

天然气压力能发电-制冰利用及运行效益评估研究

李茜¹, 徐璐^{1*}, 杨威¹, 张安安¹, 林冬², 廖长江^{1,3}

- 西南石油大学电气信息学院, 四川省 成都市 610500;
- 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司, 四川省 成都市 610051;
- 成都岷山绿氢能源有限公司, 四川省 成都市 611730)

Study on Utilization of Natural Gas Pressure Energy for Power Generation Ice Making and Operation Benefit Evaluation

LI Qian¹, XU Lu^{1*}, YANG Wei¹, ZHANG An'an¹, LIN Dong², LIAO Changjiang^{1,3}

- School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan Province, China;
- Southwest Oil & Gas Field Branch of Petro China Co., Ltd., Chengdu 610051, Sichuan Province, China;
- Chengdu Minshan Hydrenergy Co., Ltd., Chengdu 611730, Sichuan Province, China)

Abstract: Natural gas pressure energy is an emerging clean energy source, and its efficient utilization is an effective means to save energy and reduce carbon emissions. At present, there are problems in the recycling and utilization of natural gas pressure energy, such as a single energy consumption mode, one-sided evaluation indicators, and a lack of evaluation methods, which have led to the low utilization rate of natural gas pressure energy, insufficient operational efficiency and system accuracy, and hindered the development of the industry. Firstly, a comprehensive utilization plan for natural gas pressure energy was proposed, using a turbine expander to recover pressure energy for power generation. The cold energy generated during the pressure reduction process was used for ice making, and a solar hot water system was added to increase the outlet gas temperature, improving energy utilization efficiency. Secondly, based on the exergy analysis model and considering the economic and environmental aspects, a pressure energy utilization system operating efficiency evaluation index system was constructed to comprehensively and comprehensively evaluate the operating status of the system. Then, a comprehensive evaluation model using Analytic Hierarchy Process and Anti Entropy Weight Method was established to solve the problems of mutual influence and cross meanings between indicators, and improve the accuracy of

indicator weight judgment. Finally, through the evaluation of the case of the pressure regulating station, it can be concluded that the station mainly faces problems such as a high device failure rate, poor system stability, and insignificant economic benefits during operation. The evaluation results verify the effectiveness of the evaluation method and provide theoretical support for optimizing the operation of pressure energy utilization systems.

Keywords: natural gas pressure energy; comprehensive utilization; cold energy to produce ice; multidimensional benefit assessment; indicator system; combine to determine weights

摘要: 天然气压力能是一种新兴清洁能源, 对其进行高效利用是节约能源、降低碳排放的有效手段。目前, 天然气压力能回收利用中存在用能模式单一、评估指标片面以及评估方法缺乏等问题, 导致天然气压力能利用率低, 运行效益和系统不足无法被准确评估, 行业发展受阻。首先, 提出了天然气压力能综合利用方案, 使用透平膨胀机回收压力能发电, 降压过程中产生的冷能用于制冰, 并加入太阳能热水系统提高出站气温度, 提高能源利用效率。其次, 基于焓分析模型并考虑经济性和环保性构建了压力能利用系统运行效益评估指标体系, 对系统的运行状态进行全面、综合的评估。然后, 建立了层次分析法-反熵权法综合评价模型, 解决了指标之间相互影响、含义交叉的问题, 提高了指标权重的判断精度。最后, 通过对案例调压站评估可得, 该调压站在运行中主要存在装置故障率高、系统稳定性差以及经济效益不显著等问题, 评估结果验证了评估方法的有效性, 为压力能利用系统的运行优化提供了理论支撑。

关键词: 天然气压力能; 综合利用; 冷能制冰; 运行效益评估; 指标体系; 组合赋权

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(21ZYZYTS0038); 四川省科技计划项目(2020YFSY0037, 22ZDYF2912)。

Central Government Fund for Guiding Local Scientific and Technological Development of China (21ZYZYTS0038); Sichuan Science and Technology Program (2020YFSY0037, 22ZDYF2912).

0 引言

随着国家对减少碳排放的日益重视以及能源需求的不断增长, 天然气因其清洁高效的特性, 使用占比在中国的能源结构中不断提高。根据《中国天然气发展报告(2022)》^[1], 全国天然气管道总里程达到约11.6万km。国际能源署预测, 到2040年, 全球天然气需求量将增长50%^[2]。天然气一般采用高压、大口径的长输管道进行运输, 在送到终端用户之前需要在天然气门站进行降压处理, 其间蕴含大量的压力能可被回收利用。以西气东输Ⅱ线为例, 输气量按300亿m³/a计算, 当天然气压力从8.0 MPa降至0.4 MPa时, 每年可回收能量45.6亿kWh^[3]。因此, 如何将天然气管网中蕴含的压力能进行高效利用, 如何评价天然气压力能(natural gas pressure energy, NGPE)综合利用系统的运行效益, 对推进碳达峰碳中和(简称“双碳”目标)实现、提高能源的利用效率具有重要意义。

目前, 国内外已有学者对压力能的回收利用方式进行了探索。为了利用储气库的压力能, 文献[4-5]分析了透平膨胀机在高压场景下发电的可行性, 并研究了富余电量的消纳方式。文献[6]结合发电厂的余热回收和燃气轮机进气冷却技术, 提出了3种发电方式。文献[7-8]对小型天然气调压站管网压力能的发电问题进行了研究, 并提出了1种发电自用方案来解决调压站的用电问题。针对天然气降压过程中的冷能回收问题, 文献[9-10]提出将冷能用于制备液化天然气(liquefied natural gas, LNG)、储气调峰和低温橡胶粉碎等领域, 降低了天然气温度过低导致的管道损害风险。文献[11]提出了燃气蒸汽联合循环发电方案, 天然气在膨胀机中降压并驱动压气机工作, 降压后的低温天然气用于冷却空气, 该方案在提高系统发电量的同时实现了能源的循环利用。以上研究中压力能的利用方式单一, 只考虑了某一特定场景, 未对天然气降压过程中产生的压力能和冷能进行有效的综合利用, 方案缺乏可行性, 系统总体能量利用率不高。

NGPE回收利用系统建设涉及与原天然气调压、计量系统以及电力系统的驳接问题, 此外还要考虑项目的投资收益以及后期的运行维护等问题。因此, 全面科学地评价NGPE利用系统的运行效益, 对于正确指导NGPE利用过程中的规划、运行和管理问题具有重要意义。现阶段关于压力能利用效益评估的研究还

存在如下2方面的问题。一是评估指标片面。受限于压力能利用系统的发展进程, 目前对于评估指标体系的研究多针对于综合能源系统^[12-17], 压力能利用方面的评估研究较少, 且指标大多关注压力能利用过程的单一环节^[18-20], 对系统的设备性能、运行效益及其他衍生效益缺乏整体性分析。例如, 文献[21]考虑电解槽的大修时间, 分析了NGPE发电用于电解水制氢的经济性, 对系统的设备效率和环境效益未做分析。二是评估方法单一。只采用基本的层次分析法等单一方法^[22-25]得到的指标权重未考虑系统的运行特性, 且具有较强的主观性, 评估结果无法准确反映NGPE利用系统的实际运行状况。

