标,采用科学的数据分析和量化指标对系统进行评估分析.

1 面向氯碱化工氢-光-储源荷协同能源系统架构及模型

1.1 面向氯碱化工氢-光-储源荷协同能源系统架构

氯碱是我国重要的化工支撑产业,其传统生产-供能系统架构如图 1 所示. 氯碱生产时,来自盐水槽的一次盐水精制后获得氯化钠精盐水,通过高位槽进入电解槽,电解产生氯气、氢气和氢氧化钠溶液;氢氧化钠溶液全部进入市场售卖;氢气一部分通过销售进入下游市场,剩余部分直接排空;氯气冷却、干燥后或进入市场售卖,或另作他用. 系统输入的能源包括:用于驱动电解槽、制冷机的电网电力和管网蒸汽.

为了降低传统氯碱生产排放量、耗能和成本,引入光伏阵列(photovoltaic array,PV)、燃氢燃气轮机(gas turbine,GT)、余热锅炉(waste heat boilers,WHB)、电化学蓄能电池(battery storage,BS)、储氢罐

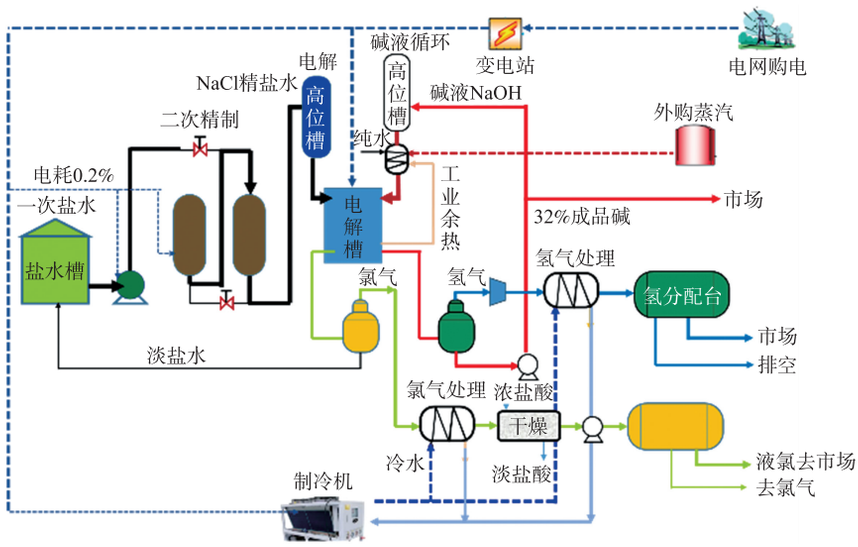


图 1　典型氯碱化工生产-供能系统

Fig. 1　Typical chlor-alkali chemical production and energy supply system

(hydrogen storage tanks, HS)、吸附式制冷机(adsorption refrigeration, AR)和吸收式制冷机(absorption chillers, AC)等装置,构建一套氯碱氢-光-储源荷协同能源系统架构,如图 2 所示. 氯碱生产所需电能由光伏、排空的氢气发电和电网提供,其中氢气有低温质子膜燃料电池和燃氢燃气轮机两种发电途径,运行时可采取实时发电和与储氢罐结合两种方式. 为了消纳可再生能源和应对峰谷电价波动,引入电化学储能设备存储电网谷电. 燃机余热利用余热锅炉产生蒸汽以满足系统热量需求;基于能量梯级利用原则,采用吸附式和吸收式制冷机利用蒸汽及氯碱生产中的余热驱动制冷.

通过光伏、燃料电池、燃氢燃气轮机、余热锅炉、电化学储能电池、储氢罐、吸附式和吸收式制冷机等装置与传统氯碱生产流程的不同组合,获得如表 1 中所示的 5 个不同类型的源荷协同能源系统.

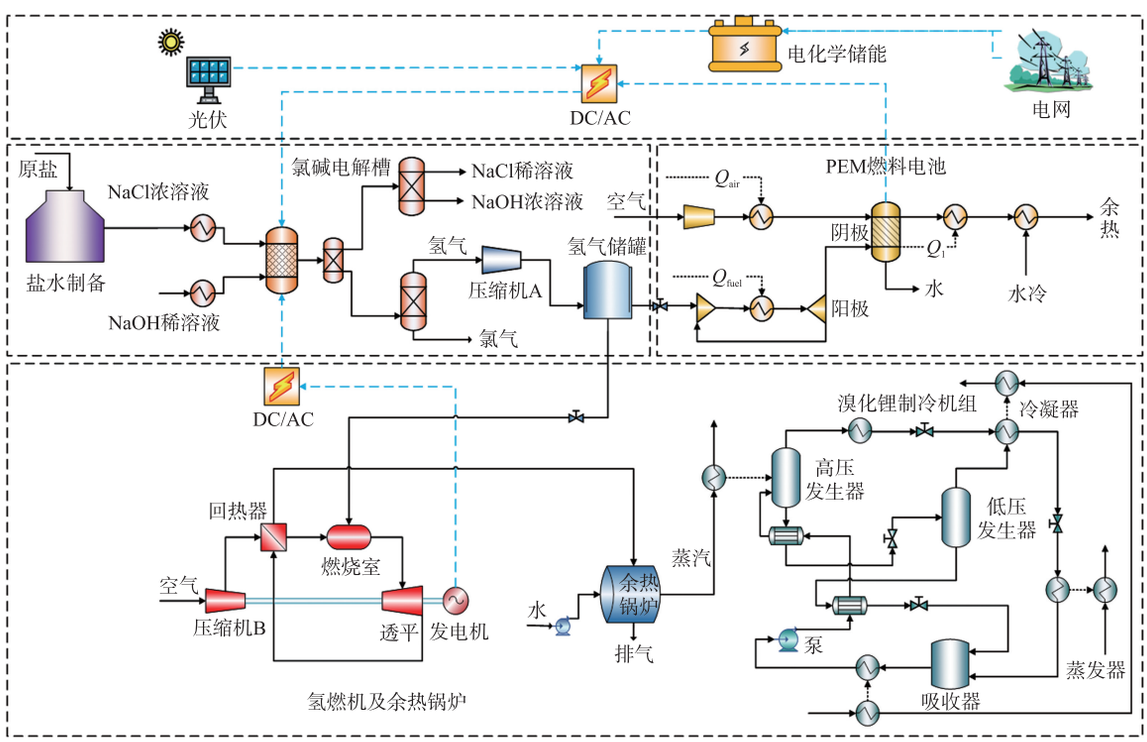


图 2　氯碱化工的氢-光-储源荷协同能源系统基本架构

Fig. 2　The basic architecture of the hydrogen, solar energy, and energy storage source-load coordinated energy system in the chlorine-alkali industry

表 1　源荷协同能源系统方案

Table 1　Source-load synergy energy systems programme

系统组合编号	系统类型	设备组成
S1	光-电耦合 & 源荷协同	电解槽、光伏、电制冷及网电
S2	氢-光-电-热耦合 & 源荷协同	电解槽、光伏、氢储罐、燃气轮机、余热锅炉、制冷机组及网电
S3	氢-光耦合 & 源荷协同	电解槽、光伏、氢储罐及燃料电池、制冷机组及网电
S4	氢-光-电-储-热耦合 & 源荷协同	电解槽、光伏、氢储罐、燃气轮机、余热锅炉、电化学储能、制冷机组及网电
S5	氢-光-电-储耦合 & 源荷协同	电解槽、光伏、氢储罐、燃料电池、电化学储能、制冷机组及网电

1.2　面向氯碱化工氢-光-储源荷协同能源系统模型

面向氯碱化工氢-光-储源荷协同能源系统各主要组成装置模型如下.

