

碳中和背景下基于企业转型的氢储能经济分析

李 争¹, 罗晓瑞¹, 徐若思¹, 曹 欣², 杜深慧¹, 孙鹤旭¹

(1. 河北科技大学 电气工程学院, 石家庄 050018; 2. 河北建投新能源有限公司, 石家庄 050051)

摘要:为了探寻解决可再生能源弃能问题和实现企业碳中和的有效途径,构建风电、光伏-氢储能混合系统。在碳中和目标下,提出基于碳中和目标下的成本-效益模型,从寿命周期成本/效益、年度平均成本/效益和平准化能源成本/效益 6 个角度出发,研究氢储能的经济性。结果表明,风电、光伏-氢储能系统的年度平均效益和平准化能源效益较好,系统建设方案可行,可为后续的企业能源结构调整提供可行方案。

关键词:碳中和;成本-效益模型;寿命周期;氢储能;经济分析

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2022)06-0070-07

经济发展带来的非传统问题越来越突出,严重威胁人类的生产生活,寻求新型替代能源已成为当下能源体系转型首选。为应对气候问题,第 21 届联合国气候变化大会提出了“净碳排放”,即碳中和目标^[1-2]。为此,中国制定了“3060”碳达峰、碳中和目标,碳达峰是量变、碳中和是质变。碳中和的实现是一项系统工程,涉及经济、能源、社会及气候等众多领域,其中调整能源供应系统体系,构建多元、清洁、低碳的能源供应体系是一项重要举措^[3]。在电力系统方面,寻求非化石能源发电成为重点研究方向。

近年来,随着可再生能源并网容量的增加,给电网带来了一系列弊端。由于风能、太阳能具有间歇性、波动性的特点,会导致电网出现波动,造成一定的冲击^[4]。氢能作为 21 世纪的终极能源^[5],具有高效、无污染的特点;相较于风能、太阳能,可以进行存储;作为零碳能源,氢能是实现化石能源和可再生能源过渡和转换的重要桥梁^[6]。

为实现“双碳”目标,寻求有效的低碳减排方式,是目前各个行业转型的重要目标之一。本文就发电领域如何实现“双碳”目标,针对氢储能这一具体减排方式进行研究分析,搭建碳中和背景下的氢储能经济模型,通过实例验证,为企业提供一些能源转型的建议和措施。

1 理论基础

环境问题日益突出,实现能源转型已成为各行各业未来几年的重要目标。在节能减排大环境下,提出一种以低能耗、低污染、低排放为特征的经济模式,即低碳经济。经过研究可知,低碳背景下的经济模式,对于企业经济的影响并无明显的差异^[7-8]。在新的发展形势下,企业发展,尤其是高消耗、高排放企业,转变发展模式、实现低碳绿色的循环发展已成为该类型企业的发展重点^[8-9]。

氢能是一种柔性环保能源,无污染,能够储存;相较于飞轮、蓄电池、压缩空气、蓄水等储能方式,氢能的存储容量可以达到 100 GW·h 以上,放电时长可达 1 000 h 以上^[10-11]。目前,世界上普遍认为,氢储能技术可以作为一种用作平衡可再生能源装机容量较高的电网供需的潜在解决方案,也是智能电网和再生能源规模化重要支撑^[12]。

氢储能参与风电、光伏发电系统的能量调节具有重要意义,文献[13-14]针对含氢储能微网进行长时间尺度下计及风电出力不确定性的多目标系统规划配置,仿真证明氢能对提升微网经济性和灵活性作用显著。文献[15-16]通过燃料电池实现热电综合利用,从而提高含电解制氢设备综合能源系统的能源利用率与系统运行经济性。综上所述,氢储能技术在缓解弃能现象,实现多能互补、减少能源

收稿日期: 2022-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51877070, 51577048);河北省重点研发计划(19214501D, 20314501D);河北省自然科学基金(E2021208008);河北省高层次人才项目(A201905008)。

作者简介: 李争(1980—),男,河北石家庄人,河北科技大学电气工程学院,教授,博士,研究方向为新型电机和执行器的设计、分析和控制,可再生能源发电和电力电子。

浪费具有技术可行性。

可以将氢储能技术理解为化学储能的变形,是实现“电-气-电”能量转换的重要途径之一。该技术将氢气作为能量转换的中间桥梁,利用多余的、非高峰、低质量的电能电解制氢并将其进行储存;当电网发电端供应不足时,通过燃气轮机、燃料电池、内燃机等将氢能转换成电能并输送上网。氢储能的技术路线如图1所示。