针对上述问题, 本文基于传统调压站, 考虑高压天然气降压过程中的能量转化形式、调压站地理特性以及能量的空间转移特性, 利用透平膨胀机回收压力能发电, 利用乙二醇与降压后的低温天然气换热, 然后采用盐水制冰法二次换热回收冷能制冰, 并通过太阳能热水系统对仍有可用冷能的出口天然气预加热, 同时对制冰原水进行初步冷却, 实现NGPE发电-制冰应用一体化。然后考虑能量转化效率、设备故障影响、发电-制冰效益以及压力能回收利用对减少碳排放的贡献等因素, 从产能效率、设备运行、经济效益 and 环境保护4个方面提出NGPE利用系统运行效益评估指标体系, 并采用层次分析法(analysis hierarchy process, AHP)-反熵权法计算指标权重, 结合指标特性和最小二乘拟合法建立了NGPE综合评价模型。最后, 通过西南地区某天然气调压站的算例分析验证了该评估方法对于反映系统运行状态的有效性。全文结构如图1所示。

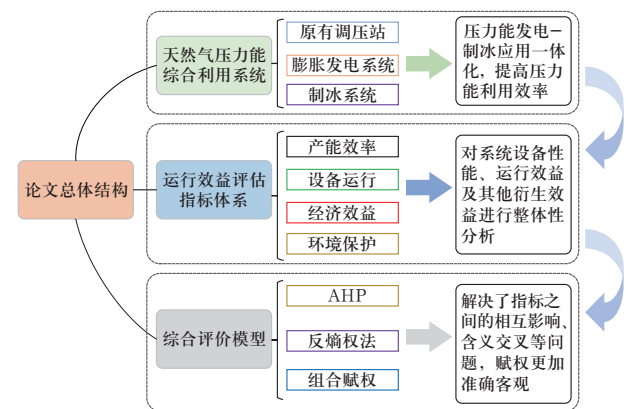


图1 论文总体结构

Fig. 1 Overall structure of the paper

1 NGPE综合利用系统及潜力评估模型

相比于其他的冷能利用方式,回收冷能制取冰块能够实现方便快捷的存储、运输和使用冷能。根据调研,冰块具有丰富的市场需求,可广泛用于食品保鲜、库房保温以及物流运输等领域,可以带来较为可观的经济收益。因此,为了使高压管网天然气在降压过程中释放的能量得到充分利用,提高能量的利用效率,同时避免天然气因降压急剧降温对管网和设备造成损害,本文设计了一种NGPE发电-制冰一体化应用系统,其工艺流程如图2所示。

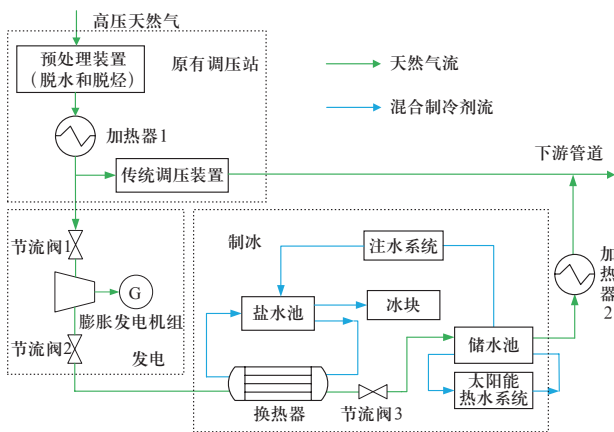


图2 NGPE发电-制冰工艺流程图

Fig. 2 NGPE power generation – ice making process

1.1 传统调压站

传统的天然气调压站通常采用等焓节流的方式,调压装置由预处理装置(脱水和脱烃)、预热装置以及节流阀等构成^[26]。

气井开采出的天然气在进入高压管网运输之前会进行粗处理,去除天然气中的水、硫化氢和二氧化碳等大部分杂质。高压天然气进入调压站降压处理之前还需要经过脱水脱烃装置,目的是防止天然气经过绝热节流后水和烃的温度降低到自身露点以下,形成天然气水合物,影响运行安全。经加热的天然气通过节流阀降压处理后进入下游管网。

1.2 压力能发电系统

从传统调压管网引出一支路,脱除重烃与水分的天然气先通过节流稳压阀进行稳压,使膨胀机入口的前压力保持稳定。稳压后的天然气进入透平膨胀机,天然气体积膨胀释放压力能并推动膨胀机转动,完成

压力能向机械能的转化。最后通过齿轮箱、联轴器等装置将机械能传递给发电机,带动同轴发电机发电。

1.3 冷能制冰系统

根据热力学定律,天然气在透平膨胀机内通过绝热膨胀($Q=0$)的方式对外做功($W>0$)时,其自身的热力学能减少($\Delta U<0$)^[27],从而温度下降产生冷能。本方案采用盐水制冰法对冷能进行回收利用。膨胀降温后的低温天然气进入换热器中与乙二醇(50%)进行换热,换热后的乙二醇温度降至 $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,天然气温度升至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,温度降低的乙二醇为盐水池中的盐水(NaCl , 29.4%)持续提供冷量,使盐水池中的盐水始终维持 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的温度。换热升温后的天然气仍携带部分冷能可供利用,将其与储水池中的制冰原水进行换热,换热后水温降至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,天然气温度升至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。储水池中的制冰原水经过注水系统与冷盐水换热,水温降低形成冰块,天然气冷能回收利用完成。由于天然气出站温度需要高于管网运行标准要求的供气温度($>5\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[28],因此在经储水池换热时,利用太阳能热水系统对天然气进行初步加热(同时对制冰原水进行预冷),再经加热器2加热后方可进入下游管网。

1.4 压力能利用潜力焓分析模型

本文采用焓分析法评估天然气调压站可利用的压力能,同时计算压力能利用系统的机组效率。管输高压天然气的能量主要有2种形式,即势能和动能,分别由压力和温度来体现。若将膨胀机视为一个开口系统,天然气的比焓焓由比温度焓和比压力焓组成^[29],可由下式表示:

$$e_{x,h} = e_{x,T} + e_{x,p} \quad (1)$$

$$e_{x,T} = h_{ng}^{\text{tein}} - h_{ng}^{\text{teout}} - T_0 c_p \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (2)$$

$$e_{x,p} = T_0 R_g \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (3)$$

式中: $e_{x,h}$ 为天然气的比焓焓, kJ/kg ; $e_{x,T}$ 为天然气的比温度焓, kJ/kg ; $e_{x,p}$ 为天然气的比压力焓, kJ/kg ; h_{ng}^{tein} 、 h_{ng}^{teout} 分别为天然气进、出口比焓, kJ/kg ; T_0 为环境温度, K ; c_p 为天然气比定压热容, $\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$; T_1 、 T_2 分别为天然气进、出口温度, K ; R_g 为天然气气体常数, $\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$; p_1 、 p_2 分别为天然气进、出口绝对压力, MPa 。

