

基于对象层级的储能研究文献分析

林旗力^{1,2}, 梅程焯¹, 陈珍¹, 戚宏勋^{1,✉}, 肖振坤¹

(1. 中国电力工程顾问集团有限公司中电储能工程技术研究院, 上海 200333; 2. 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: [目的] 随着储能技术的发展, 技术方案和应用场景愈加复杂。针对储能研究, 基于技术路线的常规分类方法在某些情况下存在一定局限性。[方法] 提出了一种基于对象层级的储能研究分类方法: 按照研究对象从微观到宏观的层级顺序, 将储能研究依次分为材料级、器件设备级、系统电站级、电力系统级。应用该方法对由CNKI检索得到的储能研究类期刊文献(共5397篇)进行了定量分析。[结果] 结果表明, 2022年文献中电力系统级研究文献数量明显多于其他类型研究, 2001~2022年被引次数前200位文献中电力系统级研究文献的数量和累计被引次数占绝对优势。2010年以前材料级和器件设备级研究文献占比较高, 从2010年开始系统电站级和电力系统级研究文献比例逐渐增加, 其中电力系统级研究文献增速较明显。2011~2022年新型储能年新增装机容量与文献数量之间呈正相关。由于系统电站级研究通常是直接面向实际工程的, 该类文献数量与新增装机规模的相关程度最高。[结论] 文章为总结储能研究成果提供了一种新思路, 可为行业政策制定、产业链布局等工作提供支撑。

关键词: 储能研究; 分类方法; 对象层级; 定量分析; CNKI(中国知网)

中图分类号: TK01; F42

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0170-07

开放科学(资源服务)二维码:



Literature Analysis of Energy Storage Research Based on Object Hierarchy

LIN Qili^{1,2}, MEI Chengye¹, CHEN Zhen¹, QI Hongxun^{1,✉}, XIAO Zhenkun¹

(1. China Power Engineering Consulting Group Corporation CEC Energy Storage Engineering

Technology Research Institute, Shanghai 200333, China;

2. Polytechnic Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: [Introduction] With the development of energy storage technology, technical schemes and application scenarios become more and more complex. For energy storage research, the conventional classification method based on technical route has certain limitations in some cases. [Method] A classification method of energy storage research based on object hierarchy was proposed: according to the hierarchy order of objects from micro to macro, energy storage researches were divided into material-level, device-level, system & power plant-level and power system-level. This method was applied to the quantitative analysis of 5397 articles published in journals of energy storage research retrieved by CNKI. [Result] The results show that the number of power system-level research literatures in 2022 is obviously more than other types of literatures, and the number and cumulative citation times of power system-level research literatures in the top 200 literatures cited from 2001 to 2022 are absolutely superior. Before 2010, material-level and device-level research literatures account for a relatively high proportion. Since 2010, the proportion of system & power plant-level and power system-level research literatures has gradually increased, and the growth rate of power system-level research literatures is more obvious. The newly installed capacity of new energy storage from 2011 to 2022 is positively correlated with the number of literatures. Since the system & power plant-level research often directly focuses on actual projects, the number of such literatures is most closely related to the newly installed capacity. [Conclusion] A new way to summarize the research results of energy storage is provided, which could provide support for industrial policy formulation, industrial chain layout and other work.

Key words: energy storage research; classification method; object hierarchy; quantitative analysis; CNKI

2095-8676 © 2023 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: 2023-05-17 修回日期: 2023-06-19

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重点研发项目“新型物理储能技术研究”(CEEC2022-ZDYF-06)

0 引言

以太阳能和风能为代表的可再生能源是电力行业减碳、脱碳的关键。随着可再生能源装机比例的提升,其间歇性、波动性问题让电力系统对储能的依赖性不断增加^[1]。因此,储能在未来电力系统中将扮演重要角色,大规模储能技术应用势在必行^[2]。近年来,在“碳达峰、碳中和”战略和新型能源体系建设的大背景下,储能在我国发展迅速,已成为新型电力系统的关键组成部分^[3-4]。根据中关村储能产业技术联盟(CNESA)的统计^[5],截至2022年底我国已投运电力储能项目累计装机规模达到59.8 GW。可以预见,未来几十年我国必定是全球储能产业发展的引领者之一。

