

# 多能互补电力系统碳排放及可靠性分析

董瑞<sup>1,2</sup>, 李星<sup>3</sup>, 高林<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 吴仲华学院, 北京 102206; 2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190; 3. 华电重工股份有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 随双碳目标提出, 我国需要加速构建安全经济低碳的电力系统, 然而高比例火电装机 CO<sub>2</sub> 排放量较大, 大规模可再生能源装机会导致电力系统可靠性变差, 接入储能和碳捕集设备可在一定程度上兼顾碳排放及系统可靠性的问题, 但同时也会导致发电成本升高。基于某能源基地分析了不同可再生能源装机比例下系统的碳排放强度及系统可靠性指标, 明确了不同技术路线下系统满足碳排放及可靠性约束时的碳捕集量及所需储能输出功率, 对比了统一碳排放及可靠性指标后的系统经济性。结果表明, 通过生物质耦合碳捕集技术, 可实现电力系统的零碳排放甚至负碳排放。储能可有效提高系统可靠性, 对于总装机 5 000 MW 系统, 可再生能源装机比例每升高 20%, 需接入功率 850~875 MW 的储能设备, 以满足系统可靠性要求。随着碳排放要求提高, 系统发电成本不断升高, 在满足碳排放和可靠性约束的前提下, 60% 可再生能源装机比例具有最高的经济性。

**关键词:** 多能互补系统; 碳排放强度; 可靠性评估; 发电成本; 碳捕集; 储能

中图分类号: TM715; TM712 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2022)08-0112-07

## Carbon emission and reliability analysis of multi-energy complementary power system

DONG Rui<sup>1,2</sup>, LI Xing<sup>3</sup>, GAO Lin<sup>2</sup>

(1. Wu Zhonghua College, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Huadian Heavy Industry Co., Ltd., Beijing 100160, China)

**Abstract:** With the proposal of the dual carbon goal, it is necessary to accelerate the construction of a safe, economical and low-carbon power system in China. However, a high proportion of thermal power installed capacity has high CO<sub>2</sub> emissions, and large-scale renewable energy installations will lead to poor reliability of the power system. The integration of energy storage and carbon capture equipment can take into account the issues of carbon emissions and system reliability to a certain extent, but at the same time, it will also lead to an increase in the cost of power generation. Based on an energy base, the carbon emission intensity and reliability indicators of the system under different renewable energy installed proportions were analyzed, and the carbon capture amount and the required amount of carbon capture were given when the system met the carbon emission and reliability constraints under different technical routes. The system economy after unified carbon emission and reliability indicators was compared. The results show that through biomass coupled carbon capture technology, zero carbon emission or even negative carbon emission can be achieved in the power system. Energy storage can effectively improve system reliability. For a system with a total installed capacity of 5 000 MW, for every 20% increase in the proportion of installed renewable energy, energy storage equipment with a power of 850–875 MW needs to be connected to meet the reliability requirements of the system. As carbon emission requirements increase, the cost of system power generation continues to rise, and the system has the highest economy at 60% of installed renewable energy under the premise of meeting carbon emission and reliability constraints.

**Key words:** multi-energy complementary system; carbon emission intensity; reliability assessment; generation cost; carbon capture; energy storage

收稿日期: 2022-03-07; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.22030702

基金项目: 北京市科技计划资助项目 (Z211100004521006)

作者简介: 董瑞 (1998—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生。E-mail: 15010279908@163.com

通讯作者: 李星 (1975—), 男, 河南焦作人, 高级工程师。E-mail: lix@chec.com.cn

引用格式: 董瑞, 李星, 高林. 多能互补电力系统碳排放及可靠性分析 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(8): 112–118.

DONG Rui, LI Xing, GAO Lin. Carbon emission and reliability analysis of multi-energy complementary power system [J].

Clean Coal Technology, 2022, 28(8): 112–118.



