

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220265

中国未来电力系统储电网初探

文劲宇, 周博, 魏利岫

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074)

摘要: 双碳目标下可再生能源的快速发展将极大改变我国电力系统能源结构与分布, 同时也为电力系统中储能的发展带来了重大的机遇与挑战。首先, 研判了未来电力系统中负荷中心位置、电源结构及分布的变化, 预测了未来电力系统电力流“外电内送”的新格局。然后, 分析了储能对于支撑新格局电力系统安全、高效、低碳运行的重要意义。结合我国地形特点, 探索了抽水蓄能在新格局下的发展优势。提出以抽水蓄能为主体构建未来电力系统储电网, 从有功功率的全网统一性角度分析其必要性。最后, 从规划、运行和市场三个方面探讨了储电网关键技术, 提出了对于电力系统储电网发展的一些思考。

关键词: 电力系统新格局; 外电内送; 储电网; 抽水蓄能; 地形特点

Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China

WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Driven by carbon peak and neutrality goals, the rapid development of renewables will significantly change the structure and distribution of energy resources of the power system in China. This also brings great opportunities and challenges for the development of energy storage in the power system. First, the locations of the load centers and the changes of the structure and distribution of energy resources are studied, based on which the new pattern of future power system is predicted, i.e., from-outside-to-inside power transmission. Then, the critical role of energy storage in supporting the secure, efficient, and low-carbon operation of the future power system is analyzed. The development superiority of pumped hydro storage in the new pattern is highlighted considering the topographical characteristics of China. Accordingly, a pumped hydro storage-predominating energy storage grid is proposed, whose necessity is further analyzed from the perspective of system-wide active power balance. Finally, key technologies for the energy storage grid are investigated, including planning, operating, and market, and some thoughts on the development of the energy storage grid are also provided.

This work is supported by the Innovation Research Group Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 51821005).

Key words: new pattern of power system; from-outside-to-inside power transmission; energy storage grid; pumped hydro storage; topographical characteristic

0 引言

“碳达峰、碳中和”目标的提出对我国能源发展提出了更高的要求^[1]。为实现双碳目标, 推进可再生能源替代与提高能源利用效率是最重要的两条

途径, 因此, 构建以新能源为主体的新型电力系统具有重要意义。在此背景下, 以风能、太阳能为代表的的新能源在我国发展迅速。根据国家能源局数据, 截至2021年底, 我国风电装机总容量为3.28亿kW, 光伏发电装机总容量为3.06亿kW, 分别占全国总发电装机总容量的13.8%和12.9%; 2021年风光总发电量达9785亿kWh, 占全社会总用电量的11.8%^[2]。预计到2030年, 风光新能源装机总容量

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目资助(51821005)

将超过 12 亿 kW，发电量占比将超过 25%；预计到 2060 年，风光新能源发电量占比将超过 60%，在电源结构中占主体地位^[3]，可以预见未来电力系统格局将发生显著变化。然而，随着风光新能源占比的增加，电力系统需要更强的灵活调节能力以应对风光新能源出力的不确定性^[4-6]。

储能具有能量存储和功率时移的功能，是提高电力系统灵活性的重要方法之一，对于支撑未来电力系统安全、高效、低碳运行具有重要意义^[7-10]。文献[11-14]研究了超导磁储能、飞轮储能、电化学储能等系列储能装置。2009 年国家自然科学基金委员会设立了重点项目“基于储能技术的新型电力系统安全运行基础理论与方法研究”，系统研究了含高比例风电的电力系统对储能技术的需求，有力促进了电力系统储能技术的发展。近年来，国家制定了一系列政策，推进了储能技术的发展。2017 年 10 月，国家五部委联合发布了《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》，推动储能由研发示范向商业化规模化发展^[15]；2021 年 7 月，我国发展改革委与能源局联合发布了《关于加快推动新型储能发展的指导意见》，提出到 2025 年实现新型储能从商业化初期向规模化发展转变，到 2030 年实现新型储能全面市场化发展^[16]；2021 年 9 月，国家能源局发布了《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035 年)》，进一步提出到 2025 年抽水蓄能投产总规模达到 6200 万千瓦以上，到 2030 年投产总规模达到 1.2 亿 kW 左右^[17]。2022 年 1 月，国家发展改革委和能源局印发《“十四五”新型储能发展实施方案》，全方位推进各类新型储能技术的发展^[18]；2 月，国家电网有限公司表示：针对提高电力系统调节能力对发展储能的现实要求，大力加强技术成熟的抽水蓄能电站建设，积极支持新型储能规模化应用，力争到 2030 年国家电网公司抽蓄电站装机由目前 2 630 万 kW 提高到 1 亿 kW，电化学储能由 300 万 kW 提高到 1 亿 kW^[19]。