2 NGPE综合利用系统运行效益评估指标

本文从产能效率、设备运行、经济效益和环境保护4个方面建立评估指标体系,对NGPE利用系统运行效益进行综合评价。评估指标体系结构如图3所示。

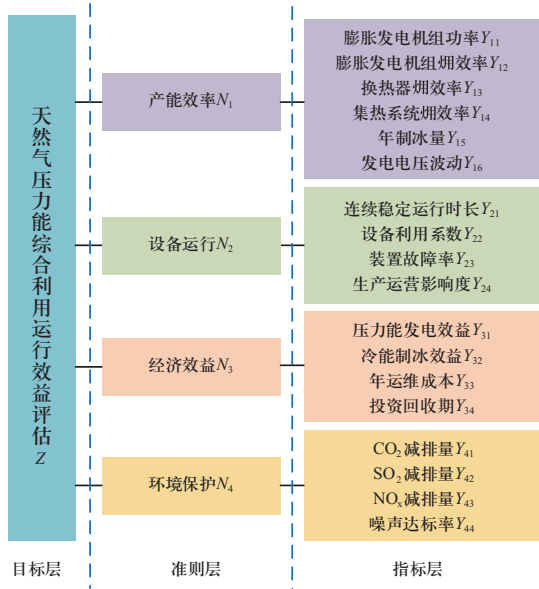


图3 NGPE运行效益评估指标体系

Fig. 3 NGPE operation benefit evaluation index system

2.1 产能效率指标

产能效率指标主要考核发电和制冰的产量、各主要设备的能量转化效率,对衡量NGPE利用系统的建设水平具有重要意义。

1) 膨胀发电机组功率。

膨胀机组的发电性能易受天然气压力、流量和温度等因素波动的影响。计算公式如下^[30]:

$$P_{te} = \frac{Q}{3600} \cdot \rho \cdot C_p \cdot T \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \eta_T \cdot \eta_g \quad (4)$$

式中: P_{te} 为膨胀发电机组功率, kW; Q 为天然气小时流量, Nm³/h; ρ 为天然气密度, kg/m³; C_p 为天然气质量等压比热容 kJ/(kg·k); T 为天然气入口温度, K; P_1 为天然气入口绝对压力, MPa; P_2 为天然气出口绝对压力, MPa; k 为天然气绝热指数; η_T 为膨胀机效率; η_g 为发电机效率。

2) 膨胀发电机组焓效率。

该指标用于评估膨胀发电机组将高压天然气携带的压力能转化为电能的水平。利用焓分析模型可得计算公式如下:

$$\nu_{pe} = \frac{P_{te}}{\zeta_{ng} [(h_{ng}^{tein} - h_{ng}^{es}) - T_0 (s_{ng}^{teout} - s_{ng}^{es})]} \quad (5)$$

式中: ν_{pe} 为膨胀发电机组焓效率; ζ_{ng} 为天然气质量流量, kg/s; h_{ng}^{tein} 、 h_{ng}^{es} 分别为天然气在膨胀机进口和环境状态下的比焓, kJ/kg; T_0 为环境温度, K; s_{ng}^{teout} 、 s_{ng}^{es} 分别为膨胀机出口和环境状态下天然气的比焓, kJ/(kg·K)。

3) 换热器焓效率。

该指标用于评估换热器对降压后的天然气携带的冷量的回收能力。计算公式如下:

$$\nu_{he} = \frac{E_{he}^{out} - E_{te}^{out}}{E_{eg}^{in} - E_{eg}^{out}} \quad (6)$$

$$E_{he}^{out} = \zeta_{ng} [(h_{ng}^{heout} - h_{ng}^{es}) - T_0 (s_{ng}^{heout} - s_{ng}^{es})] \quad (7)$$

$$E_{te}^{out} = \zeta_{ng} [(h_{ng}^{teout} - h_{ng}^{es}) - T_0 (s_{ng}^{teout} - s_{ng}^{es})] \quad (8)$$

$$E_{eg}^{in} = \zeta_{eg} [(h_{eg}^{in} - h_{eg}^{es}) - T_0 (s_{eg}^{in} - s_{eg}^{es})] \quad (9)$$

$$E_{eg}^{out} = \zeta_{eg} [(h_{eg}^{out} - h_{eg}^{es}) - T_0 (s_{eg}^{out} - s_{eg}^{es})] \quad (10)$$

式中: ν_{he} 为换热器的焓效率; E_{he}^{out} 、 E_{te}^{out} 分别为换热器出口和膨胀机出口天然气的焓, kW; E_{eg}^{in} 、 E_{eg}^{out} 分别为进、出换热器的乙二醇的焓, kW; h_{ng}^{heout} 为换热器出口天然气的比焓, kJ/kg; s_{ng}^{heout} 为换热器出口天然气的比焓, kJ/(kg·K); ζ_{eg} 为乙二醇的质量流量, kg/s; h_{eg}^{in} 、 h_{eg}^{out} 分别为换热器进、出口乙二醇的比焓, kJ/kg; s_{eg}^{in} 、 s_{eg}^{out} 分别为换热器进、出口乙二醇的比焓, kJ/(kg·K)。

4) 集热系统焓效率。

太阳能集热系统通过集热器利用太阳辐射对水加热的焓效率^[18]可由下式表示:

$$\nu_{sc} = \frac{E_{sc}^{out} - E_{hr}^{out}}{E_{sc}^{in}} \quad (11)$$

$$E_{sc}^{out} = \zeta_{wa} [(h_{wa}^{out} - h_{wa}^{es}) - T_0 (s_{wa}^{out} - s_{wa}^{es})] \quad (12)$$

$$E_{hr}^{out} = \zeta_{wa} [(h_{hr}^{out} - h_{wa}^{es}) - T_0 (s_{hr}^{out} - s_{wa}^{es})] \quad (13)$$

$$E_{sc}^{in} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{sc}} \right) \cdot I_{sr} \cdot B_{oa} \quad (14)$$

式中: ν_{sc} 为集热系统焓效率; E_{sc}^{out} 为集热系统出水的焓, kW; E_{hr}^{out} 为储水池出水的焓, kW; E_{sc}^{in} 为集热器集热焓; ζ_{wa} 为水的质量流量, kg/s; h_{wa}^{out} 、 h_{hr}^{out} 和 h_{wa}^{es} 分别为储水池出口、集热系统出口和环境状态下水的比焓, kJ/kg; s_{wa}^{out} 、 s_{hr}^{out} 和 s_{wa}^{es} 分别为储水池出口、集热系统出口和环境状态下水的比焓, kJ/(kg·K); T_{sc} 为太阳辐射温度, K; B_{oa} 为集热器有效受光面积, m²; I_{sr} 为太阳辐射强度, kW/m²。