科学研究是储能产业发展的基础和动力。目前,中国已成为全球在储能领域发表文献最多的国家^[6]。在开展储能研究的同时,国内外学者也在不断总结研究成果^[7-8],这对行业发展具有重要的指导意义。在回顾一个领域的研究成果时,常见的分类方法是根据研究性质将成果分为基础理论、应用技术、软科学等。在储能领域,学者们通常是根据研究对象所属技术路线进行分类。例如文献^[9]从多个角度对不同储能技术路线进行文献检索统计,并分析了发展趋势。文献^[10]在总结几种常见储能技术路线基本原理、特点与实际应用案例的基础上,综合比较

各路线的优缺点,最后分析了发展前景。文献^[11]和文献^[12]则分别从压缩空气储能和飞轮储能路线出发,对相关技术进展和应用等进行了回顾。由于不同储能技术路线的工作原理差异较大,该方法对成果解读具有较好的针对性。

随着储能技术的发展,技术方案和应用场景愈加复杂,还出现了复合应用技术,因此现有分类方法在某些情况下存在一定局限性。为此,文章提出了一种基于研究对象层级的储能研究分类方法。应用该方法,以中国知网(CNKI)数据库期刊文献检索结果为数据来源,对2022年文献和2001~2022年被引次数前200位文献进行了分析,并对2001~2022年文献变化趋势及其与新型储能装机的关系进行了研究。

1 基于对象层级的储能研究分类方法

按照研究对象从微观到宏观的层级顺序,将储能研究依次分为材料级、器件设备级、系统电站级、电力系统级,如图1所示。材料级研究的对象是储能相关的材料科学及工艺技术;器件设备级研究的对象是储能系统可能用到的机件、元件、设备或者若干设备的组合;系统电站级研究的对象是设备所构成能够独立实现电能存储、转换及释放的组合;电力系统级研究的对象是储能系统在电力系统中的应用等。

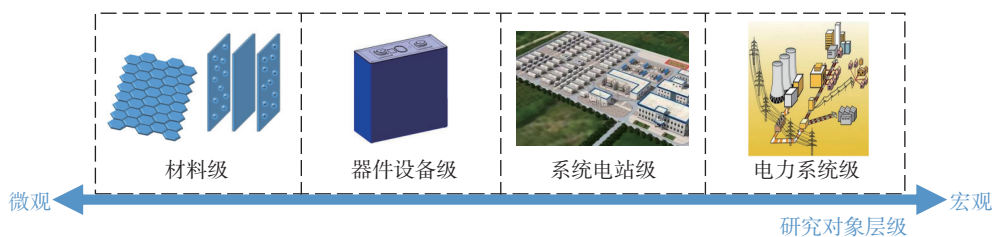


图1 基于对象层级的储能研究分类方法

Fig. 1 The classification method of energy storage research based on object hierarchy

在各类型研究中,材料级研究偏向于基础研究,是储能技术进步的原动力^[13]。器件设备级研究的对象是微观和基础研究成果开始实现应用价值的第一步,具备了一项或若干项功能,但无法完全独立实现储能功能。系统电站级研究的对象是具备完全储能功能的,其下边界是能够独立实现电能存储、转换及

释放的最小设备组合(例如《电化学储能电站设计规范》提出的储能单元^[14]),上边界是储能电站,不涉及电力系统的范畴。储能系统、电站需在电力系统中才能发挥作用^[15],所以系统电站级和电力系统级研究多偏向于应用层面^[8]。需要说明的是,本文将宏观政策、电力市场这类与电力系统密切相关的研究也

归为电力系统级。

2 储能研究文献分析

应用上述分类方法,对我国储能领域研究类期刊文献进行分析。

2.1 数据来源

为了保证文献的集中度,便于对其进行分类,本文在 CNKI 数据库中以“篇名=储能 OR 关键词=储能”为条件,检索 2001~2022 年期刊文献。为保证文献质量,仅保留北大核心、SCI、EI 收录期刊,共得到 6 212 条结果。在这些结果中,筛除综述、通信、书评类文献。此外,考虑到抽水蓄能技术的特殊性,本文仅关注新型储能,即除抽水蓄能以外的储能技术。经人工筛除不符合项后,得到 5 397 条结果。