在如此大规模的储能发展背景下，合理设计储能未来电力系统中的形态，对未来电力系统的运行和储能自身的发展至关重要。一方面，现有储能技术类型多样，发展程度不尽相同^[20-22]，抽水蓄能技术相对比较成熟，新型储能技术仍在快速发展。根据能量存储形式可划分为机械储能、电化学储能、电磁储能和储气、储热等；根据技术特征可划分为功率型储能、能量型储能和复合型储能等。因此，如何组合各类储能形成合适的储能结构是一个重要问题。另一方面，储能在电力系统多场景中均能发挥重要作用，如调峰、调频和提供备用等^[23-25]，但现阶段储能配置成本仍然较高，且受多种因素的影

响。因此，如何合理规划储能投资，满足电力系统多场景应用需求，充分实现储能价值，是实现双碳目标需要解决的一个重要问题。

本文基于国家相关部委和权威组织公布的各种预测数据，对我国未来负荷中心与能源结构及分布进行了研判，预测了我国未来电力系统电力流“外电内送”的新格局，分析了储能在未来电力系统中的重要意义，最后结合我国地形特点，提出以抽水蓄能为主体构建未来电力系统储电网，并从几个方面探讨了储电网的关键技术。

1 未来电力流“外电内送”新格局

在我国电力系统现有能源结构中，煤电、水电等传统能源占据主要地位。在我国能源资源分布中，70%以上的煤炭资源分布在北部地区，80%以上的水能资源分布在西部地区，但我国三分之二的能源需求集中在东部和中部地区^[26]，因此，现有电力系统呈现“西电东送”和“北电南送”的总体格局。然而，随着风光新能源发电逐渐成为电源主体，未来电力系统的格局将会逐步发生变化。

1.1 负荷中心仍位于华北、华东、南方和华中地区

根据国家统计局数据，近十年我国电力消费量及其地区分布如图 1 所示^[27]。从图 1 可以明显看出，我国电力消费量呈增长趋势，而华北、华东、南方和华中地区是电力消费的主体，其占比在 75%以上，且在 2020 年达到 78.34%，在此基础上可以判断，尽管未来可能受政策导向与产业转移趋势的影响，我国电力负荷中心在较长时间内仍将位于华北、华东、南方和华中地区。

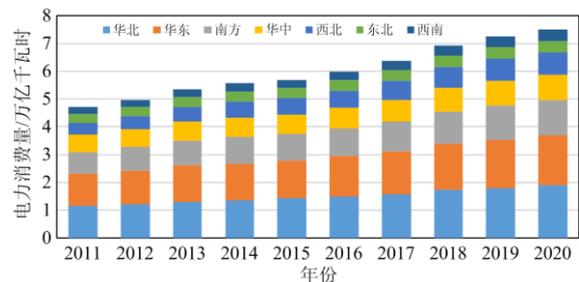


图 1 近十年我国电力消费量及其地区分布

Fig. 1 Power consumption and its regional distribution of China in the recent decade

1.2 电源结构与分布发生较大变化

在双碳目标下，传统火电机组逐步退役，新能源发电快速增长，电力系统在电源结构及其分布两方面将发生较大变化。

从电源结构来看，新能源发电将成为电源主体。

表 1 给出了我国电力系统电源结构的现状及其发展规划^[28], 可见: 现阶段火电(包括煤电和气电)等化石能源为能源主体, 总容量为 11.78 亿 kW, 占比 53.5%; 风电、太阳能、生物质能等新能源发电总容量为 5.97 亿 kW, 占比为 27%。预计到 2030 年, 传统火电容量略有增加, 但占比大幅下降到 32.5%; 而新能源发电快速发展, 总容量达到 19.07 亿 kW, 占比 51.2%, 逐渐成为主体电源。预计到 2060 年, 新能源发电装机达到 64.8 亿 kW, 占比 80.8%, 成为能源供给的绝对主体。

表 1 我国电源结构现状与发展规划

Table 1 Current and future generation structure of China

电源类型	装机容量/亿 kW, 占比/%					
	2020 年		2030 年		2060 年	
	容量	占比	容量	占比	容量	占比
火电	11.78	53.5	12.35	32.5	3.2	4.0
核电	0.5	2.3	1.08	2.8	2.5	3.1
水电	3.7	16.8	5.54	14.6	7.6	9.5
风电	2.8	12.7	8	21	25	31.2
太阳能发电	2.5	11.3	10.25	27	38	47.4
生物质及其他	0.67	3	0.82	2.2	1.8	2.2
燃氢机组	0	0	0	0	2	2.5

从电源分布来看, 未来的主体电源(新能源发电)将呈环绕负荷中心分布趋势。受风资源影响, 陆上大型风电基地主要分布在华北、东北和西北地区, 同时在东部、中部地区有大量中小型风电场; 受辐照资源影响, 大型太阳能发电基地主要分布在西北地区, 同时在东部和中部遍布分布式光伏发电。而随着海上风电的开发, 东部和南部海域大型海上风电基地逐步建成并网。表 2 给出了我国风电、太阳能发电装机分布的发展规划^[28], 可以看到大部分陆上风电和太阳能发电位于西部、北部地区, 同东部、南部的海上风电一起占比在 60% 以上, 因此主体电源中较大部分呈环绕负荷中心分布。