移动阅读

## 0 引 言

为应对全球变暖,极端天气等气候问题,我国在联合国气候大会上承诺 CO<sub>2</sub> 排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和,这对全球碳达峰与碳中和至关重要。由于我国富煤缺油少气的资源禀赋,高碳排放的煤电是我国目前主要发电方式,2020 年,我国电力行业碳排放为 42.5 亿 t<sup>[1]</sup>,是我国 CO<sub>2</sub> 排放最大的行业。

为达到“双碳”目标要求,我国必须改变现有能源利用方式,加速向绿色低碳能源转型,近年来我国火电装机量占比逐年下降,2020 年我国火电装机量占总装机量的 56.82%,相较 2015 年降低了 11.6 个百分点。而光伏与风电由于成本下降及政策原因,其应用近年来呈爆发式增长,2020 年新增装机容量分别达到了 4 820 万与 7 167 万 kW,占新增装机容量的 25.25% 和 37.55%<sup>[2]</sup>。大规模可再生能源的接入有效降低了 CO<sub>2</sub> 排放,但同时由于可再生能源出力的波动性与不确定性,电力系统的可靠性受到挑战。

唐浩等<sup>[3]</sup>针对风光互补的发电系统,以成本为约束条件,以更低的 CO<sub>2</sub> 排放强度为优化目标,搭建了计算模型并对其进行了容量配置优化。王晓兰等<sup>[4]</sup>建立了小型风光蓄联合发电系统的数学模型,将投资成本、系统可靠性及资源利用率作为优化目标,通过遗传算法得到了系统的优化资源配置方案;姜书鹏等<sup>[5]</sup>对风储联合发电系统建立了容量配置优化模型,以系统最大经济收益作为目标函数,结合系统技术评价指标,对影响容量配置的主要影响因素进行分析讨论。李健华等<sup>[6]</sup>对风光或联合发电系统的容量配置进行研究,考虑了出力随机性、水电出力季节性特点和现货价格等因素对发电系统容量配置的影响,并给出了合适的配置规划方法。

笔者选择系统可靠性和碳排放强度作为约束条件,通过接入储能及碳捕集设备,统一不同可再生能源装机比例系统的碳排放强度与可靠性指标,并对不同系统的经济性。结果表明,碳捕集和储能可有效降低系统碳排放并提高系统的可靠性,在满足碳排放及可靠性约束目标时,可再生能源比例 60% 左右的装机系统经济性最优。

## 1 多能互补系统设定

### 1.1 能源基地参数

以某风-光-火-储的能源基地为例,风电光伏

等低碳清洁能源可以有效降低系统 CO<sub>2</sub> 排放,火电及储能具有良好的调峰性能,能够在小时级别的时间尺度下对多能互补发电系统进行优化调度,以补偿光伏风电出力的随机性<sup>[6]</sup>,改善系统总出力曲线的平滑程度。该能源基地示意如图 1 所示,该能源基地的发电系统由超超临界燃煤空冷机组、陆上风电机组以及光伏电站共同组成,并接入了 CO<sub>2</sub> 捕集及储能设备。

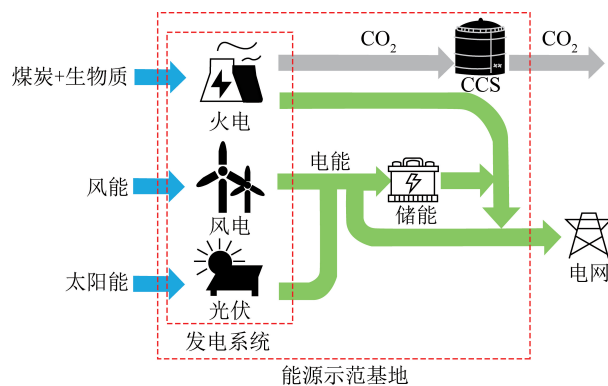


图 1 能源基地示意

Fig.1 Schematic of the energy base

在保证能源基地总装机容量不变的情况下,不同可再生能源装机比例的风-光-火装机容量见表 1。该能源基地的技术参数见表 2。

表 1 能源基地装机容量方案

Table 1 Installed capacity plan of energy base

可再生能源 装机占比/%	火电装机 容量/MW	光伏装机 容量/MW	风电装机 容量/MW
40	3 000	1 000	1 000
60	2 000	1 500	1 500
80	1 000	2 000	2 000
100	0	2 500	2 500