1.2.1　氯碱电解槽模型

氯碱电解槽是氯碱生产的核心环节,电解槽阳极通入氯化钠饱和溶液,阴极通入氢氧化钠稀溶液,发生的电解反应为,

阳极氧化反应为:

$$2Cl^- \rightarrow Cl_{2(g)} + 2e^-, \tag{1}$$

阴极还原反应为:

$$2H_2O_{(l)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^-_{(aq)}, \tag{2}$$

总反应为:

$$2NaCl_{(aq)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow 2NaOH_{(aq)} + Cl_{2(g)} + H_{2(g)}. \tag{3}$$

式中,下标 g 表示气体;l 表示液体;aq 表示溶液.

参考文献[10-12],构建氯碱电解槽模型,假设氢和氯是理想气体,水是不可压缩流体,气液相被分离,计算出对应的温度和压力下的吉布斯能量 ΔG. 利用法拉第定律求解可逆过程电池电压 U_{rev}:

$$U_{\mathrm{rev}} = \frac{\Delta G}{zF}. \tag{4}$$

式中,z 为交换的电子数,为 2;F 为法拉第常数,取 $9.648\ 5\times10^4$ C/mol.

针对实际不可逆电解反应,过程总能量用焓的变化描述,热中性电压 U_{tn} 与总焓变化 ΔH 相关,

$$U_{tn} = \frac{\Delta H}{zF}. \tag{5}$$

电解槽的电解电压 U_t 采用温度相关的电流-电压经验公式求解[12],

$$U_t = U_{\mathrm{rev}} + \frac{r_1 + r_2 T_t}{A_{\mathrm{el}}} i_t + S\times\ln\left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T_t} + \frac{t_3}{T_t^2}}{A_{\mathrm{el}}} i_t + 1\right). \tag{6}$$

式中,U_t 为电解槽的电解电压,V;U_{rev}为可逆电压,V;r_1 为欧姆电阻参数,取 $4.452\times10^{-5}\ \Omega\cdot m^2$;$r_2$ 为欧姆电阻参数,取 $6.889\times10^{-9}\ \Omega\cdot m^2\cdot℃$;$S$ 为过电压系数,0.338 V;t_1 为电解槽温度依赖性参数,取 $-1.539\times10^{-2}\ m^2/A$;$t_2$ 为电解槽温度依赖性参数,取 2.002 $m^2\cdot℃/A$;t_3 为电解槽温度依赖性参数,取为 15.242 $m^2\cdot℃^2/A$;T_t 为电解槽温度,℃;i_t 为电解槽电流,A;A_{el}为膜截面积,m^2.

电解产生的氢气摩尔流量 $n_{\mathrm{H}_2,t}$为,

$$n_{\mathrm{H}_2,t} = \eta_F \times \frac{N i_t}{zF}. \tag{7}$$

式中,N 为串联电解槽数;η_F 为电解槽电流效率.

1.2.2　光伏发电模型

本研究选择加入分布式光伏发电,为电解槽提供电能,参考文献[13-14]方法建立光伏发电模型,

$$T_{c,t} = T_{\mathrm{am},t} + (T_{\mathrm{nom}} - T_{\mathrm{am},t}) \times \frac{GI_t}{GI_{\mathrm{nom}}} \times \frac{k_{\mathrm{nom}}}{k_t} \times \left(1 - \frac{\eta_{\mathrm{PV},t}}{\tau\alpha}\right), \tag{8}$$

$$\eta_{\mathrm{PV},t} = \eta_{\mathrm{PV,nom}} \times [1 + \gamma(T_{c,t} - T_{c,\mathrm{ref}})], \tag{9}$$

$$P_{\mathrm{PV},t}=n_{\mathrm{PV}}\times A_{\mathrm{mod}}\times GI_t\times\eta_{\mathrm{PV},t}\times\eta_{\mathrm{inv}}\times f_{\mathrm{PV},t}. \tag{10}$$

式中:$T_{c,t}$为光伏阵列的实际工作温度,℃;$T_{\mathrm{am},t}$为标准工况下的环境温度,℃;T_{nom}为光伏电池标准工况下的工作温度,℃;GI_t为全局辐照度,W/m^2;GI_{nom}为额定工况下的总辐照度,W/m^2;k_{nom}为标准工况下的传热系数,W/(m^2·K);k_t为实际工况的换热系数,W/(m^2·K);$\tau\alpha$为透射吸收系数;$\eta_{\mathrm{PV},t}$为光伏实际发电效率,%;$\eta_{\mathrm{PV,nom}}$为光伏额定工况运行时的发电效率;γ为温度系数,%/K;$T_{c,\mathrm{ref}}$为光伏模块在额定工况条件下的工作温度,℃;$P_{\mathrm{PV},t}$为光伏阵列的功率输出;n_{PV}为光伏阵列的数量;A_{mod}为有效面板面积,m^2;η_{inv}为逆变器效率,%;$f_{\mathrm{PV},t}$为降额因子. 光伏输出功率在一年内的波动情况如图 3 所示.

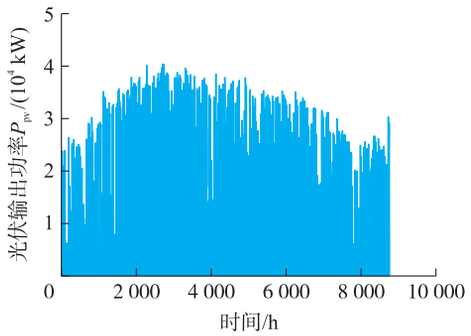


图 3　一年内光伏输出功率的波动情况

Fig. 3　Fluctuations in photovoltaic power generation over the course of a year

1.2.3　氢燃气轮机模型

本研究选取带回热的燃氢燃气轮机作为排空氢气的一种利用方式,根据热力第一定律建立燃氢燃机物理模型[15],

$$P_{\mathrm{GT},t}=\eta_{\mathrm{GT},t}\times n_{\mathrm{GT},\mathrm{H}_2,t}\times LHV_{\mathrm{H}_2}. \tag{11}$$

式中,$P_{\mathrm{GT},t}$为燃氢燃机在 t 时刻的发电功率,kW;$\eta_{\mathrm{GT},t}$为燃氢燃机在 t 时刻的发电效率,%;$n_{\mathrm{GT},\mathrm{H}_2,t}$为 t 时刻进入燃氢燃机的氢气摩尔流量,mol/s;LHV_{H_2}为氢气的低位热值,kJ/mol.