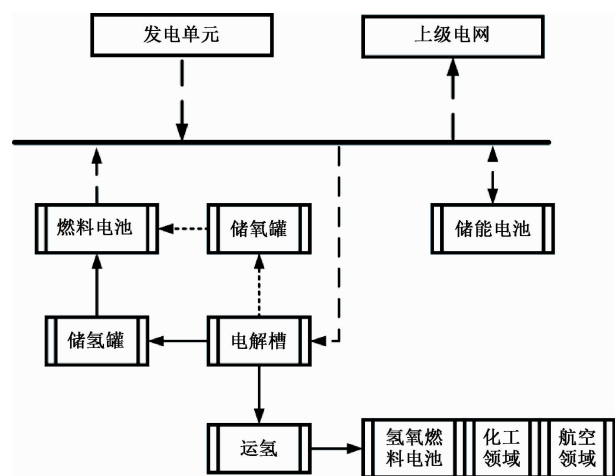


图1 氢储能技术路线

整个氢储能环节主要包括制氢、储运氢、用氢3个环节,每个环节相应的技术种类多样。其中,制氢技术主要有工业副产氢、化石燃料制氢、电解水制氢以及新型制氢(生物制氢)等;储氢技术主要有高压气态储运、液氢储运、固态储运和有机液态储运等技术;氢能主要应用于石化工业、交通领域、航天领域等领域^[17-20]。电解水制氢技术作为实现“电-气”转换的关键技术又可以分为碱水电解、固体氧化物电解和PEM纯水电解,其中,碱水电解技术成熟可靠、商业化程度高、成本低廉,是可再生能源制备氢能的首选技术^[21]。在用氢负荷端,燃料电池是实现“气-电”转换的关键技术,根据电解质和工作环境温度工况的不同主要分为碱性电解质、质子交换膜、磷酸、熔融碳酸盐和固体氧化物等,其中质子交换膜燃料电池因其发电效率较高、启动快、比功率高、结构简单等优点被应用于可再生能源领域。本文采取碱水电解制氢技术用于制备氢气;采用高压气态方式储运氢;在用氢端,则主要采用碱性燃料电池。

2 碳中和背景下的氢储能经济模型

2.1 目标函数

模型目标函数:碳中和条件下的系统净效益最大,即系统的收益与成本差值最大。具体计算公式为

$$RE_{\text{total}} = \max\{Y_{\text{total}} - X_{\text{total}}\} \quad (1)$$

式中: Y_{total} 为系统总收入; X_{total} 为系统总支出。

2.2 边界条件

系统边界条件具体如下。

1)碳中和约束。工厂的碳排放主要来源于工厂所耗费的电能,碳中和的约束条件是指工厂所耗费的电能全部来自风电、光伏、燃料电池出力所产生的电能,即

$$C_{\text{emission}} \leq 0 \quad (2)$$

式中, C_{emission} 为工厂的碳排放量。

2)场地约束。依据现有的厂房、办公楼、实验楼楼顶,停车场、垃圾场棚顶,工厂外围滩涂等空闲面积进行系统设计建设。

$$S_{\text{system}} \leq S_{\text{roof}} + S_{\text{ceiling}} + S_{\text{mudflat}} \quad (3)$$

式中: S_{system} 为系统建设面积; S_{roof} 为厂房、办公楼、实验楼楼顶总面积; S_{ceiling} 为停车场、垃圾房所建设的棚顶面积; S_{mudflat} 为所允许的滩涂建设面积。

3)供电平衡约束。工厂24 h满负荷运行,电能的连续供应尤为重要,因此,系统容量的设计需要满足工厂的用电需求,即

$$P_{\text{load}} \leq P_{\text{PV}} + P_{\text{Wind}} + P_{\text{Storage}} \quad (4)$$

式中: P_{load} 为工厂所耗费的电能; P_{PV} 、 P_{Wind} 、 P_{Storage} 分别为光伏电站、风电机组、氢储能模块(储能电池单元)出力能力。

4)氢储能容量约束。氢储能模块中中高压储氢罐的氢气储存和释放有要求,在使用过程中,氢气的使用量应该在这一范围内,即

$$\min_{\text{capacity}} \leq H_{\text{H}_2} \leq \max_{\text{capacity}} \quad (5)$$