5) 年制冰量。

$$L_{\text{im}} = l_{\text{im}}^{\text{cd}} \cdot t_{\text{im}} \cdot \lambda_{\text{im}} \quad (15)$$

式中: L_{im} 为系统年制冰量, t_{im} ; $l_{\text{im}}^{\text{cd}}$ 为单日制冰能力, t/d ; t_{im} 为一年中制冰系统的工作时间, d ; λ_{im} 为制冰系统中冰块除去运输等损耗后的留存率。

6) 发电电压波动。

$$\varepsilon_{\text{um}} = \frac{U_{\text{t}}^{\text{op}} - U_{\text{t}}^{\text{st}}}{U_{\text{t}}^{\text{st}}} \times 100\% \quad (16)$$

式中: ε_{um} 为电压波动幅度; U_{t}^{op} 、 U_{t}^{st} 分别为实际电压和额定电压, V 。

2.2 设备运行指标

受气源波动和负荷变化的影响, 天然气的压力、流量时刻变化, 在压力能利用时对设备的运行带来挑战, 利用连续稳定运行时长等指标可以对设备的可靠性进行评价。

1) 设备利用系数。

设备利用系数指系统投运后设备的实际工作时间与理论工作时间的比值。计算公式如下:

$$\nu_{\text{eo}} = \frac{1}{nt_{\text{d}}} \sum_{i=1}^n t_i \quad (17)$$

式中: ν_{eo} 为设备利用系数; n 为压力能回收利用核心设备数量; t_{d} 为单台设备的计划工作时长, d ; t_i 为第 i 台设备的实际工作时间, d 。

2) 装置故障率。

$$\psi_{\text{df}} = \frac{T_{\text{fs}}}{T_{\text{pw}}} \times 100\% \quad (18)$$

式中: ψ_{df} 为装置故障率; T_{fs} 为故障造成的停机时间, d ; T_{pw} 为系统计划工作时间, d 。

3) 生产运营影响度。

生产运营影响度 ($\sigma \in (0,1)$) 用于评估压差发电系统接入后由于存在密封、加热、气体带液以及与原系统驳接等问题, 对正常油气生产中的安全性、运维工作量等方面产生的影响。取值范围如表1所示。

表1 生产运营影响度

Table 1 Impact degree of production and operation

σ	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.7	>0.7
影响度	基本无影响	影响较小	有一定影响	影响较大

2.3 经济效益指标

NGPE回收利用系统涉及到对原有管道的投资改造, 因此成本回收期 and 改造后的经济效果评估尤为

重要。

1) 压力能发电效益。

压力能发电效益包含电能场站自用节省电费和余电上网售电收益两部分。计算公式如下:

$$M_{\text{ne}} = A_{\text{og}} P_{\text{te}}^{\text{su}} + A_{\text{ug}} P_{\text{te}}^{\text{sp}} \quad (19)$$

式中: M_{ne} 为压力能发电经济效益, 元; A_{og} 、 A_{ug} 分别表示场用电下网电价和压差发电余电上网电价, 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); $P_{\text{te}}^{\text{su}}$ 、 $P_{\text{te}}^{\text{sp}}$ 分别表示压差发电场站自用电量 and 余电上网电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

2) 冷能制冰效益。

$$M_{\text{im}} = L_{\text{im}} C_{\text{im}}^{\text{pt}} \quad (20)$$

式中: M_{im} 为制冰年收益, 元; $C_{\text{im}}^{\text{pt}}$ 为冰块单价, 元/ t 。

3) 年运维成本。

压力能发电-制冰系统的运维成本主要涉及膨胀机、励磁系统和后台系统等设备的维护费用; 润滑油、熔断器、空开、过滤器和轴瓦等易损件的更换费用; 润滑油泵、排风扇和PLC控制柜等设备运行产生的电费; 换热器热量不完全交换带来的能量损耗折算费用等。

4) 投资回收期。

$$T_{\text{ir}} = \frac{Z_{\text{ve}}}{M_{\text{ai}} - M_{\text{om}}} \quad (21)$$

式中: T_{ir} 为投资回收期, a ; Z_{ve} 为系统总投资, 元; M_{ai} 、 M_{om} 分别表示系统年经济收益和系统年运维成本, 元。

2.4 环境保护指标

NGPE属于清洁能源, 利用压差发电可以减少煤电的使用, 从而等价减少 CO_2 、 SO_2 和 NO_x 的排放。因此, 设立 CO_2 减排量 (R_{c})、 SO_2 减排量 (R_{s}) 和 NO_x 减排量 (R_{n}) 三项评估指标, 用于评价NGPE利用项目的环境保护贡献。计算公式如下:

$$R_{\text{c}} = P_{\text{te}} \cdot O_{\text{c}} \quad (22)$$

$$R_{\text{s}} = P_{\text{te}} \cdot O_{\text{s}} \quad (23)$$

$$R_{\text{n}} = P_{\text{te}} \cdot O_{\text{n}} \quad (24)$$

式中: O_{c} 、 O_{s} 、 O_{n} 分别为生产1 kWh 煤电的 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 排放量, kg/kWh 。

另外, 膨胀发电机组运行时会产生较大噪声, 设立噪声达标率指标有助于改进系统装置, 减少机组噪声对操作人员正常工作及周边居民日常生活产生的影响。计算公式如下:

$$\varepsilon_{\text{vo}} = \left(1 - \frac{T_{\text{un}}}{T_{\text{all}}} \right) \times 100\% \quad (25)$$

式中: ε_{vo} 为噪声达标率; T_{un} 为噪声超上限时间, h; T_{all} 为监测总时长, h。

3 基于AHP-反熵权法的综合评价模型

本文提出AHP-反熵权法计算指标权重, 既考虑了专家经验在进行指标数据判断时的实际工程性, 又解决了指标之间的相互影响、含义交叉等问题, 能够实现客观、合理的评价。

3.1 AHP

AHP属于主观权重计算方法。将压力能综合利用评估指标体系分为3个层次, 分别为目标层(Z)、准则层(N)和指标层(Y)。第*i*个准则层下的第*j* ($j = 0, 1, 2, \dots, n_i$) 个指标可用 Y_{ij} 来表示, 其中 n_i 满足:

$$n_i = \begin{cases} 6, & i=1 \\ 4, & i=2 \\ 4, & i=3 \\ 4, & i=4 \end{cases} \quad (26)$$

