

## 新型电力系统下的储能解决方案探讨

蔡绍宽

引用本文:

蔡绍宽. 新型电力系统下的储能解决方案探讨[J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 17–23.

CAI Shaokuan. Discussion on Energy Storage Solutions Under the New Power System[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(增刊1): 17–23.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 热电联产机组的电力调峰运行模式研究

Research of Cogeneration Units Acting on Electric Peak-shaving Operating Mode

南方能源建设. 2015(3): 51–56 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.010>

#### 抽水蓄能电站与火电厂联合优化运行分析

Analysis of Combined Optimal Operation of Pumped Storage Power Plants and Thermal Power Plants

南方能源建设. 2018, 5(3): 61–66 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.009>

#### ASON智能光通信网络在电力系统业务保护/恢复的研究与应用

Research and Application of ASON Intelligent Optical Network in the Power System Service Protection and Restoration

南方能源建设. 2017, 4(z1): 89–96 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.017>

#### 500 kV江门变电站不停电改造关键技术分析

Key Technology of Live Retrofit in 500 kV Jiangmeng Substation

南方能源建设. 2015, 2(z1): 244–248 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.054>

#### 饱和铁心型超导限流器应用技术研究

Application Technology Research on Saturated Iron-core Superconducting Fault Current Limiter

南方能源建设. 2015, 2(2): 91–95 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.017>

# 新型电力系统下的储能解决方案探讨

蔡绍宽<sup>✉</sup>

(中国海洋工程咨询协会海上风电分会, 北京 100161)

**摘要:** [目的] 随着碳达峰、碳中和的推进, 新型电力系统将逐步形成。新型电力系统以风电和光伏发电为主要构成。由于风电及光伏发电具有波动性、随机性、间歇性等特点, 电力系统所必需的“实时平衡、稳定运行”将面临前所未有的难题。要想解决此难题, 根本出路在于规模化、市场化的储能技术。[方法] 基于中国能源发展形势, 着重探讨了储能解决方案, 从技术可行性、市场化可行性、资源满足率、规模化前景四个方面, 剖析了储能技术路线。[结果] 从当前技术水平来看, 兼具“技术可行性、经济可市场化、前景可规模化”的只有抽水蓄能、化学储能、氢储能三种储能形式。真正能够广泛应用的储能措施是化学电池储能、抽水蓄能两种储能形式和抽水蓄能电站、化学电池储能电站、换电站三种应用场景。面对“实时平衡、稳定运行”的问题, 应该以抽水蓄能电站、化学储能电站、换电站、风光冗余装机四方面组合的解决方案为主, 其他储能和调节措施为辅。[结论] 新能源及储能产业将迎来高速发展时代。文章提出的新型电力系统储能解决方案对双碳目标的实现具有重要的理论指导意义。

**关键词:** 碳达峰; 碳中和; 新型电力系统; 储能; 应用场景

中图分类号: TM7; F426

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S1-0017-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Discussion on Energy Storage Solutions Under the New Power System

CAI Shaokuan<sup>✉</sup>

(China Offshore Wind Association, China Association of Oceanic Engineering, Beijing 100161, China)

**Abstract:** [Introduction] With the advancement of carbon peak and neutrality, the new power system will gradually form. The new power system is mainly composed of wind power and photovoltaic power generation. Due to the volatility, randomness and intermittence of wind power and photovoltaic power generation, the "real-time balance and stable operation" necessary for the power system will face unprecedented problems. To solve this problem, the fundamental way is to scale, market-oriented energy storage technology. [Method] Based on China's energy development situation, energy storage solutions were emphatically discussed, and six technical routes of the two types of energy storage were analyzed from four aspects of technical feasibility, market feasibility, resource satisfaction rate and scale prospect. [Results] From the current technical level, only pumped storage, chemical energy storage and hydrogen energy storage have the technical feasibility, economic marketization and prospect of scale. The energy storage measures that can be widely used are chemical battery energy storage and pumped storage, and the three application scenarios of pumped storage power station, chemical battery energy storage power station and power exchange station. In the face of the problem of real-time balance of supply and demand in the "real-time balance and stable operation", the solution should be based on the combination of pumped storage power station, chemical energy storage power station, switching power station and wind-solar redundant installed machine, and other energy storage and adjustment measures should be supplemented. [Conclusion] The new energy and energy storage industry will usher in an era of rapid development. The new power system energy storage solution proposed in this paper has important theoretical significance for the realization of the carbon peak and neutrality.