2.2 2022 年文献分析

采用基于对象层级的储能研究分类方法对 2022 年的 707 篇文献进行分类,得到结果如图 2 所示。由图 2 可知,电力系统级研究文献明显多于其他类型文献,总共 329 篇,占总文献量的 46.5%;接下来是系统电站级和器件设备级研究文献,分别为 135 篇(19.1%)和 130 篇(18.4%);材料级研究文献相对较少,数量和占比分别为 81 篇和 11.5%;另有 32 篇文献无法分类。无法分类的文献内容主要包括储能技术在其他行业中的应用、储能教育等。

2.3 2001~2022 年被引次数前 200 位文献分析

根据被引次数对 2001~2022 年文献进行排序(以 2023 年 3 月 23 日检索结果为准),其中排名前 10 位的文献如表 1 所示。选取被引次数前 200 位文

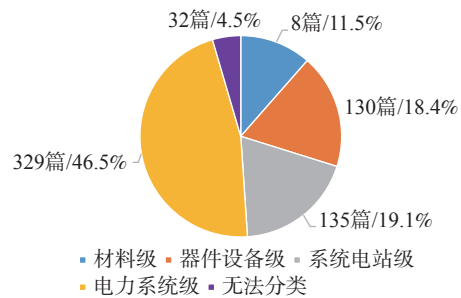


图 2 2022 年储能研究文献分类结果

Fig. 2 The classification results of energy storage research literatures in 2022

献(单篇被引次数范围=96~1 021 次/篇,总累计被引次数=37 747 次,平均被引次数=188.7 次/篇)进行分类,得到结果如图 3(a)所示。由图 3(a)可知,在被引次数前 200 位文献中,电力系统级研究文献达到 152 篇(76.0%),占有绝对优势;排第二的系统电站级研究文献为 33 篇(16.5%);材料级和器件设备级文献相对较少。通过式(1)对各类研究文献累计被引次数进行统计,得到结果如图 3(b)所示。由图 3(b)可知,电力系统级研究文献累计被引次数为 28 849 次,占比达 76.4%;系统电站级研究文献为 6 174 次,占比 16.4%;材料级和器件设备级研究文献累计被引次数相对较少。图 4 进一步给出了各类研究文献平均被引次数。由图 4 可看出,电力系统级研究文献平均被引次数最多(189.8 次/篇);系统电站级研究文献为 187.1 次/篇,与电力系统级研究文献相近;器件设备级和材料级研究文献的平均被引次数依次为 170.5 次/篇和 140.0 次/篇。由此可见,储能作为新型电力系统和新型能源体系建设的重要组

表 1 2001~2022 年被引次数前 10 位储能研究文献

Tab. 1 Top 10 energy storage research literatures cited from 2001 to 2022

排序	篇名	期刊	被引次数/次	层级类别	发表年份
1	储能技术在电力系统中的应用	电网技术	1 201	电力系统级	2008
2	大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析	电力系统自动化	596	电力系统级	2013
3	包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化	中国电机工程学报	553	电力系统级	2011
4	超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用	电力系统自动化	520	电力系统级	2010
5	电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用	电网技术	509	电力系统级	2006
6	储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析	电力系统自动化	478	电力系统级	2013
7	一种适用于混合储能系统的控制策略	中国电机工程学报	463	系统电站级	2012
8	平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法	中国电机工程学报	405	电力系统级	2012
9	计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型	中国电机工程学报	403	系统电站级	2013
10	能源互联网概念、关键技术及发展模式探索	电网技术	402	电力系统级	2015