燃氢燃机可回收的余热 $Q_{\mathrm{GT},yr,t}$为,

$$Q_{\mathrm{GT},yr,t}=n_{\mathrm{GT},\mathrm{H}_2,t}\times LHV_{\mathrm{H}_2}\times(1-\eta_{\mathrm{GT},t})-Q_{\mathrm{loss},t}. \tag{12}$$

式中,$Q_{\mathrm{GT},yr,t}$为燃氢燃机在 t 时刻的可回收余热(100%回收),kJ;$Q_{\mathrm{loss},t}$为 t 时刻时的热损失,kJ.

1.2.4　余热锅炉模型

在本研究中,采用余热锅炉利用燃气轮机排放高温烟气产生蒸汽所需热量 $Q_{\mathrm{WHB},t}$,

$$Q_{\mathrm{WHB},t}=Q_{\mathrm{GT},yr,t}\times\eta_{\mathrm{WHB}}. \tag{13}$$

式中,$Q_{\mathrm{WHB},t}$为燃氢燃机的余热量,kW;η_{WHB}为余热锅炉效率.

1.2.5　质子膜燃料电池模型

燃料电池主要由三个关键组件构成:阳极、阴极以及中间的电解质层. 质子膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell,PEMFC)作为排空氢气发电的另外一种可选途径,基于其发电电化学过程,建立电化学模型[16-17],

$$P_{\mathrm{PEMFC},t}=N_{\mathrm{cell}}\times V_{\mathrm{cell},t}\times I_{\mathrm{st},t}, \tag{14}$$

$$V_{\mathrm{cell},t}=E_{\mathrm{Nernst},t}-V_{\mathrm{act},t}-V_{\mathrm{ohm},t}-V_{\mathrm{con},t}, \tag{15}$$

$$E_{\mathrm{Nernst},t}=1.229-8.5\times10^{-4}(T_{\mathrm{fc},t}-298.15)+4.308\ 5\times10^{-5}\times T_{\mathrm{fc},t}\times\ln(P_{\mathrm{H}_2,t}\times P_{\mathrm{O}_2,t}^{0.5}). \tag{16}$$

$$V_{\mathrm{act},t}=\delta_1+\delta_2\ln(i_t), \tag{17}$$

其中,

$$V_{\mathrm{ohm},t}=i_t\times(R_{m,t}+R_{c,t}), \tag{18}$$

$$V_{\mathrm{con},t}=\frac{\bar{R}\times T_{fc,t}}{z_{\mathrm{PEMFC}}\times F}\ln\left(\frac{i_L}{i_L-i_t}\right). \tag{19}$$

式中:$P_{\mathrm{PEMFC},t}$为 t 时刻燃料电池的发电功率,kW;N_{cell}为燃料电池数;$V_{\mathrm{cell},t}$为 t 时刻单个燃料电池的实际电压,V;$I_{\mathrm{st},t}$为 t 时刻燃料电池的实际电流,A;$E_{\mathrm{Nernst},t}$为 t 时刻燃料电池的开路电压,V;$T_{\mathrm{fc},t}$为 t 时刻操作温度,K;$P_{\mathrm{H}_2,t}$为 t 时刻的氢气的压力,Pa;$P_{\mathrm{O}_2,t}$为 t 时刻的氧气的压力,Pa;$V_{\mathrm{act},t}$为 t 时刻燃料电池的活化过电压,V;δ_1、δ_2为塔菲尔系数;i_t为 t 时刻的电流密度,A/m^2;$V_{\mathrm{ohm},t}$为 t 时刻燃料电池的欧姆过电压,V;$R_{m,t}$为 t 时刻燃料电池膜的电阻,Ω;$R_{c,t}$为 t 时刻接触电阻,Ω;$V_{\mathrm{con},t}$为 t 时刻燃料电池的浓度差过电压,V;i_L为最大电流密度,A/m^2;$\bar{R}$为通用气体常数,8.314,J/(mol/K);z_{PEMFC}为质子交换膜燃料电池发生反应交换的电子数,在该反应中转移电子数为 2.

1.2.6　储能电池模型

蓄电池储能数学模型为[18],

$$E_{\mathrm{batt},t+1}=E_{\mathrm{batt},t}\times(1-\sigma)+\eta_{\mathrm{cha}}\times E_{\mathrm{batt,in},t}, \tag{20}$$

$$E_{\mathrm{batt},t+1}=E_{\mathrm{batt},t}\times(1-\sigma)+\frac{E_{\mathrm{batt,out},t}}{\eta_{\mathrm{discha}}}, \tag{21}$$

$$E_{\mathrm{batt,min}}\leqslant E_{\mathrm{batt},t}\leqslant E_{\mathrm{batt,max}}. \tag{22}$$

式中:$E_{\mathrm{batt},t+1}$和$E_{\mathrm{batt},t}$分别为蓄电池内 $t+1$ 和 t 时刻存储的能量,kW;σ 为小时自放电率,%/h;η_{cha}为充电效率,%;$E_{\mathrm{batt,in},t}$为 t 时刻蓄电池的充电量,kW;$E_{\mathrm{batt,out},t}$为 t 时刻蓄电池的放电量,kW;η_{discha}为放电效率,%;$E_{\mathrm{batt,min}}$和$E_{\mathrm{batt,max}}$为蓄电池最小和最大容量,kW.

1.2.7　储氢罐模型

用储氢罐对氯碱电解单元产出的氢气进行贮存,储氢罐数学模型为[19],

$$H_{\mathrm{HS},t+1}=H_{\mathrm{HS},t}+B\times\eta_{\mathrm{TK,in}}\times m_{\mathrm{HS,ch},t}-(1-B)\frac{m_{\mathrm{HS,dis},t}}{\eta_{\mathrm{TK,out}}}. \tag{23}$$

式中:$H_{\mathrm{HS},t+1}$和$H_{\mathrm{HS},t}$分别为时间 $t+1$ 和 t 时储氢罐的储氢量,kg;$\eta_{\mathrm{TK,in}}$为储氢罐充气效率,%;$\eta_{\mathrm{TK,out}}$为储罐的放气效率,%;$m_{\mathrm{HS,ch},t}$为表示 t 时刻储氢罐的充气量,kg/h;$m_{\mathrm{HS,dis},t}$为表示 t 时刻储氢罐的放气量,kg/h;B 为限制储氢罐运行的参数,$B=1$ 表示时间段 t 内储存氢,$B=0$ 表示时间段内释放氢.