表 2 能源基地技术参数

Table 2 Technical parameters of energy base

能源	类别	参数
火电	煤种含碳量/%	60.33 <sup>[7]</sup>
	煤种热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	22 760 <sup>[7]</sup>
	生物质类型	玉米秸秆
	生物质含碳量/%	43.11 <sup>[8]</sup>
	生物质热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	15 740 <sup>[8]</sup>
	生物质热值比例/%	20
	机组效率/%	41.15 <sup>[9-10]</sup>
太阳能	太阳能利用技术	光伏
	故障率/(次·a <sup>-1</sup> )	0.83 <sup>[11]</sup>
	修复率/(次·a <sup>-1</sup> )	19.23 <sup>[11]</sup>

续表

能源	类别	参数
风能	风电利用技术	陆上风电
	故障率/(次·a <sup>-1</sup> )	7.96 <sup>[12]</sup>
	修复率/(次·a <sup>-1</sup> )	58.4 <sup>[12]</sup>
CO <sub>2</sub> 捕集	CCS 技术路线	燃烧后捕集
储能	储能技术路线	电池储能

光伏及风电的全年出力概率分布<sup>[13-14]</sup>如图2所示,不同技术成本见表3。

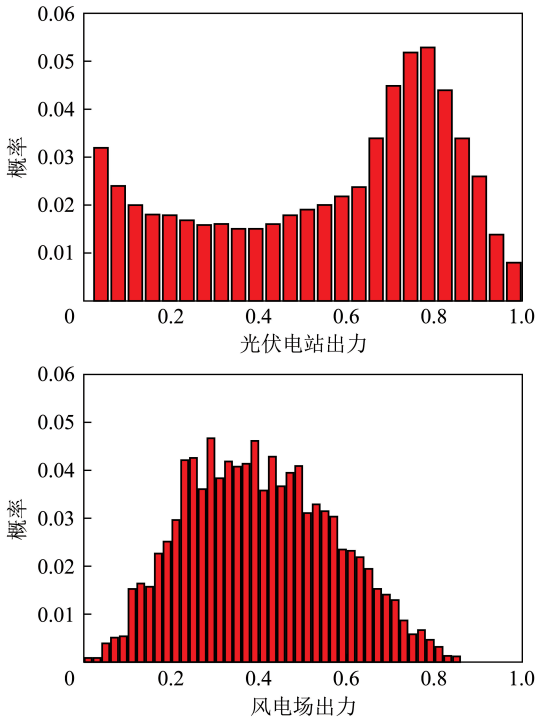


图2 光伏及风电的出力概率分布<sup>[13-14]</sup>

Fig.2 Output probability distribution of photovoltaic and wind power<sup>[13-14]</sup>

表3 各种能源的发电成本<sup>[15-17]</sup>

Table 3 Cost of electricity for various energy sources<sup>[15-17]</sup>

项目	数值
陆上风电成本/(美元·MWh <sup>-1</sup> )	58
光伏成本/(美元·MWh <sup>-1</sup> )	51
火电成本/(美元·MWh <sup>-1</sup> )	75
储能成本/(美元·MWh <sup>-1</sup> )	100
CCS成本/(美元·t <sup>-1</sup> )	41

## 1.2 碳排放和可靠性约束

### 1.2.1 碳排放约束

2020年,我国单位国内生产总值碳排放强度比2005年下降48.4%,超额完成承诺的40%~45%的目标,并于当年举行的气候雄心峰会上再次承诺,

2030年我国单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放将比2005年下降65%以上。电力行业的碳减排需要长时间的结构调整与技术突破,不同时期会有不同的碳排放指标要求。本文分别以300、100、0 g/kWh碳排放指标作为系统的碳排放目标约束。

### 1.2.2 可靠性约束

随着可再生能源装机比例提高,系统CO<sub>2</sub>排放量更低,然而受到气象条件的影响,光伏及风电的出力具有波动性及随机性,大规模接入会增加电力系统运行的波动。接入储能时,可以平抑这种输出波动,并作为应急电源减少停电概率。为定量描述不同电力系统的可靠性,需要对电力系统可靠性进行评估。目前我国新能源装机比例为43.5%,本文以40%可再生能源装机容量时的可靠性指标作为更高比例可再生能源装机比例系统的可靠性目标约束。