式中, $\min_{\text{capacity}}$ 、 $\max_{\text{capacity}}$ 分别为储氢罐的最小储氢量和最大储氢量。

5)储能电池约束。储能电池充电和放电有一定的范围,即

$$\min_{\text{SOC}} \leq \text{SOC} \leq \max_{\text{SOC}} \quad (6)$$

式中, $\min_{\text{SOC}}$ 、 $\max_{\text{SOC}}$ 分别为储能电池的最小和最大放电深度。

6)瞬时功率约束。风电、光伏出力具有波动性,为防止工厂用电的稳定性,供电系统需要满足瞬时功率平衡,即

$$\lambda \sum P_i(t) + H_{\text{H}_2}(t) - L(t) = 0 \quad (7)$$

式中: λ 一般取值 1.0~1.3; i 为 PV、Wind、Storage; $H_{\text{H}_2}(t)$ 为氢储能模块当前储能容量; $L(t)$ 为工厂实时消耗的电能。

2.3 评价指标

风电、光伏-氢储能系统所采用的评价指标有

3 个分别为寿命周期成本/效益 (life cycle cost/income, LCC/LCI)、年度平均成本/效益 (annualized cost/income of system, ACS/AIS) 和平准化能源成本/效益 (levelized cost/income of energy, LCOE/LIOE), 计算公式如下^[22-24]:

$$LCC = C + M + G - S \quad (8)$$

$$LCI = E_1 + E_2 \quad (9)$$

$$C_{ACS/AIS} = C' \frac{(i' - d)(i + i')^n}{(i + d)(i + i')^n - (i + d)^{n+1}} \quad (10)$$

$$LCOE/LIOE = \frac{C_{ACS/AIS}}{\sum_{t=1}^n P_{gen}(t)} \quad (11)$$

式中: i 为实际年度利率; i' 为名义利率; d 为年度膨胀率; C' 为 LCC 或者 LCI; $P_{gen}(t)$ 表示 t 时刻风电、光伏-氢储能系统的发电功率。

2.4 模型建立

基于系统评价体系, 依照项目前评价原则, 建立基于碳中和目标下的成本-效益模型。目前, 基于电网的实际情况, 风电、光伏并网时需要考虑系统成本和非系统成本。其中, 非系统成本主要由初始建设投资、更换成本、运维成本、报废成本 4 部分组成。由于该系统的建立主要是用来维持自己工厂内部消耗, 上网电量符合电网需要, 因此非系统成本忽略不计。

系统成本主要包括以下几方面。

1) 初始建设投资 C : 包括设备购买、运输、安装费用, 基础设施建设费用等。

$$C = \sum_{n_j} \frac{n}{n_j} (C_j C_{unit,j}) + C_0 \quad (12)$$

式中: j 为 PV、Wind、Storage、Inv (逆变器)、Con (控制器)、Other (其他); n_j 为设备使用期; C_j 为各个模块的装机容量, kW; $C_{unit,j}$ 为单位装机容量成本, 万元/kW; C_0 为其他初始投资费用。

2) 更换成本 G : 系统运营期间, 更换部分设备的费用, 如逆变器、储能电池、控制器等。

$$G = (C_j C_{unit,j}) \sum_{x=1}^{x_j} \left(\frac{1+d}{1+j} \right)^{(x-1)n_j} \quad (13)$$

式中, x_j 为各个模块相应的数量。

3) 运维成本 M : 系统运营期间, 所需支付的运维人员的工资、福利、运维等费用。

$$M = \begin{cases} C_0 \left(\frac{1+d}{1+j} \right) \left[1 - \left(\frac{1+d}{1+i} \right)^n \right], & i \neq d \\ C_0 n, & i = d \end{cases} \quad (14)$$

式中, C_0 为首年运维成本。

4) 报废成本 S : 当系统到达运营期, 设备拆除、回收所耗费的成本, 该部分目前没有好的处理方案, 忽略不计。

碳中和目标下的效益模型主要是从碳排放收益和电能效益两个方面进行分析^[25]。

1) 碳排放收益 E_1 : 该部分收益主要是依据清洁发展机制 (CMD), 基于碳排放交易市场, 通过减排量 (CER) 的交易获得收益。

$$E_1 = V_1 c_t = \sum P_i V_i c_t \quad (15)$$

式中: c_t 为单位碳排放权的价格; V_i 为单位发电量碳排放量^[26-27]。

2) 电能效益 E_2 : 电能效益主要分为两部分, 一部分是自产自销省去的费用, 一部分是上网售电的收入。

$$E_2 = P_{load} c_{ind} + (\sum P_i - P_{load}) c_{grid} \quad (16)$$

式中: P_{load} 表示负载所需功率; c_{ind} 表示电网销售电价; P_i 表示风电、光伏-氢储能系统中各子系统的发电功率; c_{grid} 表示上网电价。