1.2.8　吸附式制冷模型

系统中回收电解槽碱液余热驱动吸附式制冷机制冷,对应的制冷机组模型为[11],

$$Q_{\mathrm{AB},t}=Q_{\mathrm{CA},t}\times\eta_{\mathrm{AB}} \tag{24}$$

式中:$Q_{\mathrm{AB},t}$为 t 时刻吸附式制冷机的制冷量,kW;$Q_{\mathrm{CA},t}$为 t 时刻电解槽碱液余热量,kW;η_{AB}为吸附式制冷机制冷效率.

1.2.9　吸收式制冷模型

系统中 100 ℃以下的低温余热能量用于驱动吸收式制冷机制冷,对应的模型为[20],

$$Q_{\mathrm{AC},t}=Q_{\mathrm{WHB},t}\times\eta_{\mathrm{AC}}. \tag{25}$$

式中:$Q_{\mathrm{AC},t}$为 t 时刻吸收式制冷机的制冷量,kW;η_{AC}为吸收式制冷机制冷效率.

1.2.10　电制冷模型

在未引入吸收式制冷机和吸附式制冷机时,系统采用电制冷机制冷,对应的模型为[20],

$$P_{\mathrm{EC},t}=\frac{Q_{\mathrm{EC},t}}{COP_{\mathrm{EC}}}. \tag{26}$$

式中:$P_{\mathrm{EC},t}$为 t 时刻电制冷机输入电功率,kW;$Q_{\mathrm{EC},t}$为电制冷机制冷量,kW;COP_{EC}为电制冷机总性能系数.

1.3　系统能流模型

1.3.1　电能流平衡方程

根据电能流功率平衡,源荷协同能源系统消耗电功率与多能互补能源端功率之间平衡关系为,

$$P_{\mathrm{C\text{-}A},t}+f_{\mathrm{batt,in}}E_{\mathrm{batt,in},t}=f_{\mathrm{PV}}P_{\mathrm{PV},t}+f_{\mathrm{Grid}}P_{\mathrm{Grid},t}+f_{\mathrm{GT}}P_{\mathrm{GT},t}+f_{\mathrm{PEMFC}}P_{\mathrm{PEMFC},t}+f_{\mathrm{batt,out}}E_{\mathrm{batt,out},t}. \tag{27}$$

式中:$P_{\mathrm{C\text{-}A},t}$为 t 时刻氯碱生产消耗总电负荷,kW;$P_{\mathrm{PV},t}$为 t 时刻光伏输出功率,kW;$P_{\mathrm{Grid},t}$为 t 时刻电网购电量,kW;f 表征各装置调用系数,取值为 1 或 0,各系统方案对应的参数如表 2 所示.

表 2　源荷协同能源系统方案的装置调用系数

Table 2　Installation call factors for source-load synergistic energy system programmes

方案	$f_{\mathrm{batt,in}}$	$f_{\mathrm{HS,in}}$	f_{AC}	f_{AB}	f_{EC}	f_{PV}	f_{Grid}	f_{GT}	f_{WHB}	f_{PEMFC}	$f_{\mathrm{batt,out}}$	$f_{\mathrm{HS,out}}$
S1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
S2	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1
S3	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1
S4	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
S5	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1

1.3.2　热能流平衡方程

蒸汽管网输入热量、余热锅炉产生的蒸汽所携带的热量、储热罐放出的热量和负荷端消耗热量以及储

热罐充入热量满足以下热能流平衡关系为,

$$Q_{\mathrm{Load,heat},t}=Q_{\mathrm{Purchase,heat},t}+f_{\mathrm{WHB}}Q_{\mathrm{WHB},t}. \tag{28}$$

式中:$Q_{\mathrm{Load,heat},t}$为 t 时刻用户消耗的热量;$Q_{\mathrm{Purchase,heat},t}$为 t 时刻购买的蒸汽的热量.

1.3.3 冷能流平衡方程

根据冷能流平衡,吸收式和吸附式制冷产生的冷量,与系统正常运行所需冷负荷之间平衡关系为,

$$Q_{\mathrm{Load,cold},t}=f_{\mathrm{AC}}Q_{\mathrm{AC},t}+f_{\mathrm{AB}}Q_{\mathrm{AB},t}+f_{\mathrm{EC}}Q_{\mathrm{EC},t}. \tag{29}$$

式中:$Q_{\mathrm{Load,cold},t}$为 t 时刻用户所需冷量.

2 面向氯碱化工的氢-光-储源荷协同能源系统综合评价指标及体系

2.1 评价指标体系层次结构

针对氯碱化工氢-光-储源荷协同能源系统,构建涵盖能源、经济、环境三方面的评价指标体系,以实现对系统的综合评价. 如图 4 所示,模型分为目标层、一级指标和二级指标:目标层评估系统综合性能;一级指标包括能源效益、经济效益和环境效益;二级指标为各维度下的具体性能参数.

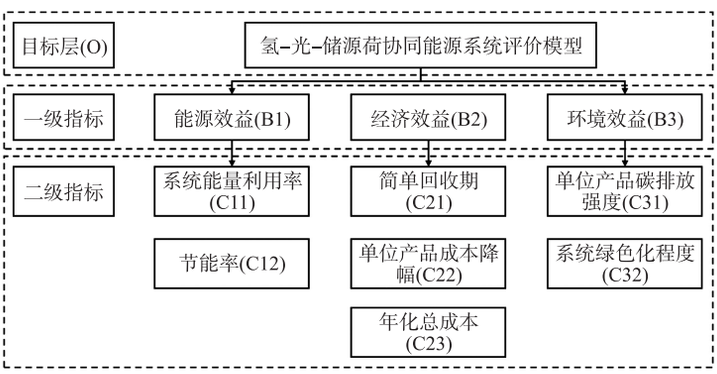


图 4 综合能源系统指标体系

Fig. 4 Integrated energy system indicator system

2.1.1 能源效益类指标

(1)系统能量利用率 η_s:考虑系统的输入和输出,得出了系统能量利用率.

$$\eta_s=\sum_{t}^{T}\frac{\Delta H_{C\text{-}A,t}+f_{\mathrm{GT}}P_{\mathrm{GT},t}+f_{\mathrm{WHB}}Q_{\mathrm{WHB},t}+f_{\mathrm{PEMFC}}P_{\mathrm{PEMFC},t}-V_{\mathrm{H_2},t}LHV_{\mathrm{H_2}}}{P_{C\text{-}A,t}}, \tag{30}$$

$$\Delta H_{\mathrm{C\text{-}A},t}=\Delta H\times n_{\mathrm{NaCl},t}. \tag{31}$$

式中:$\Delta H_{\mathrm{C\text{-}A},t}$为 t 时刻电解氯化钠的总焓变,kJ/h;$V_{\mathrm{H_2},t}$为 t 时刻氢燃机使用的氢气的体积,$\mathrm{Nm^3}$;ΔH 为电解单位摩尔质量的氯化钠对应的焓变,kJ/mol;$n_{\mathrm{NaCl},t}$为 t 时刻电解氯化钠的物质的量,mol.