建立层次结构模型后, 利用比例标度表^[22]构造判断矩阵, 对准则层和指标层中各指标之间的重要度比较结果进行量化。准则层判断矩阵中, 各指标重要度比较结果用 a_{gk} ($g, k = 1, 2, 3, 4$) 表示, 其中 $a_{gk} = 1/a_{kg}$, 利用和积法按列归一化后可得判断矩阵的特征向量 $W_z = [w_{z1}, w_{z2}, w_{z3}, w_{z4}]$, 其中:

$$w_{zi} = (1/m) \cdot \sum_{c=1}^m [a_{ic} / \sum_{k=1}^m a_{ck}] \quad (27)$$

式中: m 为判断矩阵阶数。

最后通过式(28)–(29)进行一致性检验后即可得到准则层各指标权重。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (28)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (29)$$

式中: C_1 为一致性指标; λ_{\max} 为判断矩阵最大特征值; C_R 为一致性比率; R_1 为平均随机一致性指标, 其值与判断矩阵阶数 m 有关^[22], 可通过查表得到。

当 $C_R \leq 0.1$ 时, 通过一致性检验, 否则需要调整判断矩阵各元素之间的标度, 对 C_1 值进行调整。通过上述方法可计算指标层各评估指标权重, 最终得到各评估指标的主观权重值 w_{ij}^s 。

3.2 反熵权法

反熵权法是一种客观权重确定方法, 本文通过对熵权法进行改进, 使量度的不确定性程度得到改善, 提高了权重值的稳定性^[21]。具体计算步骤如下。

1) 指标预处理。

对于不同评估准则下的不同评估指标, 因其具有不同的物理意义, 在计算指标权重时可分为增强型和缩减型。增强型指标取值越大越好, 如膨胀发电机组焓效率、连续稳定运行时长等; 缩减型指标取值越小越好, 如装置故障率、年运维成本等。由于不同评估指标间的量纲不同, 若在相同的数据目标下对不同类型指标进行评价则会使结果缺乏准确性^[18]。本文使用一种指标预处理方法无量纲化处理数据指标, 缩小指标之间的差异。

对于增强型指标, 通过式(30)进行归一化处理:

$$\alpha_i(j) = \frac{Y_{ij} - \min Y_{ij}}{\max Y_{ij} - \min Y_{ij}} \quad (30)$$

式中: $\alpha_i(j)$ 为指标 Y_{ij} 预处理后的指标值。

对于缩减型指标, 通过式(31)进行归一化处理:

$$\alpha_i(j) = \frac{\max Y_{ij} - Y_{ij}}{\max Y_{ij} - \min Y_{ij}} \quad (31)$$

于是得到预处理指标评价矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1(1) & \alpha_1(2) & \cdots & \alpha_1(n_1) \\ \alpha_2(1) & \alpha_2(2) & \cdots & \alpha_2(n_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_i(1) & \alpha_i(2) & \cdots & \alpha_i(n_i) \end{bmatrix} \quad (32)$$

2) 确定反熵和权重。

$$s_{ij} = \alpha_i(j) / \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_i(j) \quad (33)$$

$$h_{ij} = - \sum_{j=1}^{n_i} (1 - s_{ij}) \ln s_{ij} \quad (34)$$

$$w_{ij}^o = h_{ij} / \sum_{j=1}^{n_i} h_{ij} \quad (35)$$

式中: h_{ij} 为各指标的反熵; w_{ij}^o 为基于反熵权法确定的指标客观权重值。

3.3 组合赋权

主观权重和客观权重的相对重要程度随指标的变化而体现出差异性, 结合矩阵理论基本思想, 得到各指标的主、客观权重关系系数 δ_{ij} 和 ψ_{ij} 。计算方法为

$$\begin{cases} \delta_{ij} = w_{ij}^s / (w_{ij}^s + w_{ij}^o) \\ \psi_{ij} = w_{ij}^o / (w_{ij}^s + w_{ij}^o) \end{cases} \quad (36)$$

利用AHP得到的主观权重值 w_{ij}^s 和反熵权法得到的客观权重值 w_{ij}^o ，结合主、客观权重关系系数，得到指标的最终权重值为

$$w_{ij} = \frac{\delta_{ij} w_{ij}^s + \psi_{ij} w_{ij}^o}{\sum_{j=1}^{n_i} (\delta_{ij} w_{ij}^s + \psi_{ij} w_{ij}^o)} \quad (37)$$

3.4 确定指标评分

为了将各项评估指标应用于实际的NGPE综合利用系统评估工作，使评估结果能够直观反映系统的运行状况，本文结合专家意见，综合考虑指标类型和指标参考值制定评分标准，计算指标得分和系统综合得分（百分制）。具体步骤如下。

1) 指标类型划分。根据指标物理意义和量纲，相比于指标权重计算，在计算指标得分时可进一步将指标划分为比率型、区间型和阶段型3种，其中比率型和区间型又分为正向和逆向2种。

2) 计算指标得分。对于正向比率型指标，如膨胀发电机组焓效率、噪声达标率等，其评估得分与指标计算结果直接相关，指标值越大，得分越高。计算方法为

$$S_{ij} = J_{ij} \times 100 \quad (38)$$

式中： S_{ij} 为指标 Y_{ij} 的评估得分； J_{ij} 为指标 Y_{ij} 的计算值。

对于逆向比率型指标，如装置故障率、生产运营影响度等，其指标值越小，得分越高。计算方法为

$$S_{ij} = (1 - J_{ij}) \times 100 \quad (39)$$

区间型指标在制定评分标准时需要考虑场站的实际运行情况与预期规划之间的差距，如因气源波动导致的实际发电功率较小等情况。对于正向区间型指标，如膨胀发电机组功率、压力能发电效益等，其指标值越大，得分越高。计算方法为

$$S_{ij} = \frac{J_{ij}}{J_{ij}^*} \times 100 \quad (40)$$

式中： J_{ij}^* 为指标 Y_{ij} 的理想值。

对于逆向区间型指标，如年运维成本等，其指标值越小，得分越高。计算方法为

$$S_{ij} = \left(1 - \frac{J_{ij}}{J_{ij}^{\max}} \right) \times 100 \quad (41)$$

式中： J_{ij}^{\max} 为指标 Y_{ij} 的最大允许值。

由于NGPE利用处于发展阶段，能够长期稳定运行的应用项目较少，阶段型指标（如连续稳定运行时

长等）需要根据专家意见生成指标计算值（视为自变量）与该指标对应得分（视为因变量）的关系，通过最小二乘拟合得到评分函数，在计算时应取尽量多组数据以使评分函数更加准确，之后将指标的实际值代入评分函数即可得到指标得分。

3) 计算系统综合得分。在各评估指标得分确定后，结合指标权重，最终得出压力能回收利用系统的综合得分。计算方法为

$$S_{co} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_i} w_{ij} S_{ij} \quad (42)$$