**Key words:** carbon emission peak; carbon neutrality; new power system; energy storage; application scenarios

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-03-21 修回日期: 2022-05-18

基金项目: 广东省促进经济发展专项基金(海洋经济发展用途)“广东省海洋六大产业三年行动计划方案制订”粤自然资源合[2019]013号

## 0 引言

为达成“碳达峰、碳中和”的双碳目标，文献[1]阐述了未来能源利用发展的路线是逐步全部实现“一次能源零碳化，二次能源电力化”。中国电力系统的最终发展方向是零碳电力能源彻底替代排碳电力能源。因此，解决各阶段“零碳电力满足率”和电力系统“实时平衡、稳定运行”的两大难题，就能解决全社会零碳能源利用难题。但是，当新型电力系统逐步形成，即传统火电逐步退役而风光发电占主要构成时，储能将大量使用以改善电力系统发、用两侧特性曲线，改变发电与用电的时空关系，即大幅改变电力“必须产供销同时发生”的行业特性，新的难题将随之产生。该难题在本质上是如何调节供给侧的电源发电特性和用户侧的用电特性从而实现电力系统发、损（耗）、用的实时平衡问题。

可以预见，随着双碳目标的逐步推进，传统电力系统中“最好用”的煤电、燃气电等排碳电源不得不逐步全部退出历史舞台。这是环境保护发展的必然趋势，也是中国乃至全世界能源结构调整发展的总趋势。如果仍需留存少量排碳电能，那可能是出于环境保护考虑而存在的垃圾处理措施——垃圾发电<sup>[2]</sup>。随着新型电力系统的逐步形成，“最不好用”的风电、光伏将走向能源舞台的中央，成为不可替代的主角。总量巨大又极端分散的光伏发电和风力发电具有波动性、随机性和间歇性，电能质量低，将给新型电力系统必需的“实时平衡、稳定运行”要求和保护大气环境带来前所未有的严峻挑战。新型电力系统将是极其巨大、极其复杂、高度智能化的，其电源构成、电网结构、高智能调控系统将呈现全新特征。大数据、云平台、5G以上通讯网络、超级计算、智能电网、超大规模储能系统，是实现新型电力系统“实时平衡、稳定运行”的六大支撑。其中，储能最具基础性<sup>[3]</sup>，本文着重探讨储能解决方案。

为了将储能形式选择这一非常复杂又充满争议的问题说清楚，我们需要明确几个相关概念。

**需求侧管理：**对综合用电负荷特性曲线进行调整干预以改善负荷用电特性，实现节能降耗，解决用能总量降低、用能特性改善需求问题。

**电源侧管理：**对综合发电特性曲线进行调度干

预以改善各电源群的总体发电特性，可以配置储能，解决一般情况下的发电能力的时空转换问题。传统电力系统条件下，抽水蓄能的运行方式是抽水用电以填负荷“谷”，放水发电以补电源“峰”。在新型电力系统条件下，光伏、风电生产巨量的尖峰电力电量而自身又完全没有调节能力，因此电源也需要“削峰”，且唯一的削峰措施是储能。

**发、输、变、配、供系统平衡管理：**在电力系统中需求侧管理、供给侧管理和电力系统最佳储能配置这三大措施并用。具体方法有最优调度、储能站配置和电价调剂措施（峰谷电价、阶梯电价等<sup>[4]</sup>）。

## 1 储能形式

当前热点储能形式众多，其中绝大多数都不兼具技术、经济、规模化的条件，若不识别清楚，将落入投资陷阱，也会使储能的发展道路艰难曲折。

### 1.1 天然储能形式

以物理形态划分，大自然中天然存在的储能形式有太阳能、风能、水势能、波浪能、洋流能、潮汐能、温差能、地热能、核能、生物质能、煤、石油、天然气（含页岩气）共十三种。根据储能性质可以将其归纳为化学储能、物理储能、生物储能三种储能方式。

地球的所有天然能源都来源于太阳能，即我们能利用的天然能源都是在太阳的作用下大自然活动形成的。自然界中天然存在的储能能源被统称为一次能源，非自然存在而是由人类加工将一次能源转换而成的能源，根据其转换次数，被称为二次能源、三次能源、四次能源、……、N次能源。