## 2 评估方法

### 2.1 电力系统碳排放评估方法

碳中和概念本质上是碳源与碳汇的平衡关系,根据高林等<sup>[18]</sup>对电力系统碳中和特性的研究,建立电力系统碳排放强度公式,具体为

$$I_c = E_N / \sum_{i=C,CN,CF} F_i \eta_i = \frac{44}{12} [R(1 - K_C) - (1 - R)K_{CN}] \sum_{i=C,CN} F_i C_i / \sum_{i=C,CN,CF} F_i \eta_i \quad (1)$$

式中, $I_c$ 为电力系统碳排放强度,表示电力系统产出单位发电量所排放的CO<sub>2</sub>量,kg/kWh; $E_N$ 为电力系统CO<sub>2</sub>净排放量,kg; $\eta_i$ 为不同发电技术的供电效率; $F_i \eta_i$ 为电力系统的总发电量,kWh; $R$ 为无量纲参数,表示该电力系统的输入能源中含碳能源含碳量占系统总输入碳量的比例; $K$ 为碳回收率,为电力系统内碳源排放的CO<sub>2</sub>中被系统内碳汇吸收的比例; $F$ 为消耗燃料总能量,取决于燃料消耗量与燃料热值,kJ; $C$ 为单位燃料能量的含碳量,取决于燃料种类,kg/kJ(以碳计);下标C、CN和CF分别为含碳、碳中性和零碳能源,其中含碳能源主要指化石能源,碳中性能源主要指生物质燃料,零碳能源主要指可再生能源。

### 2.2 电力系统可靠性评估方法

本文采用传统可靠性指标期望缺供电量 $T_{EENS}$ 来量化评估该多能源系统的可靠性<sup>[19]</sup>。

期望缺供电量 $T_{EENS}$ 为系统在给定时间区间内因发电容量短缺造成的缺供电量的期望值,具体为

$$T_{EENS} = \frac{8\ 760}{T} \sum_{i \in N} C_i t_i, \quad (2)$$

式中,  $N$  为仿真过程中所有电力不足状态的集合;  $t_i$  为电力不足状态的持续时间, h;  $C_i$  为电力不足状态的缺电量, kWh;  $T$  为总仿真时间, h。

光伏电站和风电场的可靠性模型通常由出力模型和运行状态模型 2 部分组成<sup>[20]</sup>:

$$P'(t) = P(t)\alpha(t), \quad (3)$$

式中,  $P'(t)$  为  $t$  时刻修正后的出力;  $P(t)$  为  $t$  时刻机组的出力;  $\alpha(t)$  为  $t$  时刻的运行状态系数。

由于机组之间距离较近, 气象条件的改变对不同机组影响基本一致, 为简化可靠性评估流程, 将整个光伏电站出力假设为一台光伏机组出力。

可靠性评估的蒙特卡洛模拟法通过计算机生成多个随机数, 重复模拟系统运行状态, 最终统计得到可靠性指标, 抽样次数越多, 样本均值越趋近系统期望, 从而得到系统的可靠性指标。通过对风光出力模型进行抽样, 得到风光出力序列。

状态持续时间抽样法是序贯蒙特卡洛模拟法中最常用的方法, 通过循环抽样设备的运行时间和故障时间模拟系统运行, 直到仿真年限为止。对于故障率、修复率均为常数的两状态模型来说, 其运行时间和停运时间均服从指数分布, 状态持续时间抽样法的步骤<sup>[21]</sup>为:

1) 假定各设备的初始状态均为正常状态。

2) 抽样每个设备的状态持续时间。当设备为正常状态时, 使用式(4)抽样元件的无故障工作时间  $T_{TF}$ ; 当设备为故障状态时, 使用式(5)抽样元件的故障修复时间  $T_{TR}$ :

$$T_{TF} = -\frac{1}{\lambda_1} \ln U_1, \quad (4)$$

$$T_{TR} = -\frac{1}{\lambda_2} \ln U_2, \quad (5)$$

式中,  $U_1, U_2$  为  $[0, 1]$  的随机数;  $\lambda_1$  为故障率, 次/a;  $\lambda_2$  为修复率, 次/a。