3 碳中和背景下的氢储能经济分析

结合某工厂的实际情况, 对成本-效益模型进行验证。该工厂位于长三角南部沿海地区, 该地区为平原地带, 地势平坦, 海拔较低; 属于亚热带季风气候区, 暖季气候温润, 主要盛行东风/东南风, 冷季气候干旱, 主要盛行北风/西北风; 地处中国东南部, 风能资源丰富, 年平均风速为 6.6 m/s, 全年大风时数高达 7 000~8 000 h; 太阳能资源较为丰富, 年太阳辐射总量 4 200~5 000 MJ/m²。

工厂依据现有的建筑屋顶、汽车棚、海边滩涂等面积, 建设风电、光伏-氢储能混合系统, 该系统主要由以下模块组成: 风电机组、光伏电站、氢储能模块 (碱水电解槽、中高压储氢罐、碱性燃料电池)、蓄电池储能单元、控制单元、变流模块、逆变单元; 主要有蓄电池储能和氢储能两条储能线路。系统的示意图如图 2 所示。

当风电、光伏产生的电能大于负荷所需时, 用富余的电能电解水制备氢气或存储于蓄电池中; 当风电、光伏提供的电能不能满足负荷所需时, 需要氢储能单元和蓄电池储能单元进行工作满足负荷所需。系统电能流动逻辑示意图如图 3 所示。

3.1 负荷统计

该工厂共有 5 个厂区, 其中一个厂区主要生产光伏组件, 属于制造型企业。该工厂实行轮班制度, 设备每天 24 h 不间断运行 (全年按 365 d 考虑,

不考虑节假日),每个月有两天时间处于半停产期用于进行设备的保养与维护,耗电量为满负荷运转时的一半。根据实际情况,基于前几年因设备故障、停电事故等造成的停产情况,选取每年 20 d 的停产期。单个厂区内主要用电设备清单见表 1。

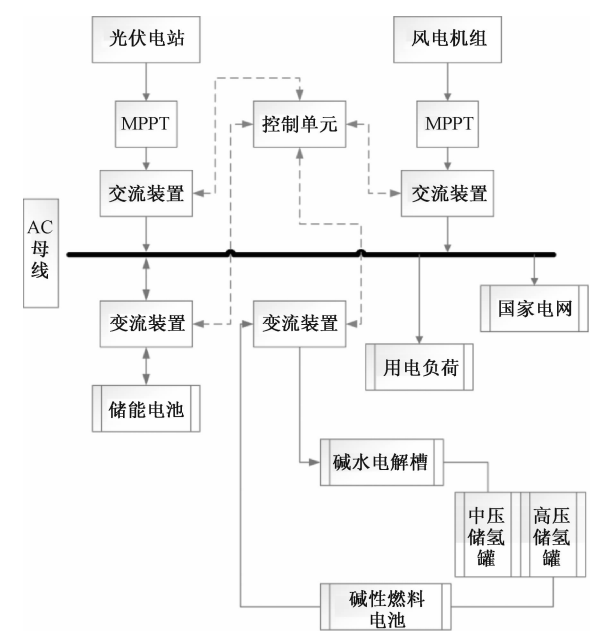


图 2 风电、光伏-氢储能混合系统示意图

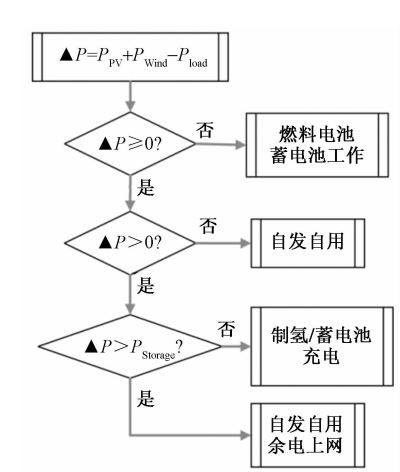


图 3 系统电能流动逻辑示意图

厂区内部的功率负荷浮动范围为 150 ~ 300 kW,假设该工厂可以运营 20 年,因设备损耗等情况,电能每年按照 1%增长,以每日最大功率负荷计算,因此厂区 20 年内的耗电量情况如图 4 所示。