### 1.2 人工储能形式

众所周知，能源的每一次形式转换都有损耗，损耗的多少和转换效率有关。目前人类使用的能源绝大部分都是二次能源（如电力能、热能）。因此，只要不是二次能源，我们都视其为耗能负荷。其中一部分耗能负荷在耗能的同时具有“储能、调节”功能，即可以改变能源利用的时空关系，使能源利用更加符合人类社会活动的应用目的和应用场景。这种功能是储能资源存在并发挥重大价值的根本原因。能源结构正在发生深刻的变化，储能问题愈发重要，在新型电力系统实现“实时平衡、安全稳

定”方面扮演着举足轻重的角色。

任何储能形式都存在无法回避的四大问题，即技术是否简易可行问题、转换效率产生的能耗问题、储能产业链的经济代价问题及环境影响问题。本文将三次及以上人工储能形式的应用场景和价值（规模价值、经济价值）作为讨论的重点。

### 1.2.1 化学储能

常见的天然化学储能有煤、油、气等，它们作为一次能源被利用的主要方式是燃烧转变为热能。天然储能不是文章讨论的重点。本文着重讨论的是人工化学储能，包括化学电池储能、氢储能、液化二氧化碳储能等。

### 1.2.2 物理储能

常见的天然物理储能有水能（含陆地水能、波浪能、洋流能、潮汐能）、风能、光能、热能（含地热能）、核能、温差能等。这些都有一次能源，不是文章讨论的重点。本文着重讨论它们被人工利用的方式，主要是转化为机械能然后再利用。人工物理储能主要有抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等。从规模化应用的角度分析，只有抽水蓄能具研究价值。

### 1.2.3 电磁储能

电磁储能主要靠建立磁场或电场存储电能，主要储能形式有超导磁储能、超级电容储能。由于电磁储能难以规模化，不将其作为讨论的重点。

### 1.2.4 生物储能

常见的生物储能有树木、草、秸秆、动物能等。生物储能的利用主要是燃烧释放能量。从环境保护的角度来看，将来唯一能长期存续的生物能源是垃圾发电，但是垃圾发电厂的主要作用是垃圾处理，用能仅仅是其副产品。因此，本文不把生物储能纳入讨论范围。

综上所述，有研究价值的储能形式主要是人工化学储能和人工机械储能，即化学电池储能、氢储能、液化二氧化碳储能、抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等<sup>[5]</sup>。其中，兼具“技术具可行性、经济可市场化、前景可规模化”的只有抽水蓄能、化学储能、氢储能三种人工储能形式。

## 2 转换效率与市场化可行性比较

储能技术的种类及其特点如表1所示。

表1 储能技术的种类及其特点

Tab. 1 Types of energy storage technologies and their chara

储能技术分类	储能技术	优势	劣势	主要应用领域
电化学储能	液流电池	循环次数多能量转换效率高	能量密度低体积较大国内技术不成熟	主要在国外应用)与分布式电源配合、偏远地区供电
	钠硫电池	高的能量和功率密度	能量价格高	需电力系统储能电站(国外)
	锂离子电池	转换效率高高的能量和功率密度能量转换效率高	要特殊防护造价相对较高大量使用需要安全防护	2011年8月起已经停止使用电力系统储能电站、航空航天、军用领域、电动汽车、电子设备、
	镍氢电池	能量转换效率高	单体容量小	微电网 电动汽车、电子设备
电磁储能	铅酸电池	技术成熟、价格低	使用寿命短	通信系统、电动汽车、微电网
	超导储能	使用寿命长、功率密度大	技术不成熟,能量密度低	
机械储能	超级电容器	使用寿命长、功率密度大	能量密度低,单体容量小	军用领域、UPS不间断供电、轨道交通
	抽水储能	使用寿命长、储能总容量大	对场地有特殊要求	电力系统调峰调频
	大型压缩空气	使用寿命长、储能总容量大	对场地有特殊要求	(主要在国外应用)电力系统调峰调频
	微型压缩空气	使用寿命长	能量密度低	微电网 UPS
	飞轮储能	使用寿命长功率密度大	能量密度低、价格高	UPS不间断供电