3) 对单个风机和光伏系统持续抽样, 直到状态序列长度满足仿真时限要求。

4) 将单个风机和光伏的运行状态序列图进行组合, 得到系统运行状态序列图, 对每个状态进行分析, 计算可靠性指标。

## 3 算例分析

### 3.1 技术路径

火电是我国目前主要的发电方式, 其中 99% 的碳排放来自化石能源燃烧过程<sup>[22]</sup>, 通过安装  $CO_2$  捕

集设备, 对火电厂烟气内  $CO_2$  进行捕集封存, 可以有效降低能源系统的碳排放强度, 目前主流电厂  $CO_2$  捕集技术包括燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧<sup>[23]</sup>。相较于风电光伏等可再生能源, 火电出力更加稳定, 高比例的火电可以有效保障电力系统的可靠性, 通过高比例火电装机和碳捕集的技术路线可以使电力系统满足碳排放及可靠性目标约束。

可再生能源的发电过程无  $CO_2$  排放, 提高可再生能源的比例, 替代火电等化石能源, 可以降低能源系统的碳排放强度。然而可再生能源如风电光伏等易受到天气状况影响, 系统出力不稳定, 可能导致系统出力不能满足用户需求。通过储能装置的“削峰填谷”作用, 可提高电网对可再生能源的接纳能力, 缓解负荷高峰期的缺电状况, 有效保障电力系统的可靠性, 所以高比例可再生能源装机和储能设备的技术路线可以使电力系统满足碳排放及可靠性目标约束。

生物质作为可再生能源, 其燃烧过程中虽然会产生  $CO_2$  排放, 但由于生长过程可以吸收  $CO_2$ , 从生物质能源的全生命周期考虑, 生物质能源发电不排放  $CO_2$ 。采用生物质发电并接入  $CO_2$  捕集设备, 可实现  $CO_2$  负排放, 且由于利用方式与火电类似, 系统出力稳定, 可以保障电力系统的可靠性, 所以生物质和碳捕集技术路线可以使电力系统满足碳排放及可靠性目标约束。

## 3.2 可靠性分析

### 3.2.1 可靠性特性分析

根据上述风电场及光伏电站可靠性模型, 基于 RTS-79 测试系统的负荷节点进行发电系统可靠性分析<sup>[24]</sup>, 系统总装机容量为 5 000 MW, 全年用户最高负荷为 4 185 MW, 抽样次数为 10 000 次。不同比例可再生能源装机时的可靠性指标如图 3 所示。

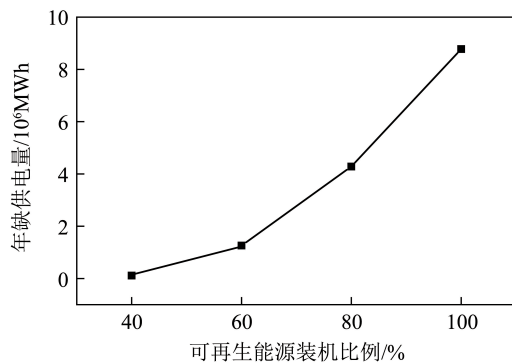


图 3 可再生装机比例与可靠性的关系

Fig.3 Relationship between proportion of renewable installed capacity and reliability



由图3可知,随着可再生能源比例增加,可靠性指标逐渐升高,系统可靠性不断降低,且随着可再生能源比例增加,期望缺供电量上升速度加快。储能通过自身调峰作用,在能源系统出力不能满足负荷需求时放电,可有效提高系统可靠性,可再生能源装机比例为60%时,接入不同输出功率储能设备时的可靠性指标如图4所示。