表 2 我国风电、太阳能发电发展规划及分布

Table 2 Planning and distribution of wind power and solar power in China

能源类型及位置	装机容量/亿 kW	
	2030 年	2060 年
陆上风电-西部、北部	4.82	14.33
陆上风电-东部、中部	2.73	9.07
海上风电-东部、南部	0.45	1.6
太阳能发电-西部、北部	6.39	21.6
太阳能发电-东部、中部	3.91	14.4

1.3 “外电内送”新格局

根据上述判断, 未来负荷中心仍然位于华北、

华东、南方和华中地区, 而作为未来电源主体的新能源发电有 60% 以上分布在西部、北部地区和东部、南部海域。同时, 西南地区存在丰富的水电资源。因此, 未来电力系统中将有大量电力由外围向内部负荷中心输送, 现有的“西电东送”和“北电南送”输电格局将演变为“外电内送”的新格局。

2 新格局下电力系统对储能的需求

新格局下的电力系统面临的挑战将愈发严峻, 为保证电力系统安全、高效、低碳运行, 储能将发挥极其重要的作用。

2.1 新格局电力系统面临的挑战

由于新能源发电的强不确定性, 其接入将导致电力系统运行呈现源-荷双随机平衡特征。而随着新能源发电占比的不断增加, 其出力的随机性与波动性也愈发剧烈, 原有技术难以保证电力系统在不同时间尺度上的电力电量平衡, 电力系统安全受到严重威胁。与此同时, 随着电力流“外电内送”新格局的形成, 大量新能源发电由四周向负荷中心地区汇聚, 而相应的消纳压力与可靠性风险也将由负荷中心地区承担, 这对负荷中心地区电力系统的运行提出了更高的要求。

因此, 在电力系统向“外电内送”新格局演变中, 尤其是负荷中心地区需要同步或是更快地增强系统的灵活调节能力, 以接纳汇聚而来的大规模新能源发电, 保证电力系统安全高效运行。

2.2 储能支撑新格局下电力系统安全高效运行

已有大量研究讨论了电力系统灵活性改善措施, 其中, 储能是最重要的技术之一。储能具有能量存储与功率时移的作用, 能够将传统的源-荷刚性平衡转换为更容易实现的源-储-荷柔性平衡, 在保证电力系统安全的前提下, 促进新能源发电的消纳。储能在应对新能源发电的强不确定性问题方面: 通过快速充放电, 可以平滑新能源出力, 应对调频需求; 通过能量存储与功率时移, 可以实现削峰填谷, 缓解系统调峰压力; 通过自身的快速调节能力, 可以提高电力系统爬坡能力, 以跟随新能源出力剧烈变化引起的爬坡需求。此外, 储能也可以用于提供备用、负荷恢复、黑启动等方面。

因此, 储能在应对新能源发电的强不确定性、促进新能源消纳、推动能源革命和能源新业态发展方面将发挥至关重要的作用, 能够有力支撑新格局下电力系统的安全高效运行。

为充分发挥储能价值, 国家也正逐步完善储能

政策机制,推动储能技术创新与发展。综合各方预测数据,2060年储能需求预计超过6亿kW^[28-29],面对如此大规模的储能需求,以及考虑到其对电力系统的影响,有必要对储能在未来电力系统中的形态进行合理设计。

3 未来电力系统储电网构想

现有储能技术类型多样,又各具特点,发展程度也各不相同,因此本文结合我国自身特点对在未来电力系统中储能的形态进行研究。

3.1 各类型储能技术特点

首先对几种发展较为成熟的机械储能与电化学储能技术进行对比分析,如表3所示。从表3可以看出,抽水蓄能、压缩空气储能、锂离子电池、钒液流电池和钠硫电池的功率等级能够达到百兆瓦级以上,具有在电力系统中大规模应用的潜力。其中抽水蓄能和压缩空气储能均属于机械储能,其持

续发电时间较长,达6h以上,适用于电力系统削峰填谷和应对较长时间尺度的新能源出力不确定性。锂离子电池、钒液流电池和钠硫电池均属于电化学储能,其响应速度较快,达到毫秒级,能用于改善电力系统惯量和应对较短时间尺度的新能源出力波动。

然而,上述储能在电力系统中的应用也受到多种因素限制。压缩空气储能能量转换效率较低,且需配备大型储气装置;钒液流电池配置成本高,且受原材料限制;钠硫电池原材料来源广泛,但安全性相对较低。因此,上述三种储能短期内都难以大规模应用。锂离子电池配置成本短期内仍然较高,投资压力较大,且受限于安全、原材料、后处理等问题。抽水蓄能技术较为成熟,建设成本相对较低,但受地理条件限制较大,配置不够灵活。综上,需要对未来的储能结构进行合理安排,满足电力系统各场景需求。