由表1可知，储能技术运用非常广泛。在化学储能方面，具有规模化实用价值的产品有铅酸电池、锂电池（含磷酸铁锂电池）、镍镉电池、镍氢

电池、钠硫电池、液流电池等<sup>[6]</sup>。从能量和功率密度、转换效率、技术成熟度、使用寿命、性价比五个维度衡量，锂电池、钠电池、镍电池三个系列在



电池性能及其增效前景方面具备纳入比较的条件。在机械储能方面，只有抽水蓄能具有研究价值。

在新型电力系统下主要储能系统的应用场景有：(1) 与分布式电源配合形成发、储一体化的离网独立供电；(2) 储能电站（独立储能电站、源网储、源网荷储系统）；(3) 电动汽车（充电站、换电站）；(4) 通讯；(5) UPS 不间断电源；(6) 微电网……。

以下，我们从技术可行性、市场化可行性（标志是经济性：无补贴情况下的运作模式、盈利模式）、资源满足率、规模化前景四个方面，剖析上述储能类型的技术路线。

## 2.1 化学电池储能

为了方便研究，以化学电池推动电动汽车为代表的路线作为研究的应用场景，即：电网——电池充电——电池放电驱动电动机牵引汽车行驶。第一环节，用电力系统供电向电池充电，将电能转化为电池的化学能，能量转换效率一般为90%；第二环节，将电池化学能转化为电能传递转化为机械能，能量转换效率一般为90%；则将电力系统所供电力转化为汽车有效动力的能量转换效率为81%。（相关资料表明，由化学电池储能建立的储能电站，其充电储能到发电上网的转换效率为85%。后端的电能使用还有网损及终端用户用能的转换损耗，本文不进行讨论。

### 1) 原理

电化学储能主要是通过氧化还原化学反应进行能量的存储和释放。

### 2) 能源转换效率

转换与使用路线为电能——化学能（充电效率90%）——放电转换为机械能（效率90%），综合转换效率为 $90\% \times 90\% = 81\%$ 。

### 3) 成本

综合成本=用电成本（购电电价/0.81）+投资成本+运维成本=1.23倍购电电价+（电池购入成本+充电设施成本）+运维成本

### 4) 耗能

消耗能源=100%-81%=19%

## 2.2 氢储能

### 2.2.1 氢储能在电力系统中利用的作用定位

首先，我们必须清楚氢能不是能源，只能是储

能方式之一。氢在天然情况下不能独立存在，无论制氢采用的是什么技术路线，都是用能量打开氢化物的水分子中的化学键才能产生氢，所以生产过程必然耗能。制氢技术路线的比较，只是耗能多少的比较、是否排碳的比较、直接排碳（灰氢、蓝氢）和间接排碳（排碳电能电解水制氢）的比较、零碳电能制氢的比较。所以，氢能，不是“能源”，更不是“终极能源”。灰氢，由于碳排放属于逐步归零的技术路线前景黯淡。蓝氢，由于看不到可以市场化经济性前景应予排除。绿氢，“绿色电能、电解水”两头绿，由于其技术路径为“绿色能源——电——绿氢——电”，氢电属于四次能源，需经三次转换，每一次转换都要付出“损耗+经济代价”，故有耗能特性和经济性差两大特点，所以氢能不是“能源”，应划入负荷侧，即需求侧，其经济性差，不得已才使用。氢能在电力系统中的作用是“储存、调节”，本文关于“氢能”讨论的重点是氢能的储能特性、应用场景、在新型电力系统储能调节需求中的“结构、定位与地位”，其中，从原理逻辑链上分析其经济指标，看氢储是否可能会有市场化经济比较优势，从而能否作为新型电力系统的主要储能形式之一。

### 2.2.2 技术经济指标分析

“两头绿”制氢到氢电堆推动汽车的能量转换路线为一次零碳能源——电能——氢（化学能）——氢电能——机械能。

以下我们共同来分解一下氢能电动汽车的技术路线图。从传统能源转换的学术论述角度划分，自然界天然存在的能源被称为一次能源，如水、风、光、煤、油、气等；电厂（场、站）利用一次能源发出的“电”称为二次能源；将电力系统的电用于制氢，是将电能转换为氢的“化学能”，因此“氢能”成为了三次能源；氢能在被使用过程中主流使用方式是通过燃料电池将化学能转换为电能，氢电能成为了四次能源；最后氢电能通过电动机转化为机械能实现最终利用，完成技术路线的最终环节。

然后再来剖析以电力为起点的能量转换效率。据相关资料描述，当前技术水平，电能制氢转换为氢化学能的转换效率为50%~55%，随着技术进步，据一些涉氢科学家预测，未来可能将转换效率提高到70%~80%；氢燃料电池将氢化学能转换为