式中： S_{co} 为压力能回收利用系统的综合得分。

4 算例分析

选取西南地区某调压站作为研究对象，采用本文提出的评估方法对该调压站NGPE回收利用系统的运行效益进行综合评估。

该调压站压力能回收利用系统于2019年6月建成投运，利用产品气压力和下游管网之间的压差进行发电，使用的工艺为向心透平膨胀机发电工艺。在站内设备大修期间完成200万方装置产品气至余压发电装置的管线铺设和口位预留，之后在经过膨胀发电机和配电撬基础设施施工、6 kV控制柜改造以及电气仪表线缆的铺设后，压力能回收利用系统进场安装调试投运，系统建设总费用结算金额为1 603.9万元。系统主要由透平膨胀发电机、润滑油系统、干气密封系统（采用两级密封气系统对膨胀发电机组进行密封，一级密封气采用产品气，二级密封气采用氮气）、配电房等组成。该调压站基本参数如表2所示。

正常生产时，从调压站400万方装置或200万方装置脱水单元来的产品天然气通过并联管线进入压力能发电装置。在压力能发电撬组中完成高压天然气降压膨胀发电和冷能回收。发电功率通过喷嘴调节阀进行调节，降压膨胀后的天然气进入400万方装置的下游外输管网。

利用AHP计算评估指标主观权重 (w_{ij}^s)，由6名参与压力能回收利用系统运行维护的专家进行重要度排序，通过各自的排序结果计算出权重值后求平均值，得到最终的主观权重值，并由1名专家对最终结果进行复核。利用反熵权法求得各评估指标的客观权重值 (w_{ij}^o) 后，通过组合赋权即可得到各评估指标的最终权重值 (w_{ij})，具体数据如表3所示。

表 2 调压站基本参数

Table 2 Basic parameters of the regulating station

参数	数值	
天然气日处理量/m ³	230×10 ⁴	
透平膨胀机参数	进/出口压力/MPa	4.5/2.2
	进/出口温度/°C	24.7/-23.1
	转速/(r/min)	18 000
发电机参数	额定功率/kW	710
	额定电压/kV	6.3
	额定频率/Hz	50
	额定电流/A	81.3
	同步转速/(r/min)	3000
投资运维	预算投资/万元	1 860.8
	实际投资/万元	1 603.9
	年运维费用/万元	57.3
	下网电价/(元/kWh)	0.66
制冰效益	制冰量/(t/d)	60.4
	冰价/(元/t)	180

表 3 评估指标权重

Table 3 Evaluation index weight

<i>N</i>	<i>Y</i>	w_{ij}^s	w_{ij}^o	w_{ij}
N_1 0.281 6	Y_{11}	0.061 5	0.053 3	0.052 7
	Y_{12}	0.039 3	0.053 5	0.043 3
	Y_{13}	0.020 4	0.064 0	0.048 8
	Y_{14}	0.024 1	0.049 9	0.037 8
	Y_{15}	0.012 6	0.053 5	0.041 7
	Y_{16}	0.040 2	0.075 0	0.057 3
N_2 0.309 5	Y_{21}	0.054 1	0.064 3	0.054 4
	Y_{22}	0.076 7	0.048 2	0.059 9
	Y_{23}	0.150 0	0.058 1	0.113 4
	Y_{24}	0.106 5	0.060 0	0.081 8
N_3 0.179 4	Y_{31}	0.054 1	0.050 7	0.047 8
	Y_{32}	0.038 4	0.049 1	0.040 5
	Y_{33}	0.027 7	0.051 4	0.039 3
	Y_{34}	0.019 5	0.067 6	0.051 8
	Y_{41}	0.106 5	0.050 7	0.080 7
N_4 0.229 5	Y_{42}	0.038 4	0.050 7	0.041 4
	Y_{43}	0.054 5	0.050 7	0.048 0
	Y_{44}	0.075 5	0.049 3	0.059 4

从表3结果来看, 产能效率 N_1 (0.281 6) 和设备运行 N_2 (0.309 5) 的权重占比最大, 表明该调压站当前在进行压力能回收利用时, 对提高发电和制冰产量、降低装置故障率 Y_{23} (0.113 4)、维护设备的稳定运行最为关注。调压站园区用电以煤电为主, 回收压力能发电供园区自用能够减少煤电的使用, 从而减少燃煤发电过程中CO₂、SO₂以及有害物质排放。同时, 在国家“双碳”目标背景下, 压力能发电系统投产后在降低碳排放等方面的环保性贡献也受到了调压站运营人员的较大关注, 因此, 环境保护 N_4 (0.229 5) 和CO₂减排量 Y_{41} (0.080 7) 等指标被赋予了较高的权重。系统投运初期, 停机维护和设备故障次数较多, 运营人员更看重系统的安全平稳运行水平, 经济效益方面作用并不显著, 因此权重值 N_3 (0.179 4) 较低。

该调压站NGPE回收利用系统投运后首年共运行4464 h, 最大发电功率324.41 kW, 最小发电功率210.67 kW, 平均发电功率251.6 kW, 连续稳定运行时长最大为2640 h。运行成本中, 润滑油泵、排风扇、PLC控制柜等产生的电费共20.47万, 约占总运行费用的三分之一。循环水、仪表风、工厂风、氮气以及产品气密封气使用量较少, 因此未计入成本。此外, 操作人员均为本厂员工, 未增加人工成本。环保方面, 压力能发电系统每生产1 kWh电能等价减少的CO₂、SO₂和NO_x排放量分别按照0.997 kg、0.03 kg和0.015 kg计算。膨胀发电机转速较高, 且在运行中会产生节流声, 导致运行过程中噪音较大, 达到75 dB以上, 2020年在膨胀机发电撬外增加一座隔音房后噪声影响有所改善。基于调压站运行数据, 各评估指标的具体计算值如表4所示。

表 4 评估指标计算值

Table 4 Calculated value of evaluation indicators

<i>N</i>	<i>Y</i>	2019	2020	2021
N_1	Y_{11}	251.6	280.4	334.2
	Y_{12}	58.4%	62.7%	65.2%
	Y_{13}	75.2%	77.1%	78.9%
	Y_{14}	43.1%	44.8%	45.7%
	Y_{15}	4 136.5	6 018.7	7 415.3
	Y_{16}	3.6%	2.2%	2.1
N_2	Y_{21}	110	212	251
	Y_{22}	0.63	0.72	0.88
	Y_{23}	0.52	0.36	0.29
	Y_{24}	0.57	0.66	0.74

续表

<i>N</i>	<i>Y</i>	2019	2020	2021
<i>N</i> ₅	<i>Y</i> ₃₁	696 314.8	1 393 417.5	1 672 176.8
	<i>Y</i> ₃₂	921 754.2	1 415 736.4	1 643 587.3
	<i>Y</i> ₃₃	57.3	42.5	30.7
	<i>Y</i> ₃₄	15.3	7.2	5.8
<i>N</i> ₄	<i>Y</i> ₄₁	1 119.8	2 247.7	2 686.9
	<i>Y</i> ₄₂	33.7	67.6	80.8
	<i>Y</i> ₄₃	16.8	33.8	40.4
	<i>Y</i> ₄₄	31.4%	43.7%	48.5%