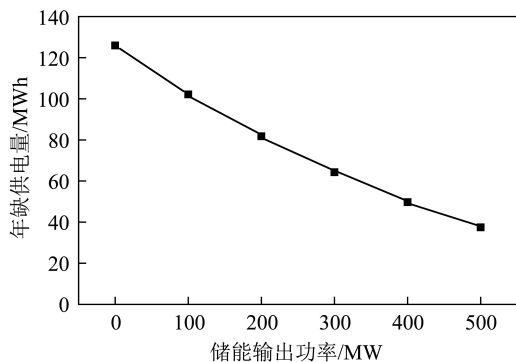


图4 储能输出功率与可靠性的关系

Fig.4 Relationship between energy storage output power and reliability

由图4可知,随储能输出功率的增加,该系统的可靠性指标下降,电力系统的可靠性增加。但可靠性指标下降速度降低,说明随储能设备功率增加,相同输出功率的储能设备对系统可靠性的提升效果降低。

### 3.2.2 可靠性约束分析

以40%可再生能源装机比例的可靠性指标作为系统约束,以25 MW储能输出功率为单位,分析不同可再生能源装机比例的系统满足可靠性指标要求所需的储能输出功率。不同可再生能源装机比例系统及一定储能输出功率时的可靠性指标见表4。

表4 满足可靠性约束的储能输出功率

Table 4 Energy storage output power satisfying reliability constraints

可再生能源装机比例/%	储能输出功率/MW	$T_{EENS}/(MWh \cdot a^{-1})$
40	—	110 560
60	—	1 259 302
60	850	110 415
80	—	4 281 024
80	1 725	108 337
100	—	877 279
100	2 600	110 485

高比例可再生能源装机系统在接入一定输出功率的储能后,系统均可满足可靠性指标的要求,实现

了不同系统可靠性的统一。该能源基地中可再生能源装机比例每升高20%,需接入850~875 MW输出功率的储能,以保证系统的可靠性。

## 3.3 碳排放分析

### 3.3.1 碳排放特性分析

为研究不同装机比例及技术路线对碳排放强度的影响,基于所建立的模型,得到不同技术路线及不同可再生能源装机比例时的系统碳排放强度如图5所示。

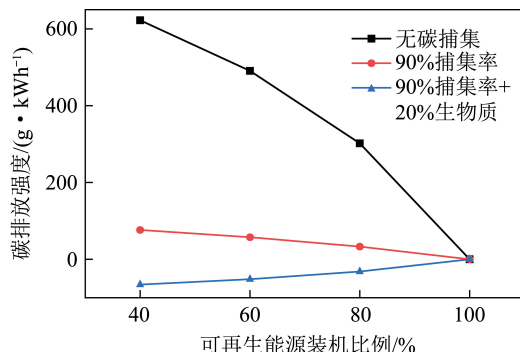


图5 不同技术路线的碳排放强度

Fig.5 Carbon emission intensity of different technology routes

由图5可知,随着可再生能源装机比例提高,火电发电量占比降低,碳排放强度降低。在接入碳捕集设备后,系统的碳排放强度大幅降低,且采用20%生物质掺烧后,系统实现了负碳排放。

### 3.3.2 碳排放约束分析

通过碳捕集和采用生物质燃料的方式可以降低能源系统的碳排放强度,在满足碳排放约束目标时,不同可再生能源装机占比可采用的CO<sub>2</sub>捕集率及生物质热值占比见表5。

表5 满足碳排放约束的碳捕集率及生物质比例

Table 5 Carbon capture rate and biomass proportion to meet carbon emission constraints

碳排放约束/(g · kWh <sup>-1</sup> )	可再生能源装机比例/%	碳捕集率/%	生物质热值占比	CO <sub>2</sub> 捕集量/万t
0	40	90.00	0.103	1 245.3
	60	90.00	0.103	936.1
	80	90.00	0.103	504.3
100	100	—	—	0
	40	86.30	0	1194.0
	60	83.20	0	862.4
300	80	69.20	0	386.4
	40	56.40	0	780.4
	60	43.10	0	446.7
	80	0.69	0	3.8