氢电能的转换效率为50%；电动汽车的电能转换为机械能的转换效率技术指标为90%。可见全技术路线的总转换效率为55%（或80%） $\times$ 50% $\times$ 90%=24.75%（或36%）。

零碳电氢储能技术路线能源转换效率为25%~36%。因此，零碳电氢储能付出的能耗是所有储能技术路线中最高者。

以下，我们再来剖析零碳电氢储能的经济性情况。氢能利用技术路线分制氢——储运——释放与加注——使用。从当前技术水平出发，制氢、储运、释放与加注三大环节成本大略相当，即各占总成本的三分之一。前已述及，用电成本为能量转换效率55%（或80%） $\times$ 50%=27.5%（或40%），故导致零碳电氢制氢用电成本至少为电网供电电价的三至四倍，此外还应加上制氢工业成本，据部分业内人士估算，当前我国制氢电电价最高承受极限电价为0.15元/kWh。从以下的分析可以看出来，显然，市场中不会有那么低的规模化电量电价。

基于成本制约因素，有人提出了一个重要的新理念：关于是否可利用风光发电中电网难以调度消纳的弃风限光的部分弃用电量，去实现低成本制氢，同时解决制氢成本高和弃风、限光两大难题的思路，应该说，这个思路的出发点和归宿目标都是一个很好的新概念，但是这是否可行呢？通过研究，答案是否定的。基于两个原因：一是电解水制氢必须连续生产且生产利用小时很高，与弃风、弃光部分风光电的间断性特征明显、利用小时很低的技术特性不匹配；二是电解水制氢要求盈亏点的经济规模很大。下面我们进一步深入分析解剖综合技术经济可行性。

因为研究目标为电力系统储能，且需各生产环节均为零碳，所以以零碳电能电解水制绿氢及氢燃料电池最后驱动汽车的技术路线为研究应用场景。

#### 1) 原理

技术路线为绿色电能——氢（化学能）——电能（发电）——机械能（氢能汽车）。

#### 2) 能源转换效率

第一环节，电能——氢化学能（制氢能量转换效率50%~55%，预测技术进步最终可能达到

70~80%）；

第二环节，氢化学能——发电（燃料电池转换效率50%）；

第三环节，氢电能——机械能（转换效率90%）；

则综合转换效率为55%（或80%） $\times$ 50% $\times$ 90%=24.75%（或36%）。

#### 3) 成本构成及用电成本

总成本=购电成本+制氢成本+燃料电池成本+氢储运成本+加氢设施成本+运维成本  
 =购电成本/24.75%（或36%）+制氢成本+燃料电池成本+氢储运成本+加氢设施成本+运维成本  
 =4.04（或2.78）倍购电成本+制氢成本+燃料电池成本+氢储运成本+加氢设施成本+运维成本  
 >4.04（或2.78）倍购电成本

#### 4) 耗能

自身（电——氢——电转换环节）消耗能源=100%-24.75%（或36%）=75.25%（或64%）。

其中，未含产业各环节的运维耗能（电），但在这个业务体系中这部分是不可忽略的。

### 2.3 抽水蓄能

1) 原理为电能——水势能（抽水）——电能。

2) 综合转换效率为75%。

3) 成本=购电成本/75%+运维成本=1.33倍购电成本+产业成本+运维成本。

#### 4) 耗能

自身消耗能源为25%。车间耗能（厂用电）比常规水电站厂用电略低，即产业车间耗能很低，几乎可以忽略不计。

### 2.4 综合比较

为了简化表达，化学电池储能简化为“化学储能”，抽水蓄能简化为“抽蓄”，氢储能简化为“氢储”，则：

1) 转换效率带来的价格差异

以下以购电价格倍比关系表述价格比较关系：

因：转换效率 化学储能（81%）>抽蓄（75%）>氢储（24.75%或36%）；

故：购电价倍比 化学储能（1.23倍购电价）<抽蓄（1.33倍购电价）<氢储（4.04或2.78倍购

电价)。

能耗比较: 化学储能能耗 (19%) < 抽蓄 (25%) < 氢储能 (75.25% 或 64%)。

### 2) 购电电价差带来的价格差距进一步拉大

化学储能和抽水蓄能都是以间断性用电储能, 即削峰 (电源尖峰部分发电负荷用电) 填谷 (负荷低谷时段用电) 方式用电, 可以确保用电力系统的峰谷电价中的最低时段电价。