(2)节能率 η_{ESR}:表征系统其他可再生能源输入占电网用电的百分比. 典型生产-供能系统中电解槽电解所需电量全部从电网购入,而改进后的能源系统电解所需电力由电网与可再生能源协同供给,以典型生产-供能系统电网购入电量为基准,给出节能率.

$$\eta_{\mathrm{ESR}}=\sum_{t}^{T}\frac{P_{\mathrm{Grid},t}^{\mathrm{Baseline}}-P_{\mathrm{Grid},t}^{\mathrm{H\text{-}P\text{-}ES\text{-}L}}}{P_{\mathrm{Grid},t}^{\mathrm{Baseline}}}. \tag{32}$$

式中:$P_{\mathrm{Grid},t}^{\mathrm{Baseline}}$为典型氯碱生产系统在 t 时刻的购电量,kW;$P_{\mathrm{Grid},t}^{\mathrm{H\text{-}P\text{-}ES\text{-}L}}$为提出的氢-光-储源荷协同系统(hydrogen photovoltaic-energy storage-load collaborative system)在 t 时刻的购电量,kW.

2.1.2 经济效益类指标参数

(1)简单回收期 SPP:投资项目建成投产后,累计收益总额覆盖项目总投资所需的时间. 即投资总额除以每年的净收益,可以衡量该项目开始盈利所需的时间.

$$SPP=\frac{CAPEX}{C_{\mathrm{out}}-C_{\mathrm{in}}}, \tag{33}$$

$$C_{\mathrm{out}}=\sum_{i}\left(M_{\mathrm{product}}^{i}\times E_{\mathrm{product}}^{i}\right), \tag{34}$$

$$C_{\text{in}}=\sum_{i}(EB+C_{\text{heat}}+C_{\text{NaCl}})+\sum_{r}OMC_{r}. \tag{35}$$

投资成本为,

$$CAPEX=\sum_{r}(C_{r}\times CAP_{r}\times CRF_{r}), \tag{36}$$

$$CRF_{r}=\frac{\varphi\times(1+\varphi)^{lf_{r}}}{(1+\varphi)^{lf_{r}}-1}, \tag{37}$$

电费 EB 为,

$$EB=\sum_{t}^{T}(E_{\text{Grid},t}\times P_{\text{Grid},t}). \tag{38}$$

蒸汽购买成本 C_{heat} 为,

$$C_{\text{heat}}=\sum_{t}^{T}(E_{\text{heat},t}\times M_{\text{heat},t}). \tag{39}$$

氯化钠的费用 C_{NaCl} 为,

$$C_{\text{NaCl}}=\sum_{t}^{T}(E_{\text{Nacl},t}\times M_{\text{NaCl},t}). \tag{40}$$

运维成本 OMC_{r} 为,

$$OMC_{r}=\sum_{t}^{T}\left(\sum_{r}C_{\text{o\&m},r}^{\text{var}}\times P_{d,t,r}\right)+\sum_{r}(C_{\text{o\&m},r}^{\text{fix}}\times CAP_{r}). \tag{41}$$

式中:SPP 为简单回收期,年;$CAPEX$ 为初始投资成本,元;C_{out} 为获利金额,元;C_{in} 为投入成本,元;i 为物质种类;r 为设备单元种类;E_{product}^{i} 为产物的售卖单价,元/t 或元/m^3;M_{product}^{i} 为产物的售卖量,t;C_{r} 为设备的单位投资成本,元/kW,具体数据参考文献[11];CRF_{r} 为设备的资本回收率;φ 为银行利率,%;lf_{r} 为设备的使用寿命,年;EB 为电费,元;$E_{\text{Grid},t}$ 为 t 时刻电网单价,元/kW·h,峰谷分时电价,如表 3 所示;C_{heat} 为蒸汽购买成本;$E_{\text{heat},t}$ 为 t 时刻蒸汽单价,元/t;$M_{\text{heat},t}$ 为 t 时刻蒸汽购买量,t;$E_{\text{NaCl},t}$ 为 t 时刻氯化钠的单价,元/t;$M_{\text{NaCl},t}$ 为 t 时刻氯化钠购买量,t;$C_{\text{o\&m},r}^{\text{var}}$ 为设备的变动运行维护成本,元/kW;$C_{\text{o\&m},r}^{\text{fix}}$ 为设备的固定化运行维护成本,元/kW/年;$P_{d,t,r}$ 为设备 r 在 d 天 t 时刻的出力,kW·h;CAP_{r} 为设备选取的规模,kW.

表 3　峰谷电价表

Table 3　Peak and valley electricity tariffs

峰平谷	时段	用电单价/(元/kW·h)
峰时	08:00~11:00,17:00~22:00	1.051 0
平段	11:00~17:00,22:00~24:00	0.611 2
谷时	00:00~08:00	0.255 8

(2)单位产品成本降幅 CRU:即在一定时期内(下列计算均以一年为期限,一年按 8 760 h 计算),氯碱化工生产的氧化钠单位成本减少的幅度. 成本包括设备的维护成本,原料费用、电网购电费用等.

$$CRU=\frac{E_{\text{NaOH}_{\text{old}}}-E_{\text{NaOH}_{\text{new}}}}{E_{\text{NaOH}_{\text{old}}}}\times 100\%. \tag{42}$$

式中,$E_{\text{NaOH}_{\text{old}}}$ 为原基准系统 NaOH 单位生产成本元/t,$E_{\text{NaOH}_{\text{new}}}$ 为对比系统 NaOH 单位生产成本元/t,NaOH 单位生产成本 E_{NaOH} 为,

$$E_{\text{NaOH}}=\frac{EB+C_{\text{heat}}+C_{\text{NaCl}}+\sum_{r}OMC_{r}}{\sum_{t}^{T}M_{\text{NaOH},t}}. \tag{43}$$

式中:$M_{\text{NaOH},t}$ 为 t 时间内生产的氢氧化钠的量,t.

(3)年化总成本 ATC:包括投资成本、运维成本、电费、蒸汽购买费用及原材料氯化钠的费用[21].

$$ATC=CAPEX+OMC_{r}+EB+C_{\text{heat}}+C_{\text{NaCl}}. \tag{44}$$

式中:ATC 为年化总成本,元/年.

2.1.3　环境效益指标类

(1)单位产品碳排放强度 MU_{CO_2}:综合能源系统生产单位产品的碳排放量. 在系统中,主要考虑可再生能源替代网电的碳减排量,故假设在本系统中由传统燃煤电厂提供所有网电. 二氧化碳的排放量主要是

从电网购入的电在生产过程中产生的二氧化碳排放.

$$MU_{CO_2}=\frac{\sum_{t}^{T}(P_{Grid}\times C_g)}{M_{NaOH}}. \tag{45}$$

式中:MU_{CO_2}为单位产品碳排放强度,tCO_2/tNaOH;C_g 为每产生 1 兆瓦时(MW·h)的电力,电厂排放的二氧化碳量. 此处取传统燃煤电厂的排放因子为 0.88 t/(MW·h)[22]. P_{Grid}为电网购电量,kW;M_{NaOH}为 NaOH 购买量,t.