表3 储能技术特点对比分析

Table 3 Comparison analysis of different types of energy storage

储能技术种类	集成 功率等级	持续 发电时间	循环 次数	响应 速度	启动 时间	能量转换 效率	自放电率	功率成本/ (元/kW)	能量成本/ (元/kWh)
抽水蓄能	280~1 400 MW	6~10 h	>13 000	分钟级	分钟级	70%~85%	接近 0	1 500~4 300	250~430
传统压缩空气储能	5~300 MW	1 h 至 24 h 以上	上万	分钟级	约 6 min 级	48%~52%	1%/月	6 500~7 000	2 200~2 500
先进压缩空气储能	十兆瓦级	1 h 至 24 h 以上	上万	分钟级	约 6 min 级	40%~65%	1%/月	6 000~15 000	300~4 000
高速飞轮储能	兆瓦级	1 ms~1min	>百万	分钟级	<2 ms	>85%	100%/月	1 700~2 000	100 000~130 000
传统铅蓄电池	0~20 MW	1 s~1 h	200~800	毫秒级	<1 s	70%~85%	1%/月	500~1 000	500~1 000
铅碳电池	十兆瓦级	1 s~1 h	1 000~3 000	毫秒级	<1 s	70%~80%	1%/月	1 300~7 000	1 300~1 800
磷酸铁锂电池	百兆瓦级	1 s~1 h	3 000~5 000	毫秒级	毫秒级	85%~90%	1.5%~2%/月	1 500~9 000	1 500~2 000
钛酸锂电池	0~32 MW	1 s~1 h	6 000	毫秒级	毫秒级	>95%	2%/月	9 000	4 500
三元锂电池	百兆瓦级	1 s~1 h	5 000~6 000	毫秒级	毫秒级	85%~90%	1.5%~2%/月	1 800~10 000	1 800~2 100
全钒液流电池	百兆瓦级	1 s~1 h	>10 000	毫秒级	秒级	70%~75%	接近 0	14 000~16 000	3 500~4 000
锌溴液流电池	0.05~2 MW	1 s~1 h	5 000	毫秒级	秒级	75%~80%	10%/月	12 500~15 000	2 500~3 000
钠硫电池	百兆瓦级	1 ms~1 h	4 500	毫秒级	毫秒级	80%~90%	0	10 000~13 000	2 500~3 000

注:数据来源于中关村储能产业技术联盟专家委员会

3.2 新格局电力系统中抽水蓄能发展优势

抽水蓄能是发展最为成熟的储能技术,已得到大规模应用。然而抽水蓄能建设需要充足的水资源和一定的水头高度,故其选址受到一定限制。尽管如此,从全国角度来看,抽水蓄能发展空间依然巨大。一方面,我国降水量从东南沿海向西北内陆递减,东部、南部地区水资源相对丰富,为发展抽水

蓄能提供了水资源基础;另一方面,我国地形地貌多样,其中丘陵地带约占全国总面积的10%,主要包括东南丘陵、辽东丘陵和山东丘陵等,为发展抽水蓄能提供了海拔落差基础。

根据《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035年)》,我国已投产大型抽水蓄能电站总规模为3 249万kW,主要分布在华东、华北、华中和南方等地

区; 在建大型抽水蓄能电站总规模为 5 513 万 kW, 约 60% 分布在华东和华北地区; 此外, 还有 340 个中长期规划布局重点实施项目, 其总装机容量约 4.21 亿 kW^[17]。可见, 已投产和在建大型抽水蓄能电站

与我国负荷中心高度重合, 能够提高负荷中心地区消纳能力, 促进其电力系统的安全高效运行。

表 4 整理列出了中长期规划征求意见稿中给出的我国投产、在建的大型抽水蓄能电站和规划容量。

表 4 大型抽水蓄能电站

Table 4 Large-scale pumped hydro storage stations

省(区、市)	已建电站		在建电站		规划容量/万 kW
	装机规模/万 kW	电站名称及装机容量/万 kW	装机规模/万 kW	电站名称及装机容量/万 kW	
北京	80	十三陵(80)	0	—	0
河北	127	潘家口(27)、张河湾(100)	740	丰宁一期(180)、丰宁二期(180)、 易县(120)、抚宁(120)、尚义(140)	840
山西	120	西龙池(120)	270	垣曲(120)、浑源(150)	240
内蒙古	120	呼和浩特(120)	120	芝瑞(120)	340
辽宁	120	蒲石河(120)	280	清原(180)、庄河(100)	980
吉林	65	白山(30)、敦化(35)	225	敦化(105)、蛟河(120)	920
黑龙江	0	—	120	荒沟(120)	1 050
江苏	260	溧阳(150)、宜兴(100)、沙河(10)	135	句容(135)	220
浙江	493	天荒坪(180)、仙居(150)、桐柏(120)、 溪口(8)、长龙山(35)	735	长龙山(175)、宁海(140)、缙云(180)、 衢江(120)、磐安(120)	2 650
安徽	348	响水涧(100)、琅琊山(60)、 绩溪(180)、响洪甸(8)	248	金寨(120)、桐城(128)	1 080
福建	120	仙游(120)	560	厦门(140)、永泰(120)、 周宁(120)、云霄(180)	0
江西	120	洪屏(120)	120	奉新(120)	830
山东	100	泰安(100)	600	文登(180)、沂蒙(120)、 潍坊(120)、泰安二期(180)	520
河南	132	132 宝泉(120)、回龙(12)	360	天池(120)、洛宁(140)、五岳(100)	1 140
湖北	127	白莲河(120)、天堂(7)	0	—	2 670
湖南	120	120 黑麋峰(120)	140	平江(140)	2 080
广东	728	惠州(240)、广州(240)、清远(128)、深圳(120)	240	梅州一期(120)、江一期(120)	1 580
广西	0	—	0	—	1 680
重庆	0	—	120	蟠龙(120)	840
四川	0	—	0	—	1 010
贵州	0	—	0	—	2 930
海南	60	琼中(60)	0	—	0
西藏	9	羊卓雍湖(9)	0	—	4 305
陕西	0	—	140	镇安(140)	940
甘肃	0	—	0	—	1 440
青海	0	—	0	—	3 750
宁夏	0	—	0	—	420
新疆	0	—	240	阜康(120)、哈密(120)	2 700