氢储能生产使用系统而言, 由于两个方面的原因使其必须连续生产: 一是技术原因, 电解水制绿氢必须连续生产, 且利用小时要求较高; 二是经济原因, 氢生产规模需要达到盈亏点平衡规模以上。因此, 绿氢制备所用于储能的平价电价远高于化学储能和抽水蓄能的储能电价。

以中国某区域的负荷高峰时段电价 0.50 元/kWh 和低谷负荷时段电价 0.25 元/kWh 作为化学储能和抽水蓄能购买的储能电价计算电价水平, 以该地区平价电价 0.40 元/kWh 为制氢储能购买的储能电价计算电价水平, 结果如下。

化学储能: 购电电费 =  $1.23 \times 0.25 \text{ 元/kWh} = 0.3075 \text{ 元/kWh}$

抽蓄: 购电电费 =  $1.33 \times 0.25 \text{ 元/kWh} = 0.3325 \text{ 元/kWh}$

氢储: 购电电费 =  $4.04 \text{ (或 } 2.78) \times 0.40 \text{ 元/kWh}$   
= 1.616 (或 1.112) 元/kWh

### 3) 产业链成本比较

抽水蓄能电站。一般单位千瓦投资在 5 500 元/kWh 左右, 抽水利用小时在 1 200 ~ 1 300 h, 发电利用小时在 850 ~ 950 h;

化学储能电站。由于其运行的极端灵活性, 在具有超大量的光伏发电电源的新型电力系统中, 可以安排其充电状态的工作位置在每天 10 时至 14 时 (削光伏尖峰发电负荷)、0 时至 4 时 (填用电负荷低谷), 发 (放) 电根据系统平衡调度需要安排在其他时段。充电时间按日历时间三分之一且平均满负荷率为 60% 计, 则年充电利用小时为  $8\,760 \times 1/3 \times 60\% = 1\,725 \text{ h}$ , 发电利用小时应为充电利用小时的 81%, 即  $1\,725 \times 81\% = 1\,397 \text{ h}$ 。

化学储能换电站。换电站与化学储能电站的相同点是充电时段充电状态的工作位置在每天 10 时至 14 时 (削光伏尖峰发电负荷)、0 时至 4

时 (填用电负荷低谷), 在系统中作为负荷起“削峰填谷”效用, 不同点是换电站具有单向负荷的特点而不作为电源。虽然没有储能电站双向调节对系统的贡献大, 但其具有点多、面广、前景规模巨大的优势, 且对排碳能源的特殊替代作用, 并有运作模式简单、盈利模式清晰、供能成本适中的巨大优势, 必将是未来储能系统的主力军。

综合以上分析, 四种储能形式经济指标比较表如表 2 所示。

表 2 四种储能形式经济指标比较表

Tab. 2 Economic index comparison table of four energy storage forms

储能方式	能量转换效率	购电成本(倍)	产业链成本	盈利模式
抽水蓄能	75%	1.33	0.38 元/kWh	低价抽高价售
氢储能	24.75% ~ 36%	4.04 ~ 2.78	最高	中价购高价售
化学储能电站	81%	1.23	0.35 元/kWh	低价充平价售
化学储能换电站	81%	1.23	0.12 元/kWh	低价充平价售

注: 1. 因为制氢不能间断性生产, 所以不可能全部使用削峰填谷电力电量, 故制氢电价只能获得中等电价; 2. 氢储能使用不具有重复使用特性, 使用消耗性释放, 生产、储运、加注三大环节成本完全重复产生, 所以产业链成本居高。

## 3 关于储能需求规模及资源满足率问题

根据相关预测, 到 2060 年, 我国总装机规模将达到 90 亿 kW 左右, 若按 20% 配置储能规模, 还需要储能容量本身的耗能需求, 按平均耗能 25% 考虑, 大约需要供能总装机 95 亿 kW, 需要储能容量总需求近 20 亿 kW。

我国现在已有 10 多万座加油站, 到 2060 年应该不少于 20 万座。如果每一座加油站都置换成换电站, 计及每天充电时间只有 8 h, 电池数量和充电容量都需按照需要容量的三倍考虑, 如果平均一个换电站负荷容量须按 1 万 kW 设置, 总数就可以达到 20 亿 kW。此外, 还可以根据需要任意分布布置; 我国抽水蓄能资源大约 10 亿 kW; 集中式储能电站可布设规模巨大, 应该可以达到 5 亿 kW 以上。可见, 我国的储能资源量是能够满足对电力系统调节能力需求的。