(2)系统绿色化程度 G:综合能源系统中可再生能源与电网输入的比值. 在改进后的系统中,可再生能源是光伏和氢能.

$$G=\sum_{t}^{T}\frac{f_{PV}P_{PV,t}+f_{GT}P_{GT,t}+f_{PEMFC}P_{PEMFC,t}}{P_{Grid,t}^{H-P-ES-L}}. \tag{46}$$

2.2 源荷协同能源系统综合评价方法

2.2.1 综合评价方法及流程

为消除综合评价过程中的主观因素干扰,分别采用熵值法与 CRITIC 法计算二级指标权重. 两种赋权方法的权重确定机理存在差异:熵值法依托信息熵反映指标离散程度,CRITIC 法则综合考量指标间的对比强度与冲突关系. 为进一步优化权重配置,采用拉格朗日乘子法求取组合权重. 在此基础上,运用多准则妥协解排序(vlse Kriterijumska optimizacijia I kompromisno resenje,VIKOR)法处理指标存在的冲突性与不可公度性,在决策者偏好难以量化表达的场景下,实现客观公正的系统综合评价,评价流程图如图 5 所示.

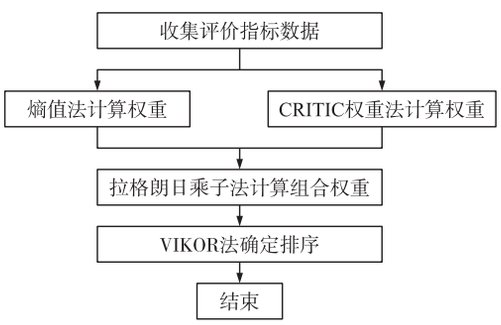


图 5 评价的具体流程图

Fig. 5 Specific flowchart of the evaluation

设有 m 个样本,n 个评价指标,可以构成数据矩阵 $\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{m\times n}$,其中,$m$ 为样本数量,n 为评价指标数量,x_{ij}表示样本 i 第 j 个指标的数值,$\boldsymbol{x}_j$ 表示所有样本的第 j 个指标组成的数值向量. 数据经过标准化处理过后,矩阵内元素为 x'_{ij},经过规范化处理后的矩阵为 $\boldsymbol{X}'=(x'_{ij})_{m\times n}$. 设样本数为 5,评价指标 7 个,为了消除量纲和数量级的影响,结合指标性质,对指标进行正向和负向处理,其中定义系统能量利用率、节能率、系统绿色化程度和单位产品成本降幅为正向指标,简单回收期、年化总成本和单位产品排放强度为负向指标. 对于正向指标和负向指标的处理,熵值法和 CRITIC 权重法相同.

对于正向指标 x'_{ij}为,

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(\boldsymbol{x}_j)}{\max(\boldsymbol{x}_j)-\min(\boldsymbol{x}_j)}, \tag{47}$$

对于负向指标 x'_{ij}为,

$$x'_{ij}=\frac{\max(\boldsymbol{x}_j)-x_{ij}}{\max(\boldsymbol{x}_j)-\min(\boldsymbol{x}_j)}. \tag{48}$$

2.2.2 基于熵值法的客观权重计算

熵值法是依托信息熵理论构建的客观赋权方法[23],其具体计算步骤如下:

(1)计算第 j 项指标,计算个方案的比重 P_{ij},

$$P_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}x_{ij}}. \tag{49}$$

(2)计算第 j 项指标的熵值 e_j,

$$e_j=-K\times\sum_{i=1}^{m}(P_{ij}\times\ln(P_{ij})). \tag{50}$$

式中:$K=\frac{1}{\ln(m)}$.

(3)计算第 j 项指标的差异系数 d_j(某一指标的信息效用由其信息熵 e_j 与 1 的差值决定,该数值直接决定权重大小. 信息效用值越高,表明该指标对评价结果越重要,相应权重也越大),

$$d_j = 1 - e_j. \tag{51}$$

(4)计算第 j 项指标的权重 ω_j^1(采用熵值法确定指标权重,本质上是依据指标信息的差异系数进行核算,差异系数越高,表明该指标对综合评价的贡献程度越大),

$$\omega_j^1 = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j}. \tag{52}$$

2.2.3　基于 CRITIC 权重法的客观权重计算

CRITIC 权重法[24]是一种兼顾指标对比强度与指标间冲突性的客观赋权方法,计算流程如下:

(1)计算第 j 项指标的对比强度 σ_j,

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(x'_{ij} - \bar{x}'_{ij})^2}. \tag{53}$$

式中:$\bar{x}'_{ij} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x'_{ij}$为指标 j 的均值.

(2)对与每对指标 j_1 和 j_2,计算其相关系数,

$$\rho_{j_1 j_2} = \frac{\sum_{i=1}^{m}(x'_{ij_1} - x'_{j_1})(x'_{ij_2} - x'_{j_2})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(x'_{ij_1} - x'_{j_1})^2 \sum_{i=1}^{m}(x'_{ij_2} - x'_{j_2})^2}}. \tag{54}$$

(3)计算评价指标之间的冲突性 f_i,

$$f_i = \sum_{i=1}^{m}(1 - \rho_{j_1 j_2}). \tag{55}$$

式中:$\rho_{j_1 j_2}$为指标 j_1 与指标 j_2 之间的相关系数,采用皮尔逊相关系数.

(4)计算信息承载量 c_j,

$$c_j = \sigma_j \times f_j. \tag{56}$$

(5)计算权重 ω_j^2,

$$\omega_j^2 = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^{n} c_j}. \tag{57}$$

2.2.4　拉格朗日乘子法综合权重

使用 Lagrange 乘子法[25]将熵值法和 CRITIC 权重计算方法结合得到综合权重 ω_j,

$$\omega_j = \frac{\sqrt{\omega_j^1 \omega_j^2}}{\sum_{j=1}^{n}\sqrt{\omega_j^1 \omega_j^2}}. \tag{58}$$

2.2.5　基于 VIKOR 法的系统综合评估及计算

在多指标评估研究中,VIKOR 法是一种基于妥协解的指标排序方法. 该方法通过引入群体效应值和个体遗憾值,综合考虑评估对象与正理想解的多维度关系,而非简单距离比较,从而获得指标间相互妥协的折中解. 其核心在于结合权重分配与利益比率值,实现方案的优化排序[26].

首先,设 5 个方案的集合为 $Y_i = (i = 1, 2, \cdots, 5)$,组成方案集 $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5)$;式(57)-(58)进行数据规范化处理,确定正理想解为 x'^{+}、负理想解为 x'^{-}.