3.2 系统容量

系统容量设计首先需要满足单个厂区内所有用电设备的用电量;其次需要考虑厂区允许建设设备的面积;再者,为应对突发停电等情况,需要 3 d 的储能裕量。厂区空闲面积见表 2。

表 1 单个厂区内主要用电设备统计

设备名称	数量/台	单台功率/kW
玻璃机	1	3
自动铺膜机	1	1.5
堆栈	8	1
串焊机	3	4
排版机	3	2.5
双玻合片机	1	3
EL 外观一体机	2	2
返修合片机	1	3
自动封边机	1	2
层前流水线总柜	1	10
层压机	4	145
层后流水线总柜	1	10
固化后流水线总柜	1	2
自动销边机	1	2
全自动装框机	1	10
上料手	1	23
下料手	1	3
自动搓角机	1	2

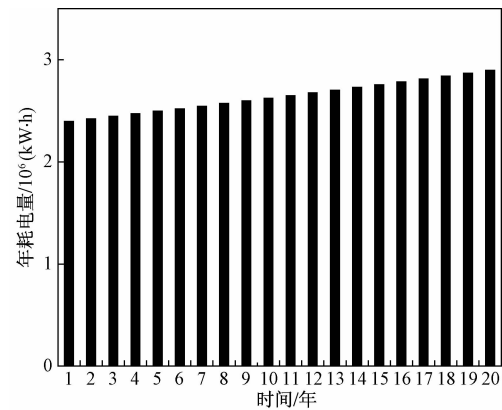


图 4 厂区 20 年内耗电量情况

表 2 空闲面积统计

名称	面积/m ²	备注
厂房楼顶	120×30	光伏电站
办公楼楼顶	60×30	
实验楼楼顶	60×30	
停车场棚顶	120×5	
垃圾场棚顶	20×10	
滩涂面积	200×100	风电机组

根据负荷统计和空闲面积限制,尽可能地设计更多容量的发电单元以增加效益。根据实际情况,设计风电、光伏-氢储能系统容量结果见表 3,其中风电机组单台容量为 3 MW,单片光伏组件的功率为 450 W。

3.3 发电量统计

依据当地的风光资源,结合系统实际容量,估算出风电机组的年发电量和光伏电站的年发电量,假设第一年衰减率为 2.5%,之后每年发电功率以

1%速率衰减,系统综合效率为 80%,如图 5、图 6 所示。

表 3 系统容量

名称		容量/kW
风电机组		3 000
光伏电站		603
氢储能	制氢负荷	388.125
	储氢罐	60 kg
	燃料电池	156.375
蓄电池		512.55

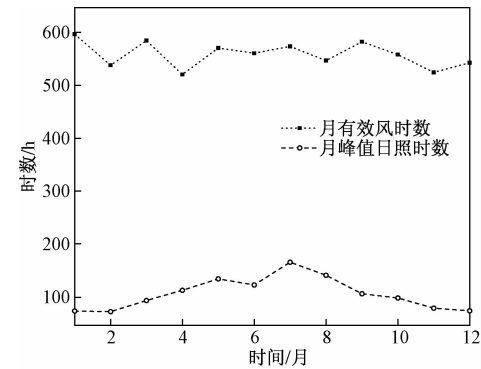
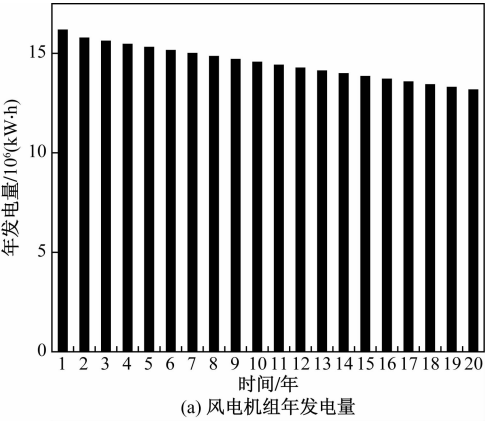