## 4 风光冗余装机

所有措施都应以提高终端用户电价为约束条件。除采用储能措施改变发、用电的时空关系外，还可以利用风电、光伏发电的价格竞争力，超过电力电量平衡电源总量需求多装机，形成超需求的“冗余装机”。有了装机冗余，在系统电源调度运行时，就可以移除部分尖峰电力电量，改善发电站群系统的出力特性，这也是解决新型电力系统“实时平衡、稳定运行”难题的有效主力措施之一。

## 5 结论

根据以上分析研究，可以得到以下结论。

1) 新型电力系统是以风电、光伏发电为主要构成的电力系统，由于新的主力电源具有波动性、随机性、间歇性等特点，必然给电力系统所必需的“实时平衡、稳定运行”要求带来前所未有的严峻挑战。

2) 解决新型电力系统“实时平衡、稳定运行”需要大数据、云平台、5G以上通讯网络、超级计算、智能电力系统、超大规模储能系统等技术的支撑，其中储能是最具基础性的。

3) 从当前技术水平来看，有研究价值的储能技术只有具备“技术具可行性、经济可市场化、前景可规模化”三者兼具的抽水蓄能、化学储能、氢储能共三种储能形式。

4) 真正能够广泛应用的是化学电池储能、抽水蓄能两种储能形式和抽水蓄能电站、化学电池储能电站、换电站三种应用场景。

5) 面对“实时平衡、稳定运行”中供需实时平衡的问题，应该以抽水蓄能电站、化学储能电站、换电站、风光冗余装机四方面组合的解决方案为主，其他储能和调节措施为辅。

### 参考文献:

- [1] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676. 2021. 03. 002.
- CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(3): 8-17. DOI:

10.16516/j.gedi.issn2095-8676. 2021. 03. 002.

- [2] 赵海波, 宋蕾. 碳达峰、碳中和背景下我国垃圾焚烧发电行业发展展望 [J]. 开发性金融研究, 2021(4): 11-20. DOI: 10.16556/j.cnki.kfxjr. 2021. 04. 010.
- ZHAO H B, SONG Q. Prospects for the development of waste incineration power generation industry of China under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Development Finance Research, 2021(4): 11-20. DOI: 10.16556/j.cnki.kfxjr. 2021. 04. 010.
- [3] 才秀敏. 储能将成为新型电力系统中的要素 [J]. 电器工业, 2021(6):58-59. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5578. 2021. 06. 012.
- CAI X M. Energy storage will become an essential element in the new power system [J]. China Electrical Equipment Industry, 2021(6): 58-59. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5578. 2021. 06. 012.
- [4] 初保驹, 朱少林. 新电改背景下阶梯分时电价模型优化研究 [J]. 价格理论与实践, 2020(2): 43-46+174. DOI: 10.19851/j.cnki.cn11-1010/f. 2020. 02. 263.
- CHU B J, ZHU S L. Research on optimization of stepped time-of-use electricity price model under the background of new electricity reform [J]. Price: Theory & Practice, 2020(2): 43-46+174. DOI: 10.19851/j.cnki.cn11-1010/f. 2020. 02. 263.
- [5] 陈海生, 李泓, 马文涛, 等. 2021年中国储能技术研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(3): 1052-1076. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239. 2022. 0105.
- CHEN H S, LI H, MA W T, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(3): 1052-1076. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239. 2022. 0105.
- [6] 杨青. 抽水蓄能与电池储能技术经济比较及建议 [J]. 电工技术, 2021(12): 35-36. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs. 2021. 12. 014.
- YANG Q. Comparison and suggestion of technical and economic between pumped storage and battery storage energy storage [J]. Electric Engineering, 2021(12): 35-36. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs. 2021. 12. 014.

### 作者简介:



蔡绍宽

蔡绍宽 (通信作者)

1955-，男，中国海洋工程咨询协会海上风电分会会长，中国长江三峡集团公司原总经理助理兼发展研究院院长，教授级高级经济师，博士生导师，主要从事能源战略研究工作 (e-mail) caisk2011@163.com。

(责任编辑 叶筠英)