由表 5 可知,碳排放约束目标为 300 g/kWh 时,可再生能源装机比例需达 80% 左右,而更低的可再生能源装机比例则需进行 CO<sub>2</sub> 捕集。碳排放约束目标为 100 g/kWh 时,则需要更高比例的可再生能源装机或更高的 CO<sub>2</sub> 捕集率。而要达到零碳排放时,则需将可再生能源装机比例增至 100% 或采用一定比例生物质燃料并通过碳捕集的方式完成。

### 3.4 不同路径的经济分析

通过上述分析,储能设备的接入可以有效提高系统可靠性,而碳捕集设备可以降低系统的碳排放强度。以 40% 可再生能源装机比例系统的期望缺供电量  $T_{\text{EENS}}$  作为可靠性约束目标,分析在 300、100 和 0 g/kWh 碳排放约束目标下的发电成本。在不同可再生能源装机比例下,系统满足可靠性和碳排放约束目标时的发电成本见表 6,可知在满足可靠性及碳排放约束时,60% 可再生能源装机比例系统的发电成本最低。而随着碳排放约束目标的降低,发电成本不断升高。

表 6 可靠性及碳排放约束下的发电成本

Table 6 System costs to meet reliability and carbon emission constraints

装机比例/%	发电成本/(美元·MWh <sup>-1</sup> )		
	300 g/kWh	100 g/kWh	0
40	83.94	91.57	92.51
60	80.5	88.57	89.99
80	84.54	93.03	95.65
100	—	—	112.86

## 4 结 论

1) 碳捕集和高比例火电装机、提高可再生能源装机、生物质和碳捕集 3 种技术路线均可降低碳排放并满足系统可靠性要求,但碳捕集和高比例火电装机的技术路线无法实现零碳排放,提高可再生能源装机的路线可以实现零碳排放但会降低系统的可靠性,需接入大量储能设备;生物质和碳捕集的技术路线在一定生物质比例时可以实现零碳排放,继续提高生物质比例可以实现负碳排放。

2) 储能可有效提高系统可靠性,但随着储能输出功率的增加,相同输出功率的储能设备对系统可靠性的提升效果降低;对于总装机 5 000 MW 的系统,可再生能源装机比例每升高 20%,需接入功率 850~875 MW 的储能,保证系统满足可靠性指标的要求。

3) 随着碳排放要求提高,系统发电成本不断升

高。在系统可靠性及碳排放约束目标一致的情况下,60% 可再生能源装机比例的能源系统经济性最高。

### 参考文献(References):

- [1] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告 2021[EB/OL].(2021-07-08)[2022-03-06].https://cec.org.cn/detail/index.html?3-298413.
- [2] 国家统计局.2020 中国统计年鉴[R].北京:中国统计出版社,2020.
- [3] 唐浩,杨国华,王鹏珍,等.基于 CO<sub>2</sub> 排放量的风光互补发电系统容量优化配置[J].电力建设,2017,38(3):108-114.  
TANG Hao, YANG Guohua, WANG Pengzhen, et al. Capacity optimal configuration of wind/PV hybrid power system based on carbon dioxide emission[J]. Power Construction, 2017, 38(3): 108-114.
- [4] 王晓兰,刘立强,梁琛,等.基于 VEGA 的风光蓄联合发电系统多目标容量优化[J].电源技术,2016,40(4):840-843.  
WANG Xiaolan, LIU Liqiang, LIANG Chen, et al. Multi-objective capacity optimization for wind-solar-battery hybrid power system based on VEGA[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(4): 840-843.
- [5] 姜书鹏,乔颖,徐飞,等.风储联合发电系统容量优化配置模型及敏感性分析[J].电力系统自动化,2013,37(20):16-21.  
JIANG Shupeng, QIAO Ying, XU Fei, et al. Capacity optimization and sensitivity analysis of cogeneration system of wind power and energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 16-21.
- [6] 李健华,刘继春,陈雪,等.含可再生能源的多能互补发电系统容量配置方法[J].电网技术,2019,43(12):4387-4398.  
LI Jianhua, LIU Jichun, CHEN Xue, et al. Capacity allocation of multi-energy complementary system including renewable energy[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4387-4398.
- [7] 李淳.1 000 MW 超超临界“反向双切圆”火焰锅炉低热值煤种燃烧特性分析[C]//中国动力工程学会 600/1 000 MW 超超临界机组技术交流 2010 年会论文集.温州:中国动力工程学会,2010:399-405.
- [8] 赵丽萍,张彪,王鑫,等.不同种类生物质原料的微波气化性能研究[J].太阳能学报,2021,42(9):394-399.  
ZHAO Liping, ZHANG Biao, WANG Xin, et al. Study on gasification performance of different kinds of biomass with microwave heating[J]. Acta Energetica Solaria Sinica, 2021, 42(9): 394-399.
- [9] 张晓东.1 000 MW 级空冷汽轮机性能分析[D].济南:山东大学,2012.
- [10] 包劲松,孙永平.1 000 MW 机组变负荷运行经济性比较分析[J].浙江电力,2011,30(4):1-3.  
BAO Jinsong, SUN Yongping. Economical comparison and analysis on variable load operation of 1 000 MW units[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(4): 1-3.
- [11] 唐景星,黄民翔,景伟强,等.含并网光伏电源的配电网可靠性评估[J].华东电力,2011,39(2):266-270.  
TANG Jingxing, HUANG Minxiang, JING Weiqiang, et al. Relia-