图 5 月有效风时数、月峰值日照时数折线图

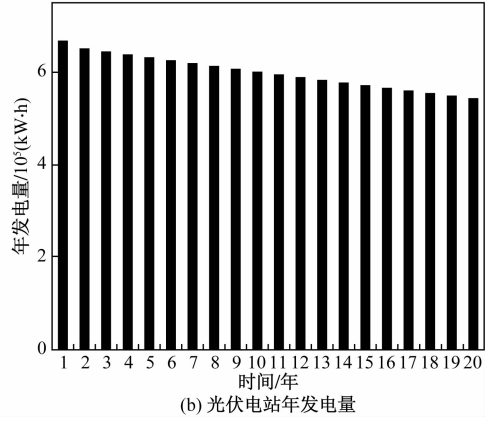
3.4 碳中和成本核查

风电、光伏-氢储能系统碳中和成本核查集中于以下几部分：

1)系统的初始投资成本主要集中于设备的购买和安装两部分费用。各部分主要的经济及技术参数见表 4。



(a) 风电机组年发电量



(b) 光伏电站年发电量

图 6 发电量统计

表 4 各部分主要的经济参数及技术参数统计

设备	参数	数值	参数	数值
风电机组	单位投资成本/(元/kW)	7 500	切入风速/(m/s)	3
	运行维护成本/(元/kW)	1. 526	切出风速/(m/s)	25
	寿命/年	20	额定风速/(m/s)	10. 8
光伏电池	单位投资成本/(元/kW)	4 550	工作电压 V_m /V	41. 4
	运行维护成本/(元/kW)	1. 526	工作电流 I_m /A	10. 87
	寿命/年	20	组件效率/%	20. 7
储氢罐	存储消耗率	0. 01	单位投资/(元/kg)	1 600
	输入效率	0. 98	寿命/年	20
	输出效率	0. 98		
碱性电解槽	工作温度/℃	70~100	电压堆栈效率/%	62~82
	单位投资成本/(元/kW)	7 360	电解槽电耗/(kW·h)	4. 5
	运行维护成本/(元/kW)	1. 09	电解槽水耗/kg	0. 89
	寿命/年	6		
燃料电池	单位投资成本/(元/kW)	6 500	工作温度/℃	50~90
	运行维护成本/(元/kW)	1. 526	电效率/%	40~60
	寿命/年	6		
蓄电池	额定电压/kV	35	额定功率/(kW·h)	250
	充电效率/%	90	放电效率/%	90
	循环次数/次	5 000	最大放电深度/%	90
	单位投资成本/(元/kW)	7 250	运行维护成本/(元/kW)	1. 526
	寿命/年	6		

2)运维成本主要是运维人员的工资福利和运维费用,因公司内部有技术部门,系统的运维由技术人员处理,该部分费用不用计算在系统模型成本计算中,只需要计算系统运行维护成本。

3)更换成本主要是针对一些寿命比较短的设备,在系统运营期内进行更换而产生的成本。

通过表 4 分析,20 年系统的总的碳中和成本为 5 495.596 5 万元,详细占比情况如图 7 所示。

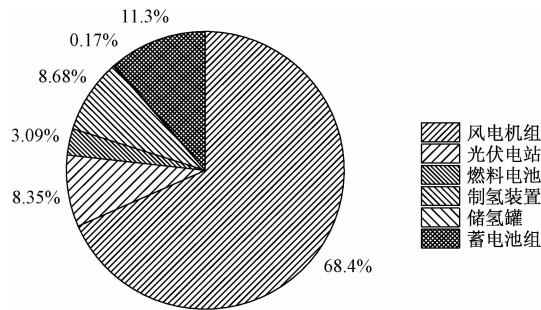


图 7 20 年系统成本占比

3.5 碳中和的效益估算

碳中和的收益估算主要集中于碳排放效益和电能效益两部分。

3.5.1 碳排放效益

目前碳排放交易市场上 1 t 二氧化碳的碳排放权的价格从 30 元到 80 元不等,本文选取每度电排放二氧化碳为 0.997 kg,碳排放权价格为 60 元/t^[22]。因此,20 年碳排放总效益为 1 771.536 万元,如图 8 所示。