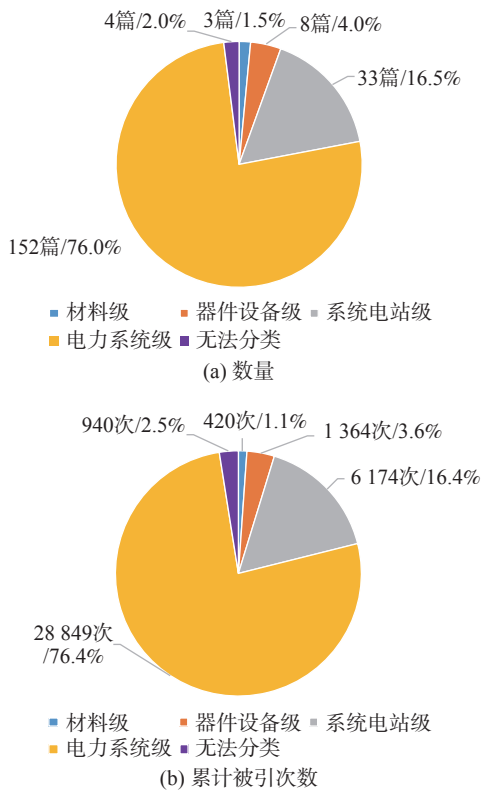


图 3 2001~2022 年被引次数前 200 位储能研究文献分类结果

Fig. 3 The classification results of top 200 energy storage research literatures cited from 2001 to 2022

成部分, 电力系统级研究的热度最高。

$$C_i = \sum_{j=1}^n P_{i,j} \quad (1)$$

式中:

C_i ——第 i 类研究文献累计被引次数(次);

$P_{i,j}$ ——第 i 类研究文献中第 j 篇文献的被引次数(次/篇);

n ——第 i 类研究文献的数量(篇)。

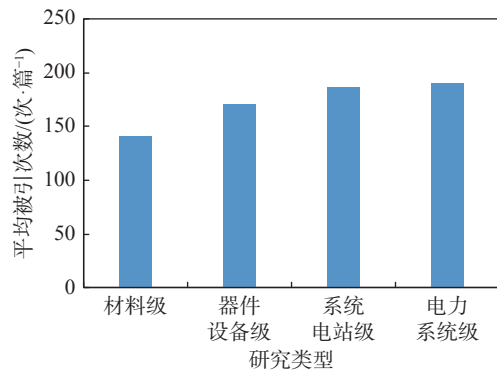


图 4 不同类型研究文献平均被引次数

Fig. 4 Average citation times of different types of research literatures

2.4 2001~2022 年文献变化趋势分析

对 2001~2022 年的 5 397 条结果进行分类, 得到的历年结果如图 5 所示。由图 5 可知, 从 2001~2022 年, 每年的储能研究文献由 12 篇增长至 707 篇, 增长率达 5 791.7%。总体来看, 2001~2010 年期间增速较缓, 2010 年以后增速加快。在 2010 年以前, 材料级和器件设备级研究文献占比较高, 二者总共可占到 58.8%~75.4%。2010 年以后, 系统电站级和电力系统级研究文献的比例逐渐增加。电力系统级研究文献增速尤为明显, 占比由 27.1% 增至 46.5%, 其中 2013 年曾达到最高点 50.2%。从“十二五”开始, 我国开始重视新型储能技术的发展, 并加大了科研投入, 在化学和物理规模储能技术方面取得了明显进步^[16]。由图 5 的结果还可看出, 储能研究的重心已由基础过渡到基础和应用齐头并进的局面。

2.5 新型储能装机与文献的关系分析

根据中关村储能产业技术联盟(CNESA)的统计结果^[5,17], 图 6 给出了 2011~2022 年我国新型储能历年新增装机容量。由图 6 可看出, 2011~2022 年间的

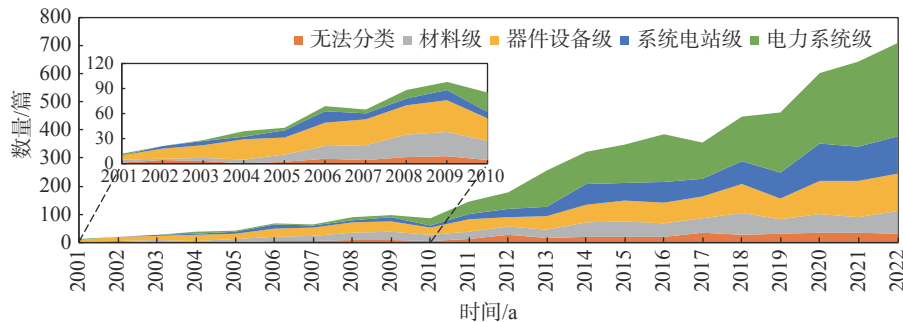


图 5 2011~2022 年储能研究文献分类结果

Fig. 5 The classification results of energy storage research literatures from 2011 to 2022

