第 49 卷 第 1 期：72-85 高电压技术 Vol.49, No.1: 72-85
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211835

百兆瓦级电化学储能电站能量管理研究综述

李建林[1]，王　哲[1]，曾　伟[2]，熊俊杰[2]
（1. 北方工业大学储能技术工程研究中心，北京 100144;
2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院，南昌 330096）

摘　要：储能电站能量管理技术对于提高储能电站运行效率、降低全生命周期成本的重要性与日俱增。为此，首先阐述了百兆瓦级电化学储能电站相关政策、标准及发展现状；其次针对电化学储能电站的数据处理技术和通讯技术架构、应用现状进行详细分析；再次，对储能电站的外部需求及调度管理技术进行了归纳总结，并阐明储能系统中各电池簇级、模组级中的能量管控技术；最后对百兆瓦级电化学储能电站能量管理技术的未来工作进行了展望。

关键词：百兆瓦级电化学储能；能量管理技术；数据处理技术；通讯技术；外部调度管理技术；系统内部管理技术

Review of Energy Management Research on 100-Megawatt Electrochemical Energy Storage Power Stations

LI Jianlin[1], WANG Zhe[1], ZENG Wei[2], XIONG Junjie[2]
(1. Energy Storage Technology Engineering Research Center, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: The importance of energy management technology for energy storage power plants in improving the operating efficiency of energy storage power plants and reducing the cost of the whole life cycle is increasing day by day. This paper first expounds the relevant policies, standards and development status of the 100-megawatt electrochemical energy storage power station. Secondly, the data processing technology and communication technology architecture and application status of electrochemical energy storage power station are analyzed in detail. Thirdly, this paper summarizes the external demands and dispatching management technology of energy storage power station, and clarifies the energy management and control technology in each battery cluster level and module level in the energy storage system. Finally, the prospects in the future work of energy management technology for 100-megawatt electrochemical energy storage power station are put forward.

Key words: 100-megawatt electrochemical energy storage; energy management technology; data processing technology; communication technology; external dispatch management technology; system internal management technology

0　引言

国家发改委颁布的《关于加快推动新型储能发展的指导意见》中提到推动建立储能运行监测等环节的管理体系，预示着健全电化学储能电站管理体系尤为重要[1]。近年来，以电化学电池为代表的储能技术迅速发展，其在电力系统中的规模化应用正在快速增加，预计到 2021 年年底，中国电化学储能累计装机规模将达 5791 MW。随着中国储能装机规模的逐年增长及其集成技术的不断发展，通过电池储能电站去实现平滑风光功率输出、跟踪计划发电、参与系统调频、削峰填谷、暂态有功出力紧急响应、暂态电压紧急支撑等多种应用，已成为了一种可行方案[2-3]。其中关键问题之一，是掌握大规模多类型电池储能电站能量管理技术以及多类型大容量电池储能机组的协调控制方法，因此对储能电站进行能量管理具有深远意义。

电化学储能电站能量管理是提高储能电站运行效率、降低其运行成本的重要因素，它既需要满足不同时间尺度、不同出力程度的功能需求，又需通过实时或预先调整储能系统，使其带来一定的社会和经济效益[4-5]。目前百兆瓦级储能电站能量管理可分为内外两层架构。外层根据电站收到的总体调度指令并结合自身情况实现外界需实现的功能(如削峰填谷、平滑波动、黑启动、作备用电源等)，内

基金资助项目：国网江西省电力有限公司科技项目(52182020008K)。
Project supported by State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute (52182020008K).