考虑到我国中东部、东南部显著的丘陵地貌和众多的湖汊河流，可以因地制宜地建设中小微型抽水蓄能电站，并与大型和特大型抽水蓄能电站互为补充^[17,30-32]。根据国家相关标准，本文设定各型抽水蓄能电站的装机容量范围及相应水库总库容如表 5 所示^[33]。我国三大丘陵中面积最广的东南丘陵(包含浙闽丘陵、两广丘陵和江南丘陵等)覆盖浙江、福建、广东、广西、安徽、江西、湖南、湖北等省份的全部或大部分地区，海拔为 200~600 m，所覆盖的区域水资源较为充沛，中小型抽水蓄能站点资源丰富。同时，这部分地区处于负荷中心位置，是未来新能源电力消纳的主要区域，中小型抽水蓄能布局灵活和距离负荷中心近等优势对于电力系统的安全高效运行具有极大价值，因此在这部分地区发展中小型抽水蓄能既能充分利用我国地形特点，也能更好地服务新能源消纳与电力系统运行。

表 5 抽水蓄能电站分等指标

Table 5 Grading of pumped hydro storage stations

抽蓄电站等别	装机容量/MW	水库总库容/亿立方米
特大型	≥1 200	≥10
大型	[300,1 200)	[1,10)
中型	[50,300)	[0.10,1.00)
小型	[10,50)	[0.01,0.10)
微型	<10	<0.01

综上，抽水蓄能在未来新格局电力系统中将具有较大的发展优势。

3.3 以抽水蓄能为主体构建电力系统储电网

截至 2020 年底，我国已投运储能累计装机容量达 3 560 万 kW，其组成如图 2 所示^[33]。其中，抽水蓄能占比达 89.3%，是我国储能结构中的绝对主体；电化学储能占比 9.2%，是装机规模最大的新型储能。

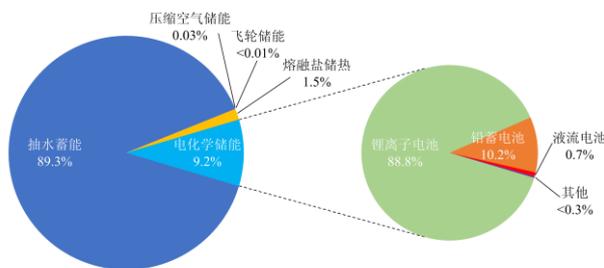


图 2 我国储能结构(截至 2020 年底)

Fig. 2 Energy storage structure in China (by 2020)

结合我国储能发展现状和前述抽水蓄能的发展优势，本文提出以抽水蓄能为主体，电化学储能等新型储能辅助的方式建立电力系统储电网，特指各

大中小型储能电站，以及连接它们的输配电线路。储电网的核心在于有功功率的全网统一性，即有功功率是作用于电力系统整体功率平衡，储能并不局限于解决某一节点的问题，而是具有系统全局性的价值。储电网运行过程中，作为一个整体应对新能源消纳等电力系统面临的问题；组成储电网的各储能电站，由调度部门从系统全局的角度协调其各自的运行，或者通过各中小型储能电站自组织协同的方式，实现储电网的整体性能最优。储电网作为一个整体运行时：(1)可以有效避免不同储能电站各自为政可能引发的充放电对冲，减少资源浪费，从而减少电力系统整体储能需求，延缓投资压力；(2)可以减少储能资源的闲置，实现储能在电力系统不同场景下的综合价值。

以抽水蓄能为主体构建电力系统储电网，将从以下三个方面支撑储能自身的发展和未来电力系统的安全高效运行：

(1)可以充分利用我国地形特点，在东南地区配置更多技术更为成熟、成本相对较低的抽水蓄能，在起到对电力系统同样支撑作用的同时，减少电源侧电化学储能等新型储能的配置需求，实现资源的合理配置。

(2)通过建立储电网，将区域内各大型储能电站的运行纳入电力系统调度体系中，通过调度部门的统一调控，实现储电网与输电网、配电网及电源侧和负荷侧的协同运行，中小型储能电站可以通过自组织协同调控，充分发挥储电网在电力系统各应用场景下的综合价值。