其次,计算最大化群体效益 S_i、最小化个体损失 R_i 和综合值 Q_i,

$$S_i = \sum_{i}^{m} \omega_j \times \left(\frac{x'^{+}_j - x'_{ij}}{x'^{+}_j - x'^{+}_j}\right), \tag{59}$$

$$R_i=\max_{1\leqslant j\leqslant n}\left(\omega_j\times\frac{x'^{+}_j-x'_{ij}}{x'^{+}_j-x'^{+}_j}\right),\tag{60}$$

$$Q_i=\eta\frac{S_i-S^{+}}{S^{+}-S^{-}}+(1-\eta)\frac{R_i-R^{+}}{R^{+}-R^{-}}.\tag{61}$$

式中:x_j^{+},x_j^{-} 分别为 j 的正、负理想解;S 为群体效用值;S^{+}、S^{-}分别为群体效益的最大值、最小值,其值越小越好;R 为个体遗憾值;R^{+}、R^{-}分别为个体遗憾值的最大值、最小值,其值越小越好;η 为最大化群体效益和最小化个体损失之间的决策机制系数,其取值范围满足 $0\leqslant\eta\leqslant1$.

然后,根据综合值 Q_i 从小到大进行排序,并以最大化群体效益 S_i 和最小化个体损失 R_i 的排序结果进行校验. Q_i 数值越小方案越优,反之则越劣. 将基于 Q_i 的排序结果为 Y_i,对于 Q_i 最小的方案 Y_i,备选方案的最终排序可依据下列两个条件确定:

① $$Q(Y_2)-Q(Y_1)\geqslant\frac{1}{m-1};\tag{62}$$

②决策过程中可接受的稳定性条件:方案 Y_1 的 S_i 或 R_i 也为最优的方案.

判据中,$Q(Y_1)$,$Q(Y_2)$分别为综合值 Q_i 的排序结果前两个最小方案 Y_1 和 Y_2 的综合值. 若条件①和②同时成立,则 Y_1 为最佳妥协解;若仅满足条件①而不满足条件②,最佳妥协解可从排序结果 Y_i 中任意选取,其中排名最后的 Y_m 应满足式(62),

$$Q(Y_m)-Q(Y_1)\geqslant\frac{1}{m-1}.\tag{63}$$

若仅满足条件②而不满足条件①,最佳妥协解为 Y_1 或 Y_2 中任意一个.

3 面向氯碱化工氢-光-储源荷协同能源系统分析

采用提出的源荷协同能源系统综合评价方法,对表 1 中各类源荷协同能源系统进行综合评价分析.

3.1 源荷能源系统模型验证

针对 S1 光-电耦合 & 源荷协同系统(主要设备包括:氯碱电解槽、光伏及网电系统),对比分析模型计算获得的光伏输出功率输出值与工厂实际运行值. 图 6 为某年一月份的光伏输出功率的理论输出值与工厂实际运行值变化图,两者之间的平均绝对百分比误差为 3.53%. 考虑计算所需要的各类查表数据、太阳辐照度测量结果的精确性等因素的影响,理论输出值与实际运行值在误差的允许范围内基本吻合,即所建立的模型能够较为准确地反映实际系统的运行特性,具有较高的可靠性.

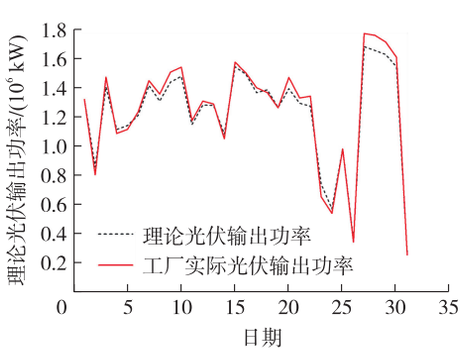


图 6 一月份每天光伏输出功率对比图

Fig. 6 Comparison diagram of daily photovoltaic output power in January

3.2 不同源荷协同能源系统方案评价指标对比分析

根据氯碱工厂的实际运行数据及建模计算相关数据,由上文计算公式,得到不同方案二级指标结果如表 4 所示.

表 4 不同方案二级指标结果

Table 4 Results of secondary indicators for different programmes

方案	能源效益指标		经济效益指标			环境效益指标	
	系统能量利用率/%	节能率/%	简单回收期/年	单位产品成本降幅/%	年化总成本/(元/年)	单位产品排放强度/(tCO_2/tNaOH)	系统绿色化程度/%
S1	76.1	23.4	6.154	21.3	16 752.285	1.445	32.0
S2	79.7	26.4	6.334	25.3	16 306.722	1.389	36.8
S3	80.2	31.3	4.867	31.1	15 324.463	1.296	44.8
S4	79.7	24.5	6.714	26.9	16 256.547	1.425	35.9
S5	80.0	30.4	5.199	33.4	15 135.235	1.313	44.2

对表 4 中各指标进行标准化处理后,采用两种客观赋权方法确定初始权重(各指标所占权重之和为 1),并通过拉格朗日乘子法构建组合权重,以减小单一赋权方法带来的计算偏差,获得更科学合理的权重分配,

如表 5 所示.

表 5　指标权重计算结果

Table 5　Results of the calculation of indicator weights

方案	能源效益指标		经济效益指标			环境效益指标	
	系统能量利用率	节能率	简单回收期	单位产品成本降幅	年化总成本	单位产品排放强度	系统绿色化程度
熵值法权重	0.090	0.168	0.160	0.124	0.149	0.170	0.139
CRITIC 权重法权重	0.313	0.092	0.228	0.109	0.088	0.093	0.076
拉格朗日乘子法组合权重	0.178	0.132	0.202	0.123	0.122	0.134	0.109

3.3　各源荷协同能源系统基于组合赋权-VIKOR 综合评价方法对比分析

基于表 5 的二级指标权重,采用 VIKOR 法计算各方案的群体效用值和个体遗憾值,并确定其最优与最劣值,如表 6 所示. 设定决策机制系数 $\eta=0.5$,均衡最大群体效用与最小个体遗憾的影响. 结合拉格朗日乘子法确定的组合权重,计算各方案的利益比率值,如表 7 所示,最终排序结果为:S4>S2>S3>S5>S1.

S4 系统整合了光伏、氢储罐、燃气轮机、电化学储能和余热锅炉,通过燃气轮机燃氢发电并利用余热锅炉降低蒸汽消耗,在能源、经济及环境指标上表现最优. S2 系统结构与 S4 相似但缺少电化学储能,应对短期电力波动能力较弱;S3 和 S5 分别对应 S2 和 S4 的架构但采用燃料电池替代燃气轮机,其能量利用率、年化成本及绿色化程度等指标均逊于燃气轮机方案. 燃料电池虽具转换效率高和零排放优势,但受限于高初始成本、严苛氢气纯度要求、动态响应不足及维护成本高等缺点,仅适用于低负载稳定场景. 燃气轮机凭借成熟技术、快速响应、低氢气纯度适应性及规模化优势,更符合综合能源系统对灵活性与稳定性的需求. S1 系统因缺乏储能和备用电源,综合性能最差. 研究表明,储能系统、储氢设备及和能源多样性是提升系统性能的关键因素.