层通过电站收到的总体调度指令，对电站内部各簇级、模组级、单体级进行功率协调分配。但目前百兆瓦级储能电站能量管理技术尚不成熟，其状态评估、控制策略方面还存在待改进的地方。因此，有必要深入分析电化学储能电站能量管理相关技术存在的弊端，并对此加以完善，构建合理有效的储能电站能量管理体系。

本文对百兆瓦级储能电站能量管理技术进行了分析，首先梳理了我国百兆瓦级电化学储能电站相关政策和标准发展情况，并结合百兆瓦级储能电站示范工程分析电站发展情况；其次针对电化学储能电站的数据处理和通讯技术现状进行展开叙述，阐明当前主流技术进展；然后对储能电站调度管理技术进行了归纳总结，详细分析储能电站现有充放电调度技术、功率分配策略及状态估计技术等；最后对百兆瓦级电化学储能电站能量管理技术的未来工作进行了展望，为我国未来建设百兆瓦级电化学储能电站提供借鉴与参考。

1　百兆瓦级电化学储能电站发展现状

1.1　百兆瓦级储能电站相关政策和标准

为支撑电化学储能电站应用与产业发展，落实《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》,加强电力储能推广与标准化工作，发挥政策与标准的引领与规范作用，我国已先后颁布了百兆瓦级电化学储能电站能量管理相关政策 30 余项,标准 50 余项，正在构建并完善电站能量管理标准体系。国家能源局、工信部等在近两年频频发布相关政策，强调要提高电化学储能灵活调节能力、加大电化学储能设备的研发力度，旨在推动相关技术问题的突破，进而使得储能电站的应用实现效益最大化[6]。鉴于电力储能系统标准的重要性，我国储能标委会正在积极部署电力储能标准化工作，目前已实施的标准可分为基础通用、运行规范、管理规范和设备规范 4 个维度，如图 1 所示。

在现有储能电站能量管理标准体系中，基本上涉及到电站安装—测试—运行—检修—管理的各个流程，其中，基础通用方面的标准涉及面最广，且发展相对成熟。近年来，储能电站在国内外都引发了火灾事故，引起了国家的高度重视，若不从根源上解决此类问题，将会严重阻碍电力储能的健康持续发展。为此，储能行业的众多先锋纷纷牵头制定安全性、可靠性方面的标准，通过顶层设计，为电

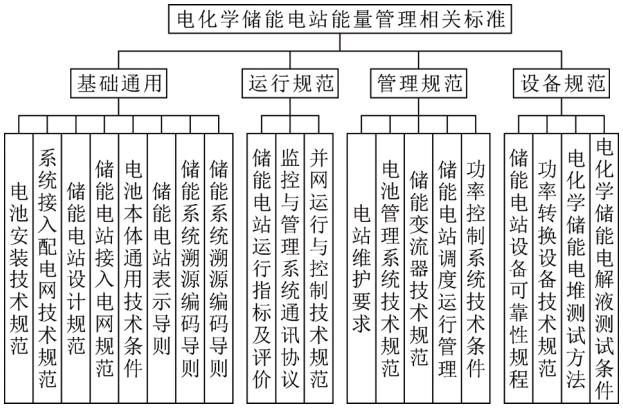


图 1　储能电站能量管理相关标准

Fig.1　Energy management related standards for energy storage power stations

化学储能电站安全稳定运行提供了有力保障。在十四五期间,“多能互补能源体系建设”的提出加快了以“新能源+储能”示范项目为主,“电网侧、用户侧+储能”示范项目为辅的建设速度，这同时也标志着外界对电力储能的多元化用电需求日渐加强。为此，国家还需将标准化进一步深入，例如对集成规范、应用场景中技术指标提出相应的要求。

目前国家有关部门尚未出台完整的电化学储能消防安全和施工及验收方面的标准。仅颁布 GB/T 40090—2021《储能电站运行维护规程》等标准作为储能电站投运过程中施工及验收标准的依据，电化学储能电站消防安全准则现主要按照 DL 5027《电力设备典型消防规程》执行。为加快完善上述两方面标准，国家发改委、国家能源局在 2021 年 8 月组织起草了《电化学储能电站安全管理暂行办法(征求意见稿)》，其安全防护和施工及验收标准正在加快制定当中。

储能电站到达一定的运行周期后，需要对电池本身、电池管理系统、功率转换系统以及消防系统进行维护。电池性能衰减至退役时，需要在不影响其余电池组正常工作的情况下，合理、规范地将其拆解。因此，我国还需加快制定和实施上述几方面的相关国家行业标准。