为了对指标得分结果作进一步分析, 本文结合专家意见和行业发展现状, 将指标得分所处区间从低到高划分为4个等级, 以对评估结果进行定性分析, 如表5所示。

表5 评分等级

Table 5 Rating of evaluation scores

评分区间	<30	30~60	60~80	>80
水平阶段	极低水平 问题明显	较低水平 亟需改进	中等水平 有待优化	较高水平 发展较好

基于指标数据, 利用提出的评价模型可以得到该调压站压力能利用系统的评分结果。以设备运行为例, 其下属4项指标的评分如表6所示。

表6 设备运行指标得分

Table 6 Scores of equipment operation indexes

年份	连续稳定 运行时长 得分	设备 利用系数 得分	装置 故障率 得分	生产运营 影响度 得分	评估 得分
2019	28.12	66.41	48.47	57.33	47.04
2020	49.19	72.37	64.53	66.21	63.79
2021	60.07	88.01	70.69	74.24	72.81

从表6可以看出, 该系统2019年投运后得分偏低, 连续稳定运行时长、装置故障率评估得分均不高。这主要是由于下游背压变化、膨胀机震动偏高(超过70 μm)以及齿轮箱轴向窜动导致轴瓦箱端面磨损等问题, 使得系统停机维护次数较多, 系统运行效果较差。2020年经检查确认并停机检修后, 将恒电压模式变更为恒功率因数模式运行, 同时增加励磁报警信号、保护灭磁信号, 之后一直正常运行, 各指标分数上升到60分以上, 达到中等水平, 运行趋于稳定, 其中连续稳定运行时长得分提升最为明显。

利用上述方法可以得到产能效率、设备运行和环境保护3个指标准则的评分以及评估总得分, 如表7所示。

表7 综合评估分数

Table 7 Comprehensive evaluation scores

年份	指标准则				总分
	产能效率	设备运行	经济效益	环境保护	
2019	38.42	47.04	43.27	48.48	43.57
2020	45.28	63.79	50.57	56.90	54.63
2021	50.33	72.81	60.49	64.09	62.27

从表7可以看出, 2019年试运行以来, 各项指标分数均有明显提高, 其中设备运行从较低水平(47.04)上升到中等水平(72.81), 改进效果最为显著。此后除设备正常维护和下游管网压力突然增加导致的主动停机外, 设备未发生故障。产能效率(50.33)提升较小且长期处于较低水平, 主要因为调压站为配合上游气矿发挥气田产能实施降压操作, 余压发电装置实际运行时未达到满负荷状态, 同时也导致总的经济效益(60.49)低于预期值, 分数提升缓慢。另外, 随着压差发电和制冰效益的逐步提高, 该系统在减少碳排放和清洁能源利用方面的作用愈发明显, 环境保护(64.09)得分有明显进步, 但由于运行过程中机组噪声较大, 对园区生产和周边居民均有影响, 导致环保得分低于预期, 处于中等水平。

此次评估结果与调压站在运行初期的生产现状相符, 体现了本文评估方法的准确性和有效性。另外, 基于本文案例评估结果并结合国内压力能利用项目运行情况实地调研信息可得, 中国压力能回收利用领域当前主要还存在3方面的问题, 具体如下。

1) 目前国内虽有较成熟的膨胀机制造技术, 但应用到天然气领域还有待进一步验证和改进, 特别是膨胀机的密封、振动问题, 齿轮箱轴向窜动问题等都有待解决。

2) 压力能回收利用在国内属于新兴产业, 缺乏相关的行业执行标准, 项目的建设和运行管理缺乏相应的操作和管理规范, 对场站的一体化管理造成困难。

3) 压力能利用系统与原天然气系统的衔接存在问题, 原天然气系统的天然气流量受气源和负荷影响, 引起的气流量波动给压差发电系统的安全性和稳定性带来了挑战。

5 结论

1) 提出的NGPE发电-制冰一体化应用系统解决了NGPE用能模式单一、能源利用率低的问题。同时, 加入的太阳能集热系统实现了制冰原水预冷和天然气进入下游管网前加热双重效益。该综合利用系统使NGPE这种清洁能源得到充分利用, 提高了综合能效, 能够为未来调压站、净化厂等具有天然气降压操作场景的压力能回收利用系统规划设计提供参考。

2) 建立的NGPE利用系统运行效益评估指标体系改进了传统评估指标片面的问题, 使压力能利用系统的运行状况和缺陷被准确评估, 并使压力能利用带来的经济和环保效益得到量化。算例分析表明评估指标可以正确评估调压站压力能利用系统的运行现状和整体发展程度, 同时反映出中国压力能回收利用领域当前存在的问题, 为系统的运行优化提供指导。

3) 提出的AHP-反熵权法对传统的单一权重计算方法进行了改进, 使指标权重兼顾专家经验意见和指标数据变化趋势, 提高了指标权重的判断精度。通过算例分析发现评估结果与调压站在运行初期的生产现状相符, 表明了本文评价模型在压力能实际工程应用评估方面的适用性, 验证了评价模型的科学性和可行性。