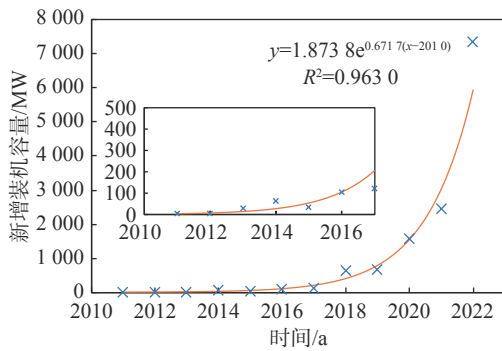


图 6 2011~2022 年新型储能历年新增装机容量

Fig. 6 Annual newly installed capacity of new energy storage from 2011 to 2022

新型储能年新增量整体符合指数增长趋势 ($R^2=0.963 0$), 其中 2011~2017 年间的年新增量上升较慢, 2018 年以后大幅上升。这主要受益于经过之前一段时间的研究, 我国大规模电化学储能关键技术已趋于成熟^[18], 再加上政策的引导, 产业发展方向和商业模式逐渐明朗。在百兆瓦级电化学储能电站应用方面, 已逐步实现了从“技术创新引领”向“规模化应用”的过渡^[19]。

图 7 给出了 2011~2022 年新型储能年新增装机容量与文献数量的关系, 并对二者的关系曲线进行了拟合, 如表 2 所示。由图 7 可看出, 年新增装机容量与研究文献数量之间呈正相关。由表 2 可知, 年新增装机容量与系统电站级研究文献数量的相关性最佳, $R^2=0.916 8$; 其次是与电力系统级研究文献数量, $R^2=0.897 2$; 再次是与器件设备级研究文献数量, $R^2=0.879 3$; 与材料级研究文献数量的相关性较弱,

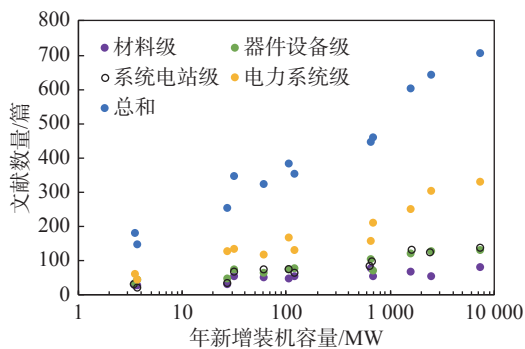


图 7 2011~2022 年新型储能年新增装机容量与文献数量的关系

Fig. 7 The relationship between the newly installed capacity of new energy storage and the number of literatures from 2011 to 2022

表 2 新型储能年新增装机容量 (x) 与文献数量 (y) 的拟合结果

Tab. 2 The fitting results of annual newly installed capacity of new energy storage (x) and the number of literatures (y)

文献类型	关系式	R^2
材料级研究	$y=5.948 9\ln(x)+22.625$	0.747 3
器件设备级研究	$y=12.443\ln(x)+18.110$	0.879 3
系统电站级研究	$y=15.141\ln(x)+1.137 8$	0.916 8
电力系统级研究	$y=34.015\ln(x)-0.370 4$	0.897 2

$R^2=0.747 3$ 。由此可见, 储能产业的发展与其技术研究是相辅相成的。系统电站级和电力系统级研究文献数量与储能新增装机规模的相关程度较高。这主要是由于系统电站级和电力系统级研究较偏重于应用层面, 关注的一般是实际问题, 在时间尺度上与项目落地更为接近。同时产业发展也会对技术研究提出要求, 而应用研究与产业的关系最为密切。对于系统电站级和电力系统级研究, 前者的文献数量与储能新增装机规模的相关程度高于后者, 主要是因为系统电站级研究通常是直接面向实际工程的^[20]。