- bility evaluation of distribution network with grid-connected photovoltaic system[J]. East China Electric Power, 2011, 39(2): 266-270.
- [12] 蒋程,刘先正.风电机组出力的概率性评估[J].现代电力, 2013, 30(1): 51-54.  
JIANG Cheng, LIU Xianzheng. Probabilistic assessment on the output power of wind turbine[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(1): 51-54.
- [13] 赵铁军,孙玲玲,牛益国,等.基于改进非参数核密度估计的光伏出力概率分布建模方法[J].燕山大学学报, 2021, 45(5): 430-437.  
ZHAO Tiejun, SUN Lingling, NIU Yiguo, et al. Photovoltaic output modeling based on improved non-parametric kernel density estimation[J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(5): 430-437.
- [14] 梁海峰,曹大卫,刘博,等.风电场概率分布模型建模及误差分析[J].华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 8-14.  
LIANG Haifeng, CAO Dawei, LIU Bo, et al. Modeling and error analysis of wind farm probability distribution model[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44(3): 8-14.
- [15] IEA. Projected Costs of Generating Electricity 2020[R]. Paris: IEA, 2020.
- [16] HU B, ZHAI H. The cost of carbon capture and storage for coal-fired power plants in China[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017, 65: 23-31.
- [17] 何颖源,陈永翀,刘勇,等.储能的度电成本和里程成本分析[J].电工电能新技术, 2019, 38(9): 1-10.  
HE Yingyuan, CHEN Yongchong, LIU Yong, et al. Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(9): 1-10.
- [18] 高林,郑雅文,杨东泰,等.构建碳中和电力系统:碳中和公式[J].科学通报, 2021, 66(31): 3932-3936.  
GAO Lin, ZHENG Yawen, YANG Dongtai, et al. Critical equation of carbon neutrality for power systems[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(31): 3932-3936.
- [19] 王灿.考虑大规模新能源接入的电网规划评价指标研究[D].北京:华北电力大学, 2015.
- [20] 王皓.含高比例可再生能源的发电系统可靠性评估[D].北京:华北电力大学, 2020.
- [21] 何洛滨.含分布式电源的配电网可靠性建模与供电可靠性研究[D].北京:北京交通大学, 2018.
- [22] 刘高军.碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放分析与建议[J/OL]. 洁净煤技术: 1-8 [2022-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211209.0713.012.html>.  
LIU Gaojun. Carbon emission analysis and suggestions for thermal power plants in the context of carbon neutral carbon peaking[J/OL]. Clean Coal Technology: 1-8 [2022-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211209.0713.012.html>.
- [23] 步学朋.二氧化碳捕集技术及应用分析[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(5): 9-13, 19.  
BU Xuepeng. CO<sub>2</sub> capture technologies and application[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 9-13, 19.
- [24] 程林,何剑.电力系统可靠性原理和应用[M].北京:清华大学出版社, 2015.