参考文献

- [1] 罗帅, 粟科华, 周慧玲, 等. 2022—2023年采暖季中国天然气市场供需预测[J]. 国际石油经济, 2022, 30(11): 64-73.
LUO Shuai, SU Kehua, ZHOU Huiling, et al. Forecast of natural gas supply and demand in China during the 2022-2023 heating season[J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(11): 64-73 (in Chinese).
- [2] CASCIO E L, FRIESEN M P V, SCHENONE C. Optimal retrofitting of natural gas pressure reduction stations for energy recovery[J]. Energy, 2018, 153: 387-399.
- [3] 张安安, 刘艾, 曲广龙, 等. 计及天然气压力能的微电网储荷协调优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 499-505.
ZHANG An'an, LIU Ai, QU Guanglong, et al. Optimization strategy for microgrid storage and load coordination considering natural gas pressure energy[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(7): 499-505 (in Chinese).
- [4] 朱力洋, 熊波, 王志军, 等. 天然气压差发电技术在地下储气库的应用[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 142-146.
ZHU Liyang, XIONG Bo, WANG Zhijun, et al. Application of natural gas pressure differential power generation technology in underground gas storages[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 142-146 (in Chinese).
- [5] 张安安, 邓靓, 杨威, 等. 计及天然气管网压力能消纳的充电设施优化规划[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 970-979.
ZHANG An'an, DENG Liang, YANG Wei, et al. Optimal planning of charging facilities considering natural gas pressure energy utilization[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 970-979 (in Chinese).
- [6] 徐文东, 郑惠平, 郎雪梅, 等. 高压管网天然气压力能回收利用技术[J]. 化工进展, 2010, 29(12): 2385-2389.
XU Wendong, ZHENG Huiping, LANG Xuemei, et al. Recycling of natural gas pressure energy from high-pressure pipeline network[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(12): 2385-2389 (in Chinese).
- [7] 王清. 小型调压站天然气管网压力能发电系统的研究与开发[J]. 信息系统工程, 2020(6): 36-37.
- [8] 李媛, 龙俨丽, 刘世常, 等. 川东地区晏家站天然气输气压力驱动发电试验[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(1): 78-82.
LI Yuan, LONG Yanli, LIU Shichang, et al. Power generation driven by natural gas transmission pressure at Yanjia Station in East Sichuan[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(1): 78-82 (in Chinese).
- [9] 杨文, 郭悠悠, 曹学文. 新型小型天然气液化流程[J]. 天然气化工(C1化学与化工), 2020, 45(3): 61-65.
YANG Wen, GUO Youyou, CAO Xuewen. A novel process for small scale liquefaction of natural gas[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2020, 45(3): 61-65 (in Chinese).
- [10] LE S, LEE J Y, CHEN C L. Waste cold energy recovery from liquefied natural gas (LNG) regasification including pressure and thermal energy[J]. Energy, 2018, 152: 770-787.
- [11] 王松岭, 论立勇, 谢英柏, 等. 基于天然气管网压力能回收的联合循环构思[J]. 热能动力工程, 2005, 20(6): 628-631.
WANG Songling, LUN Liyong, XIE Yingbai, et al. Combined cycle system concept for the recovery of pressure energy of a natural gas pipe network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(6): 628-631 (in Chinese).
- [12] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 174-182.
CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 174-182 (in Chinese).
- [13] DOU Z L, ZHANG C Y, WANG W, et al. Review on key technologies and typical applications of multi-station integrated energy systems[J]. Global Energy Interconnection, 2022(3): 309-327.
- [14] 马丽叶, 张涛, 卢志刚, 等. 基于变权可拓云模型的区域综合能源系统综合评价[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2789-2799.
MA Liye, ZHANG Tao, LU Zhigang, et al. Comprehensive evaluation of regional integrated energy system based on

- variable weight extension cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2789-2799 (in Chinese).
- [15] WANG Y, KUCKELKORN J, LI D L, et al. Evaluation on distributed renewable energy system integrated with a passive house building using a new energy performance index[J]. Energy, 2018, 161(15):81-89.
- [16] 李宏仲, 孔振宇, 陶淳逸. 考虑天然气管网多状态模型的电-气综合能源系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6247-6260.
LI Hongzhong, KONG Zhenyu, TAO Chunyi. Reliability evaluation of electric-gas integrated energy system considering the multi-state model of natural gas pipeline network[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6247-6260 (in Chinese).
- [17] LIU H C, ZHOU X X, YANG X Y, et al. Influence evaluation of integrated energy system on the unit commitment in power system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 163344-163356.
- [18] 熊亚选, 乔萃杰, 李夏喜, 等. 单螺杆膨胀机天然气调压发电系统性能分析[J]. 煤气与热力, 2017, 37(3): 9-16.
XIONG Yaxuan, QIAO Cuijie, LI Xiaxi, et al. Performance analysis of natural gas pressure regulation and power generation system based on single screw expander[J]. Gas & Heat, 2017, 37(3): 9-16 (in Chinese).
- [19] 姚莉, 罗旻海, 肖君, 等. 天然气产业技术经济评价体系及指标设计[J]. 天然气技术与经济, 2019, 13(1): 71-74.
YAO Li, LUO Minhai, XIAO Jun, et al. Design on technical and economic evaluation system and index of natural gas industry[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2019, 13(1): 71-74 (in Chinese).
- [20] CASCIO E L, BORELLI D, DEVIA F, et al. Key performance indicators for integrated natural gas pressure reduction stations with energy recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 219-229.
- [21] 王红卫, 曾秀敏, 许光明, 等. 天然气压力能发电用于电解水制氢工艺经济性分析[J]. 化学工程与装备, 2020(3): 106-108.
- [22] 邱伟强, 王茂春, 林振智, 等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 244-255.
QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255 (in Chinese).
- [23] 刘国丹, 纪铤行, 滕润, 等. 基于熵权法的光热耦合综合能耗的百叶外遮阳控制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 236-241.
LIU Guodan, JI Yihang, TENG Run, et al. Control strategy of outer louver shading considering light-thermal coupling comprehensive energy consumption based on entropy weight method[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(3): 236-241 (in Chinese).
- [24] MA X D, SUN Q, ZHANG J M, et al. Research on comprehensive evaluation system of urban energy data based on AHP method[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, 382(5): 052009.
- [25] 路永鑫, 魏云冰, 赵启承, 等. 基于层次分析法和改进A*算法的电力应急机器人路径规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 82-89.
LU Yongxin, WEI Yunbing, ZHAO Qicheng, et al. Path planning of a power emergency robot based on an analytic hierarchy process and improved A* algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 82-89 (in Chinese).
- [26] 张安安, 冯雅婷, 林冬, 等. 考虑天然气压力能综合利用的微电网气-电需求响应模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 19-27.
ZHANG An'an, FENG Yating, LIN Dong, et al. Gas-electricity demand response model for micro-energy grid considering comprehensive utilization of natural gas pressure energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 19-27 (in Chinese).
- [27] 赵国明. 天然气压力能回收利用技术[C]//2019供热工程建设与高效运行研讨会. 江苏苏州, 2019.
- [28] 俞光灿, 李琦芬, 梁晓雨, 等. 天然气余压发电制冰系统设计及实际产能模拟[J]. 上海节能, 2017(10): 608-613.
YU Guangcan, LI Qifen, LIANG Xiaoyu, et al. Design and practical productivity simulation of natural gas residual pressure power generation ice making system[J]. Shanghai Energy Conservation, 2017(10): 608-613 (in Chinese).
- [29] 赵先勤, 史宇倩. 天然气压力能发电项目的应用[J]. 煤气与热力, 2017, 37(5): 1-5.
ZHAO Xianqin, SHI Yuqian. Application of power generation project using natural gas pressure energy[J]. Gas & Heat, 2017, 37(5): 1-5 (in Chinese).
- [30] 邱彬, 张志超, 王凯, 等. 计及天然气管网压力能发电的IES优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1457-1464.
QIU Bin, ZHANG Zhichao, WANG Kai, et al. IES optimal dispatching considering pressure energy generation of natural gas pipeline[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1457-1464 (in Chinese).

收稿日期: 2022-12-26; 修回日期: 2023-05-15。

作者简介:

李茜(1988), 女, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统、电气设备状态监测等, E-mail: swpuliqian@163.com。

徐璐(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统、压力能利用。通信作者, E-mail: 935994627@qq.com。



李茜

(责任编辑 翁宇威)