(3)储电网主体与未来“外电内送”新格局下的负荷中心高度重合，既能够提高电力供应可靠性，又能够极大增强电力系统灵活调节能力，有助于提高负荷中心消纳能力，支撑未来新格局电力系统的安全、高效、低碳运行。

3.4 储电网关键技术

为支撑储电网的发展和实现储电网的价值，本节从规划、运行和市场交易三个方面对储电网的关键技术进行探讨。

3.4.1 储电网规划技术

常规储能规划一般涉及储能电站的选型、布点和定容三个方面^[34-38]。储电网规划区别于常规储能规划，主要在于规划范围和输电依赖性。

(1)储电网规划受规划范围影响较大。不同的规划范围中储能资源不同，所能起到的协调作用有所差别。对于全国范围的储电网规划，结合我国地形特点，可以在负荷中心配置抽水蓄能，其他地区辅以电化学储能等新型储能，有助于缓解整体储能投

资压力;对于区域范围的储电网规划,应综合考虑该区域实际情况,规划合适的抽水蓄能与新型储能的复合储能,充分利用各类型储能的优势互补。总体而言,规划范围越大,储电网所能发挥的价值越高,所带来的模型复杂度与计算难度也越高。因此,选定合适的规划范围和发展更先进的建模计算技术,将是储电网规划的关键技术。

(2) 储电网规划对系统输电能力的依赖性更为显著。作为储电网核心的有功功率全网统一性,其前提条件是系统中不会出现阻塞,从而任意位置的储能电站都可以参与到系统的整体功率平衡中。而如果系统中出现阻塞,储电网中的某一储能电站可能无法或者只能部分参与到系统功率平衡,储电网的运行将受到限制。不过相应地,由于储电网内部各储能电站位于系统中的不同位置,储电网能够在一定程度上影响输配电网潮流分布,从而缓解系统可能出现的阻塞。因此,储电网与输配电网的协同,也将是储电网规划的关键技术之一。

3.4.2 储电网运行技术

相较于一般储能电站的运行^[39-43],储电网运行更加关注内部各储能电站的协同和作为整体对电力系统的支撑。

对内来说,储电网需要协调其内部各储能电站的运行来响应系统需求。现有储能运行过程中,常针对系统某一信号(如频率、电压等),根据自身控制策略作出响应。然而,从系统角度来看,不同储能电站的响应行为可能会互相抵消,如充放电对冲,造成调节资源的浪费。因此,如何在满足各储能电站自身的运行目标的同时,协调其各自的响应动作,发挥储电网的规模效应,提高整体利用效率,将是储电网运行的关键技术之一。

对外来说,储电网需要合理分配其调节能力来参与不同类型系统服务。相比于现有社区共享储能、储能聚合商和云储能等储能发展形态,储电网具有体量更大、分布范围更广的特点,面向大电力系统提供服务的能力更强,能够更加深入地参与到系统范围的调峰、调频、备用、潮流调控等场景中。因此,如何协调储电网参与不同类型系统服务,实现其多场景融合运行,降低储能资源的闲置率,最大化地发挥其价值,将是储电网运行的关键技术之一。

3.4.3 储电网参与市场交易技术

在未来新格局电力系统中,系统对灵活性资源的需求显著增加,储电网作为关键的灵活性资源,如何参与市场交易还有待研究^[44-50]。

首先,需要明确储电网在电力系统中的属性,是受管制对象还是独立主体,或是二者兼有。若作

为受管制对象,储电网将与输电网、配电网一同由系统调度部门统一管理,但不能参与市场化交易,其综合价值难以实现;若作为独立主体,可以充分参与到市场交易中获取盈利,但其盈利行为可能与系统运行目标并不一致,此时由于其较大的体量,将会影响电力系统的运行。而若是储电网内部的各储能电站两种属性都有,如何协同其参与市场以及保证市场公平性,将会是一个关键问题。

此外,需要设计合适的储电网参与市场机制。现有储能参与市场,有自调度或全调度等统一运行模式,也有向市场主体出售使用权的独立运行模式。若类比前者,可在能量市场外建立储电市场,实现不同储能电站充放电的协同,但该方式模型复杂,对市场设计和计算能力要求较高。若类比后者,储电网可作为第三方向市场主体出售储能使用权,储电网运行根据双方合同确定,但该方式不一定能保证储电网的全局最优利用。因此,储电网参与市场交易还有待进一步研究。

4 结语

本文基于国家相关部委和权威组织公布的各种预测数据,对未来电力系统和储能的发展形态进行了初步探讨:

(1) 随着新能源发电逐渐成为电源主体,未来电源呈包围负荷中心趋势,电力系统演变为电力流“外电内送”的新格局。

(2) 在我国负荷中心地区,抽水蓄能发展潜力和优势较大,提出以抽水蓄能为主体建立未来电力系统储电网,支撑新格局电力系统安全高效运行。

(3) 从规划、运行和市场交易三个方面探讨了储电网的关键技术,提出了对储电网未来发展的思考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 新时代的中国能源发展[N]. 人民日报, 2020-12-22(10).
 - [2] 国家能源局. 国家能源局2022年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2022[2021-01-28]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/28/c_1310445390.htm.
 - [3] 中国南方电网. 数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书[R]. 广州: 中国南方电网, 2021.
 - [4] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
- CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.