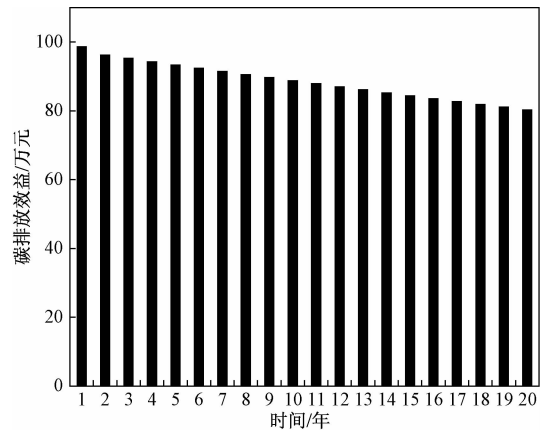


图 8 20 年碳排放效益统计

3.5.2 电能效益

电能效益主要分为两部分,其一是自产自销省去的电费成本,其二是用于并网的电能出售效益。

选取工业用电的价格为 0.634 7 元/(kW·h),风电、光伏上网电价为 0.6 元/(kW·h)。经过计算,20 年总的电能效益为 8 812.90 万元,如图 9 所示。

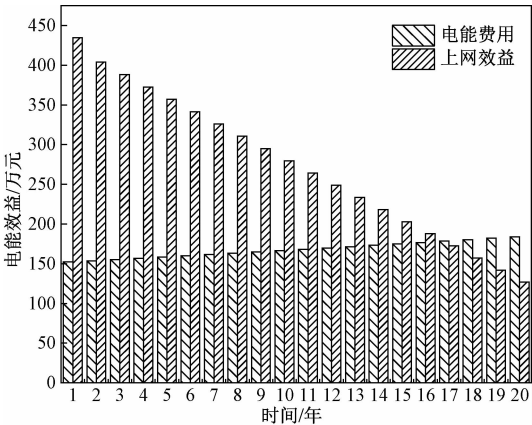


图 9 20 年内电能效益统计

基于上述分析,设年度实际利率为 4.9%,月名义利率为 1.637 5%,通货膨胀率为 2.5%,并假设其 20 年内不变。对风电、光伏-氢储能系统安装前后的 LCC/LSI、ACS/AIS、LCOE/LOOE 6 个指标进行计算分析,见表 5。

表 5 系统建设前后 6 个指标汇总

指标	建设前	建设后
LCC/万元	3 350.76	5 495.596 5
LCI/万元	0	8 812.90
ACS/万元	1 092.39	1 791.64
AIS/万元	0	2 873.12
LCOE	0.036	0.059
LIOE	0	0.095

从表 5 可以看出,风电、光伏-氢储能系统建设会有一定的建设投入,度电成本有所提升,但是 LCI、AIS 以及 LICO 的指标明显高于成本投入,相较于初期投资而言,项目收益可观,该项目是可行的,对于耗电企业而言,实现“碳达峰”目标提供了一条有效途径。

3.6 碳中和对氢储能的敏感性评估

对发电量、系统单位成本和厂区耗电量 3 个影响因素进行敏感性分析,令各个因素分别上下调整 10%、20%,计算系统内部收益率,详细计算结果见表 6。

表 6 风电、光伏-氢储能系统敏感性分析统计 %

指标	发电量	系统单位成本	厂区耗电量
+20	15.60	7.92	8.05
+10	13.50	9.53	9.79
0	11.40	11.40	11.40
-10	9.34	13.79	13.07
-20	7.20	16.70	14.65

根据表 6 可知,风电、光伏-氢储能系统的发电量、系统单位成本和厂区耗电量的平均敏感度分别

为3.68、3.85和2.89,显然,内部收益率对于系统单位成本的反应最为敏感,在施工建设初期阶段,成本控制显得尤为重要。

4 结论

针对风电、光伏-氢储能系统而言,虽然前期投入较大,但是LCI、AIS以及LICO的指标明显高于成本投入,系统建设具有可行性。此外,系统内部收益率对于系统单位成本最为敏感,因此系统建设时需要严格把控系统成本,减少不必要的开支,为后续双碳目标下制造型公司能源结构转型提供了思路。