表 6　不同方案的群体效用值和个体遗憾值

Table 6　Group utility values and individual regret values for different programmes

S^+	S^-	R^+	R^-	决策机制系数 η
0.232	0.963	0.122	0.202	0.5

表 7　不同方案的多准则妥协解排序法计算结果

Table 7　VIKOR method calculations for different scenarios

方案	S	R	Q	排序
S1	0.963	0.202	1.000	5
S2	0.556	0.135	0.304	2
S3	0.232	0.178	0.350	3
S4	0.617	0.122	0.263	1
S5	0.233	0.178	0.351	4

3.4　基于组合赋权-VIKOR 法的适用性

该方法通过熵值法与 CRITIC 法组合赋权,有效剔除主观因素对评价结果的干扰,根据客观数据计算各指标权重,有效平衡多维度指标权重,避免单一赋权偏差,能够有效处理涉及多种能量、储能等多要素耦合的能源系统. VIKOR 法通过折衷排序处理多目标冲突,为储能配置、氢能调度等决策提供优劣解,尤其适合光伏出力波动与负荷动态变化场景,也可通过调整决策系数适配企业风险偏好. 尽管需依赖一定数据基础,但通过引入动态权重调整和行业特色指标,该方法能够精准支持不同能源系统转型的规划与优化.

4　结论

本文针对现有的典型氯碱化工生产-供能系统进行改造,引入光伏阵列、燃氢燃气轮机、余热锅炉、电化学储能电池、储氢罐、吸附式制冷机和吸收式制冷机. 通过理论建模和综合评价计算对面向氯碱化工的氢-光-储源荷协同能源系统进行研究,得出如下结论:

(1)面向氯碱化工的氢-光-储源荷协同能源系统建模,经与实际工厂运行值对比,平均绝对百分比误差为 3.53%,理论输出值与实际运行值在允许误差范围内基本吻合,即所建立的模型能够较为准确地反映实际系统的运行特性,具有较高的可靠性.

(2)本文提出了一种基于组合赋权-VIKOR 法的氢-光-储源荷协同能源系统综合评价方法. 采用熵值法与 CRITIC 法相结合的方式确定客观权重,兼顾指标离散程度与指标间关联性,并运用拉格朗日乘子法实现权重的优化配置. 针对决策过程中存在的偏好模糊性和指标冲突问题,引入 VIKOR 法进行综合评估,基于最大群体效用和最小个体遗憾原则获得最优折中解. 结果表明,S4(包含电解槽、光伏、储氢罐等设备)为最优方案,为实际工程建设提供了决策依据.

[参考文献](References)

[1] 张培超. 2023 年中国氯碱行业经济运行分析及 2024 年展望[J]. 中国氯碱,2024(1):1-5.

[2] 赵涛,闫海清,苏青福. 基于 AHP-FCE 的氯碱化工生态工业园综合评价[J]. 科学技术与工程,2011,11(4):89-93.

[3] 冯晓梅,张瑞雪,李骥,等. 建筑多能源系统优化评价方法研究[J]. 建筑节能,2020,48(11):45-50.

[4] Prayogo B, Yudisaputro H, Kurniawan A. Enhancing renewable energy integration: A hybrid AHP-TOPSIS approach for optimal inverter selection in solar PV and wind turbine systems[C]//2023 IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids. Wollongong, Australia, 2023. 2023:1-10.

[5] Georgiou D, Mohammed E S, Rozakis S. Multi-criteria decision making on the energy supply configuration of autonomous desalination units[J]. Renewable Energy, 2015, 75:459-467.

[6] Wei C, Qiu Y F, Chen J F, et al. Research on energy efficiency evaluation of independent integrated energy system[C]//2019 IEEE 3rd Internation Electrical and Energy Conference. Beijing, China, 2019.

[7] Chen B, Liao Q, Liu D, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):174-182.

[8] Peng J, Han Y J, Wang W, et al. Evaluation model of integrated energy efficiency for power users[C]//2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference. Xi'an, China, IEEE, 2018.

[9] Ren H B, Gao W J, Zhou W S, et al. Multi-criteria evaluation for the optimal adoption of distributed residential energy systems in Japan[J]. Energy Policy, 2009, 37(12):5484-5493.

[10] Wang X, Teichgraeber H, Palazoglu A, et al. An economic receding horizon optimization approach for energy management in the chlor-alkali process with hybrid renewable energy generation[J]. Journal of Process Control, 2014, 24(8):1318-1327.

[11] 李想. 基于氯碱化工的多能互补能量系统优化与调控方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2024.

[12] Ulleberg O. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 8(1):21-33.

[13] Petrollese M, Cocco D. Optimal design of a hybrid CSP-PV plant for achieving the full dispatchability of solar energy power plants[J]. Solar Energy, 2016, 137:477-489.

[14] Duffie J, Beckman W. Solar engineering of thermal processes[J]. American Journal of Physics, 1985:129469958.

[15] 唐鑫,钱奕然,陈伟雄,等. 空气布雷顿循环系统不同构型参数分析及优化[J]. 中国电机工程学报,2023,43(21):8344-8356.

[16] Ma T, Javed M S. Integrated sizing of hybrid PV-wind-battery system for remote island considering the saturation of each renewable energy resource[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182:178-190.

[17] Ramdin M, Morrison A, Groen M D, et al. High pressure electrochemical reduction of CO_2 to formic acid/formate: Effect of pH on the downstream separation process and economics[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(51):22718-22740.

[18] Li Z, Xu Y. Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes[J]. Applied Energy, 2018, 210:974-986.

[19] Acakpovi A, Adjei P, Nwulu N, et al. Optimal hybrid renewable energy system: A comparative study of wind/hydrogen/fuel-cell and wind/battery storage[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2020:1756503.

[20] Huang Z F, Chen W D, Wan Y D, et al. Techno-economic comparison of different energy storage configurations for renewable energy combined cooling heating and power system[J]. Applied Energy, 2024, 356:122340.

[21] Liu Z M, Lim M Q, Kraft M, et al. Simultaneous design and operation optimization of renewable combined cooling heating and power systems[J]. AIChE Journal, 2020, 66(12):17039-17057.

[22] 李想,辛宇,邢学利,等. 光电互补的氯碱化工与冷热电氢多联供系统热力学分析及优化[J]. 动力工程学报,2024,44(8):1278-1286.

[23] 孟明,罗洋. 基于 AHP-熵权法的综合能源系统多指标评价[J]. 电力科学与工程,2021,37(5):46-54.

[24] 张振,李炬添,毕书奇,等. 基于改进 CRITIC 熵权组合赋权法的海上风电系统规划综合评价方法[J]. 电工电能新技术,2024,43(11):1-10.

[25] 钱俊杰,李昊泉,李广华,等. 基于组合赋权-VIKOR 的电能质量综合评估[J]. 电气传动,2024,54(6):37-44.

[26] 罗凤娥,卫昌波,杨思瀚,等. 基于组合赋权-VIKOR 法的航班恢复策略评估方法[J]. 舰船电子工程,2024,44(10):109-113.

[责任编辑:陈　庆]