- [5] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [6] 文劲宇, 方家琨. 能源互联网中的关键设备与支撑技术[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 1-10.
WEN Jinyu, FANG Jiakun. Key facilities and supportive technologies in energy internet[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 1-10.
- [7] 程时杰, 余文辉, 文劲宇, 等. 储能技术及其在电力系统稳定控制中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 97-108.
CHENG Shijie, YU Wenhui, WEN Jinyu, et al. Energy storage and its application in power system stability enhancement[J]. Power System Technology, 2007, 31(20): 97-108.
- [8] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [9] 李建林, 李雅欣, 周喜超. 储能商业化应用政策解析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 168-178.
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 168-178.
- [10] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见[EB/OL]. 北京: 国家发展改革委, 2021[2021-02-25]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/06/content_5590895.htm.
- [11] 李艳, 韩翀, 程时杰. 超导磁储能系统(SMES)在高压输电中的应用[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 53-55, 60.
LI Yan, HAN Chong, CHENG Shijie. The application of SMES in HV transmission[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(5): 53-55, 60.
- [12] 文劲宇, 李刚, 程时杰, 等. 一种增强电力系统稳定性的多功能柔性功率调节器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 6-11.
WEN Jinyu, LI Gang, CHENG Shijie, et al. A multi-functional flexible power conditioner for power system stabilities enhancement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 6-11.
- [13] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺. 适用于风电功率调控的复合储能系统及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 95-102.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun. Hybrid energy storage system and its control strategies intended for wind power conditioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 95-102.
- [14] 沈郁, 姚伟, 方家琨, 等. 液氢超导磁储能及其在能源互联网中的应用[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 172-179.
SHEN Yu, YAO Wei, FANG Jiakun, et al. Liquid hydrogen with SMES and its application in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 172-179.
- [15] 国家能源局. 关于促进储能技术与产业发展的指导意见[EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2017[2017-10-11]. http://www.nea.gov.cn/2017-10/11/c_136672015.htm.
- [16] 国家能源局. 关于加快推动新型储能发展的指导意见[EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2021[2021-07-15]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-07/15/c_1310079331.htm.
- [17] 国家能源局. 《抽水蓄能中长期发展规划(2021-2035年)》印发实施[EB/OL]. 北京: 国家能源局, 2021[2021-09-09]. http://www.nea.gov.cn/2021-09/09/c_1310177087.htm.
- [18] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委国家能源局关于印发《“十四五”新型储能发展实施方案》的通知[EB/OL]. 北京: 国家发展改革委, 2022[2022-01-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202203/t20220321_1319772.html.
- [19] 辛保安. 坚决扛牢电网责任 积极推进碳达峰碳中和[N]. 人民日报(12), 2022-02-23.
- [20] 陈海生, 凌浩恕, 徐玉杰. 能源革命中的物理储能技术[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 450-459.
CHEN Haisheng, LING Haoshu, XU Yujie. Physical energy storage technology in energy revolution[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 450-459.
- [21] 李琼慧, 王彩霞, 张静, 等. 适用于电网的先进大容量储能技术发展路线图[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 141-146.
LI Qionghui, WANG Caixia, ZHANG Jing, et al. A roadmap for large scale energy storage for grid-level applications[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(1): 141-146.
- [22] 刘英军, 刘畅, 王伟, 等. 储能发展现状与趋势分析[J]. 中外能源, 2017, 22(4): 80-88.
LIU Yingjun, LIU Chang, WANG Wei, et al. Analysis of development status and trend of energy storage technology[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(4): 80-88.
- [23] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3961-3970.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimization scheduling of deep peak shaving for