参考文献

- [1] 邹才能,薛华庆,熊波,等. “碳中和”的内涵、创新与愿景[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 46-57.
- [2] 潘尔生,宋毅,原凯,等. 考虑可再生能源接入的综合能源系统规划评述与展望[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 1-13.
- [3] 隋朝霞. 碳中和目标下我国LNG产业链发展对氢能产业发展的启示[J]. 天然气化工(C1化学与化工), 2021, 46(4): 9-13.
- [4] 田江南,安源,蒋晶,等. 碳中和背景下的脱碳方案[J]. 分布式能源, 2021, 6(3): 63-69.
- [5] 李建林,李光辉,马速良,等. 碳中和目标下制氢关键技术进展及发展前景综述[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 1-8.
- [6] 郭鸿彬. 碳达峰、碳中和目标下抢占发展制高点: 全球主要国家氢能发展战略与政策扫描[J]. 可持续发展经济导刊, 2021(5): 27-28.
- [7] 李俊倩,司秀华,常冶衡. 低碳经济下企业何去何从[J]. 中国市场, 2019(33): 71-72.
- [8] 黄韧. “双碳”目标下北京市能源转型重点领域及路径研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [9] 白玲. 低碳经济背景下煤炭企业转型战的SWOT分析[J]. 价值工程, 2019, 38(24): 13-15.
- [10] 金雪,庄雨轩,王辉,等. 氢储能解决弃风弃光问题的可行性分析研究[J]. 电工电气, 2019(4): 63-68.
- [11] 肖宇. 氢储能: 支撑起智能电网和可再生能源发电规模

- 化[J]. 中国战略新兴产业, 2016(1): 46-49.
- [12] 吉力强,赵英朋,王凡,等. 氢能技术现状及其在储能发电领域的应用[J]. 金属功能材料, 2019, 26(6): 23-31.
- [13] 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, 2020, 32(6): 123-128.
- [14] 李鹏,韩建沛,殷云星,等. 电转氢作为灵活性资源的微电网容量多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 28-35, 139.
- [15] 郭梦婕,严正,周云,等. 含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 115-123, 161.
- [16] 随权,马啸,魏繁荣,等. 计及燃料电池热-电综合利用的能源网日前调度优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1603-1613.
- [17] 汉京晓,白伟,冯俊小,等. 氢能在供热领域的研究与分析[J]. 区域供热, 2021(3): 45-52, 84.
- [18] 徐东,刘岩,李志勇,等. 氢能开发利用经济性研究综述[J]. 油气与新能源, 2021, 33(2): 50-56.
- [19] 殷伊琳. 我国氢能产业发展现状及展望[J]. 化学工业与工程, 2021(4): 78-83.
- [20] 李争,张蕊,孙鹤旭,等. 可再生能源多能互补制-储-运氢关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2021(3): 446-462.
- [21] 张浩. 氢储能系统关键技术及发展前景展[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2021, 24(2): 8-12.
- [22] 武丹茹. 既有建筑外围护结构节能改造的全生命周期成本效益分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [23] 王子驰,雷炳银,康利改,等. 不同运行策略下的分布式系统多目标分析[J]. 河北科技大学学报, 2020, 41(2): 191-200.
- [24] 董楠楠,吴静,石鸿,等. 基于全生命周期成本-效益模型的屋顶绿化综合效益评估: 以Joy Garden为例[J]. 中国园林, 2019, 35(12): 52-57.
- [25] 肖钧文,黄辉先,刘晓舟. 大规模风光储并网碳经济性评估[J]. 太阳能学报, 2020(6): 171-177.
- [26] 方圆. 风-氢互补系统混合储能容量配置的经济性优化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [27] 胡云岩,张瑞英,王军. 中国太阳能光伏发电的发展现状及前景[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(1): 69-72.

Economic Analysis of Hydrogen Energy Storage under the Background of Carbon Neutralization Based on Enterprise Transformation

LI Zheng¹, LUO Xiaorui¹, XU Ruosi¹, CAO Xin², DU Shenhui¹, SUN Hexu¹

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. Hebei Construction & Investment Group New Energy Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In order to find an effective way to solve the problem of renewable energy abandonment and achieve carbon neutralization, a hybrid system of wind power, photovoltaic-hydrogen energy storage is constructed. Under the goal of carbon neutralization, a cost-benefit model based on the goal of carbon neutralization is proposed to study the economy of hydrogen energy storage from six perspectives: life cycle cost / benefit, annual average cost / benefit and standardized energy cost / benefit. The results show that the annual average benefit and standardized energy benefit of wind power and photovoltaic hydrogen energy storage system are good, and the feasibility of system construction is good, which provides a feasible scheme for the subsequent industrial production energy structure adjustment.

Keywords: carbon neutralization; cost-benefit model; life cycle; hydrogen energy storage; economic analysis