3 结论

本文提出了一种基于研究对象层级的储能研究分类方法, 并应用该方法对来源于 CNKI 的 2001~2022 年期刊文献检索结果进行了分析, 得到如下结论:

1) 按照研究对象从微观到宏观的层级顺序, 储能研究可依次分为材料级、器件设备级、系统电站级、电力系统级。

2) 电力系统级研究文献占 2022 年总文献量的 46.5%, 明显多于其他类型文献, 接下来是系统电站级和器件设备级研究文献, 材料级研究文献相对较少。在 2001~2022 年被引次数前 200 位文献中, 电力系统级研究文献数量和累计被引次数分别占 76.0% 和 76.4%, 占绝对优势, 排第二的是系统电站级研究文献, 材料级和器件设备级研究文献相对较少。

3) 在 2010 年以前, 材料级和器件设备级研究文献占比较高。从 2010 年开始, 系统电站级和电力系统级研究文献比例逐渐增加, 其中电力系统级研究文献增速较明显, 占比由 27.1% 增至 46.5%。

4) 2011~2022 年新型储能年新增装机容量与文献数量之间呈正相关。偏重于应用的系统电站级和

电力系统级研究文献数量与储能新增装机规模的相关程度较高。而对于系统电站级和电力系统级研究文献,前者数量与储能新增装机规模的相关程度高于后者。

本分类方法为回顾和总结储能研究成果提供了一种新思路,必要时可与基于技术路线的分类方法相结合,进一步细化研究定位,以便快速锁定技术热点。此外,不同层级的研究在研发时间轴上的位置也存在差异,本分类方法有助于分析储能研究与产业发展的关系,在储能相关政策(例如科技研发计划)制定、产业链布局等方面发挥作用。

在后续工作中,本课题组将从本分类方法出发,结合基于技术路线的分类方法,通过聚类分析等手段从更多维度对储能技术发展趋势展开研究。此外,本阶段研究仅分析了国内期刊文献,今后的研究范围将会扩展到技术专利成果以及国内学者发表在国内外期刊上的文献。

参考文献:

- [1] LI Y, LI Y B, JI P F, et al. Development of energy storage industry in China: a technical and economic point of review [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, 49: 805-812. DOI: [10.1016/j.rser.2015.04.160](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.160).
- [2] Massachusetts Institute of Technology. The future of energy storage [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2022.
- [3] 陈海生, 刘畅, 徐玉杰, 等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1477-1485. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0389](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0389).
CHEN H S, LIU C, XU Y J, et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Energy storage science and technology*, 2021, 10(5): 1477-1485. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0389](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0389).
- [4] LI Y L, WEI Y F, ZHU F Q, et al. The path enabling storage of renewable energy toward carbon neutralization in China [J]. *eTransportation*, 2023, 16: 100226. DOI: [10.1016/j.etrans.2023.100226](https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100226).
- [5] 中国能源研究会储能专业委员会, 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书2023(摘要版) [R/OL]. (2023-04-07) [2023-04-11]. http://www.esresearch.com.cn/report/?category_id=26.
Energy Storage Committee of China Energy Research Society, China Energy Storage Alliance. Energy storage industry research white paper 2023 (abstract edition) [R/OL]. (2023-04-07) [2023-04-11]. http://www.esresearch.com.cn/report/?category_id=26.
- [6] 陈启梅, 郑春晓, 李海英. 基于文献计量的储能技术国际发展态势分析 [J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(1): 296-305. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0168](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0168).
CHEN Q M, ZHENG C X, LI H Y. Analysis on international development trend of energy storage technology based on bibliometrics [J]. *Energy storage science and technology*, 2020, 9(1): 296-305. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0168](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2019.0168).
- [7] 梅生伟, 李建林, 朱建全, 等. 储能技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
MEI S W, LI J L, ZHU J Q, et al. Energy storage [M]. Beijing: China Machine Press, 2022.
- [8] TER-GAZARIAN A G. Energy storage for power systems (2nd ed.) [M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2011.
- [9] 王朔, 周格, 禹习谦, 等. 储能技术领域发表文章和专利概览综述 [J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(4): 810-838. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0023](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0023).
WANG S, ZHOU G, YU X Q, et al. Overview of research papers and patents on energy storage technologies [J]. *Energy storage science and technology*, 2017, 6(4): 810-838. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0023](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0023).
- [10] 吴皓文, 王军, 龚迎莉. 储能技术发展现状及应用前景分析 [J]. *电力学报*, 2021, 36(5): 434-443. DOI: [10.13357/j.dlxb.2021.052](https://doi.org/10.13357/j.dlxb.2021.052).
WU H W, WANG J, GONG Y L. Development status and application prospect analysis of energy storage technology [J]. *Journal of electric power*, 2021, 36(5): 434-443. DOI: [10.13357/j.dlxb.2021.052](https://doi.org/10.13357/j.dlxb.2021.052).
- [11] 郭祚刚, 马溪原, 雷金勇, 等. 压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003).
GUO Z G, MA X Y, LEI J Y, et al. Review on demonstration progress and commercial application scenarios of compressed air energy storage system [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003).
- [12] 徐宪龙, 张艺凡, 孙浩程, 等. 飞轮储能技术及其耦合发电机组研究进展 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(3): 119-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.014).
XU X L, ZHANG Y F, SUN H C, et al. Research progress of flywheel energy storage technology and its coupling power generation [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(3): 119-126. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.014](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.014).
- [13] 刘真威, 丁耀东, 陶于兵, 等. 基于水合盐的低温热化学储能研究进展 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(12): 4771-4788. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2022.12.018](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2022.12.018).
LIU Z W, DING Y D, TAO Y B, et al. Research progress of hydrate salt-based thermochemical energy storage at low temperature [J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2022, 53(12): 4771-4788. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2022.12.018](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2022.12.018).

- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电化学储能电站设计规范: GB 51048—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Design code for electrochemical energy storage station: GB 51048—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [15] 裴哲义, 范高锋, 秦晓辉. 我国电力系统对大规模储能的需求分析 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1562-1565. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0252.
PEI Z Y, FAN G F, QIN X H. Demand analysis of large scale energy storage in China's power system [J]. *Energy storage science and technology*, 2020, 9(5): 1562-1565. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0252.
- [16] 中国化工学会. 储能学科技术路线图 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2021.
The Chemical Industry and Engineering Society of China. Technology roadmap of energy storage discipline [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2021.
- [17] 中国能源研究会储能专业委员会, 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书2022 [R]. 北京: 中国能源研究会储能专业委员会, 2022.
Energy Storage Committee of China Energy Research Society, China Energy Storage Alliance. Energy storage industry research white paper 2022 [R]. Beijing: Energy Storage Committee of China Energy Research Society, 2022.
- [18] 李建林, 武亦文, 王楠, 等. 吉瓦级电化学储能电站研究综述及展望 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 2-14. DOI: 10.7500/AEPS20210122006.
LI J L, WU Y W, WANG N, et al. Review and prospect of Gigawatt-level electrochemical energy storage power station [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(19): 2-14. DOI: 10.7500/AEPS20210122006.
- [19] 李相俊, 官亦标, 胡娟, 等. 我国储能示范工程领域十年(2012-2022)回顾 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2702-2712. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0381.
LI X J, GUAN Y B, HU J, et al. Review of energy storage application in China from 2012 to 2022 [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 11(9): 2702-2712. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0381.
- [20] YAN N, LI S, YAN T, et al. Study on the whole life cycle energy management method of energy storage system with risk correction control [C]//IEEE. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Wuhan, China, 30 October 2020-1 November 2020. New York: IEEE, 2020: 2450-2454. DOI: 10.1109/EI250167.2020.9346933.

 作者简介:


林旗力

林旗力 (第一作者)

1985-, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事储能技术与商业模式研究工作(e-mail) qlin@cpecc.net。

戚宏勋

戚宏勋 (通信作者)

1980-, 男, 高级工程师, 主要从事电力储能技术研究工作(e-mail) hxqi@cpecc.net。

(编辑 赵琪)