- energy-storage auxiliary thermal power generating units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3961-3970.
- [24] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyantg, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [25] 张海波, 马伸铜, 程鑫, 等. 保证重要负荷不间断供电的配电网储能规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 259-268.
ZHANG Haibo, MA Shentong, CHENG Xin, et al. Distribution network energy storage planning ensuring uninterrupted power supply for critical loads[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 259-268.
- [26] 杨冬, 刘玉田. 中国未来输电网架结构初探[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 1-5.
YANG Dong, LIU Yutian. Preliminary discussion on china transmission backbone in the future[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 1-5.
- [27] 国家统计局. 电力消费量分省年度数据[EB/OL]. 北京: 国家统计局, 2021[2021-08-01]. <https://www.stats.gov.cn>.
- [28] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望[EB/OL]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021[2021-03-18]. <https://www.gei-journal.com/cn/contents/4/1613.html>.
- [29] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 2020[R]. 北京: 国网能源研究院有限公司, 2020.
- [30] 潘垣, 杨凯, 李黎, 等. 一种分布式山顶抽水蓄能电站的无刷双馈发电电动机系统: 中国, CN202011045707.6[P]. 2020-12-25.
- [31] 王学良, 于继来. 分布式抽水蓄能系统的运营策略及其效益评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 129-137.
WANG Xueliang, YU Jilai. The operation strategy and its benefit assessment of the distributed pumped storage system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 129-137.
- [32] 水电枢纽工程等级划分及设计安全标准: DL 5180—2003[S].
- [33] 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书 2021[R]. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2021.
- [34] 韩杏宁, 黎嘉明, 文劲宇, 等. 含多风电场的电力系统储能鲁棒优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2120-2127.
HAN Xingning, LI Jiaming, WEN Jinyu, et al. Optimization for robust energy storage allocation in power system with multiple wind farms integrated[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2120-2127.
- [35] 甘伟, 郭剑波, 艾小猛, 等. 应用于风电场出力平滑的多尺度多指标储能配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 92-98.
GAN Wei, GUO Jianbo, AI Xiaomeng, et al. Multi-scale multi-index sizing of energy storage applied to fluctuation mitigation of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 92-98.
- [36] 周博, 宋明刚, 黄佳伟, 等. 应对区域供电线路故障的多功能复合储能优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 25-33.
ZHOU Bo, SONG Minggang, HUANG Jiawei, et al. Configuration optimization method of multifunctional hybrid energy storage for regional power line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 25-33.
- [37] 桑丙玉, 姚良忠, 李明杨, 等. 基于二阶锥规划的含大规模风电接入的直流电网储能配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 86-94.
SANG Bingyu, YAO Liangzhong, LI Mingyang, et al. Research on energy storage system planning of DC grid with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 86-94.
- [38] 侯慧, 徐焱, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 74-84.
HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, et al. Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 74-84.
- [39] 甘伟, 艾小猛, 方家琨, 等. 风-火-水-储-气联合优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 11-20.
GAN Wei, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Coordinated optimal operation of the wind, coal, hydro, gas units with energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 11-20.
- [40] 甘伟, 郭剑波, 李相俊, 等. 面向多应用需求的分布式储能优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1504-1511.
GAN Wei, GUO Jianbo, LI Xiangjun, et al. Distributed energy storage optimization scheduling for multiple application requirements[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1504-1511.
- [41] 刘巨, 姚伟, 文劲宇, 等. 一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1596-1605.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. A wind farm virtual inertia compensation strategy based on energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1596-1605.

- 1596-1605.
- [42] SHI M, CHEN X, ZHOU J, et al. Advanced secondary voltage recovery control for multiple HESSs in a droop-controlled DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3828-3839.
- [43] 陈岩, 靳伟, 王文宾, 等. 区域储能站参与扰动平抑的配电网多时间尺度自律策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 134-143.
- CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. Regional energy storage stations participate in disturbance stabilization of a distribution network multi-timescale self-discipline operation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 134-143.
- [44] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 储能参与电力市场机制: 现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 14-28.
- CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Electricity market mechanism for energy storage participation: status quo and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 14-28.
- [45] 舒康安, 张昌, 艾小猛, 等. 基于分段电价的跨区风电消纳[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 39-49.
- SHU Kang'an, ZHANG Chang, AI Xiaomeng, et al. Wind power accommodation based on block price[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 39-49.
- [46] 杨骏伟, 夏云睿, 王一, 等. 电力市场环境下储能使用权出清模型及定价方法[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1750-1759.
- YANG Junwei, XIA Yunrui, WANG Yi, et al. Clearing model and pricing rules of energy storage rights in electricity market[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1750-1759.
- [47] 关玉衡, 张经纬, 张轩, 等. 美国电力市场环境下抽水蓄能调度模式分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 1-11.
- GUAN Yuheng, ZHANG Jingwei, ZHANG Xuan, et al. Analysis and enlightenment of pumped storage dispatch modes under american electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 1-11.
- [48] 张巍, 缪辉. 基于云储能租赁服务的风储参与能量-调频市场竞价策略研究[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3840-3852.
- ZHANG Wei, MIAO Hui. Bidding strategies of wind power and energy storage participating in energy and frequency regulation market based on cloud energy storage leasing services[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3840-3852.
- [49] ALHARBI H, BHATTACHARYA K. Participation of pumped hydro storage in energy and performance-based regulation markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4307-4323.
- [50] 刘思强, 叶泽, 吴永飞, 等. 电化学储能项目商业价值量化模型及竞争策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 41-49.
- LIU Siqiang, YE Ze, WU Yongfei, et al. Study on commercial value quantification model and competitive strategy of electrochemical energy storage projects[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 41-49.

收稿日期: 2022-03-01

作者简介:

文劲宇(1970—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统储能、直流输电、新能源并网与规划、电力市场与碳市场; E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn

周博(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统灵活运行; E-mail: zhoubos563@foxmail.com

魏利岫(1999—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化与电力市场。E-mail: wlshen@hust.edu.cn

(编辑 姜新丽)