为了进一步细化国家颁布的储能电站相关政策，京津冀、山东、福建、江苏、青海、广西等电化学应用重要省份也纷纷响应国家的号召，发布相关政策，以此促进百兆瓦级电化学储能电站的示范应用，推动其可持续健康发展。

1.2 百兆瓦级储能电站示范工程

自十三五规划起至今，国际能源态势已从产能、节能扩展到储能[7]。表 1 为近五年国内外典型电化学储能示范工程概况。美国的电化学储能装机规模比去年翻了 1 倍，LS Power 和 Vistra Energy 相继投运了 250 MW/250 MWh 和 300 MW/1200 MWh 的电化学储能项目，后者是全美乃至全球最大的电池储能项目。此外，德州、纽约州、佛罗里达州等地还有类似几个百兆瓦级的大型电池储能项目正在加速部署中。欧洲各地发布资金支持助力清洁能源转型、推动储能技术创新等激励政策的实施，为市场释放了积极信号。欧洲最大电池储能项目将扩容至 150 MW；英国取消电池储能项目容量限制，允许在威尔士部署规模在 350 MW 以上的储能项目；德国克雷姆佐夫 22 MW/31.6 MWh 项目于 2019 年投产，德国 Cottbus50 MW/53 MWh 项目在 2020 年投产，上述示范工程的建立也预示着以抽水蓄能为主要储能形式的德国在逐渐向百兆瓦级储能电站发展。

我国已将能源发展战略重心引向电力储能方向。国家电网、南方电网、中国铁塔公司等企业在近两年里投入了众多大型百兆瓦级储能示范项目。例如，为了探索电站的应用价值，国网江苏电力有限公司建设了江苏镇江储能电站，探索大规模电池储能电站在不同应用功能下的运行指标和性能，目前电站已参与电网调峰、调频、应急备用等多种辅助服务，研发人员还在进一步研究与优化电站在不同运行模式下的控制策略；青海海西多能互补集成优化示范工程充分利用青海当地负荷及能源分布特点，通过构建储能系统实现横向多源互补，纵向“源–网–荷–储”协调运行，并创造了一定的经济效益。该工程充分利用电、热储能和光热的调节作用，采用大型储能电站的功率协调控制与能量管理等技术，降低弃风、弃光率和储能系统运行成本，提高供电可靠性。目前，乌兰察布正在建设“源网荷储一体化”示范，该示范工程在风光系统中配置 880 MW 大规模储能系统，分别用于电力系统调峰、促进新能源消纳，可有效提升电力系统综合运行效率、增强地区电网尖峰负荷保障能力。与此同时，国内的五大发电集团也在响应“碳达峰，碳中和”的号召，积极部署储能示范工作。在 2020 年前，全球投运的百兆瓦级以上的储能项目不超过 10 个，而 2020 年间发布的规划在建的百兆瓦级储能项目超过 60 个。

表 1 近五年国内外典型电化学储能示范工程概况表

Table 1 Overview of typical electrochemical energy storage demonstration projects at home and abroad in the past five years

序号	国家	示范工程	电化学储能规模
1	中国	江苏电网侧百兆瓦级电池储能电站示范工程	101 MW/202 MWh
		青海海西州多能互补示范工程	50 MW/100 MWh
		河南电网侧分布式百兆瓦级电池储能示范工程	100.8 MW/125.8 MWh
		湖南电网侧储能电站示范工程	100 MW/200 MWh
		大连液流电池储能调峰电站示范工程	100 MW/400 MWh
2	美国	HECO 电网级光储示范工程	258 MW/566 MWh
		弗吉尼亚光储示范工程	12 MW /48 MWh
		GE Renewable Energy 首个光储示范工程	5 MW/20 MWh
3	英国	华能英国门迪储能示范	99.8 MW/99.8 MWh
		英国国家电网 EFR 电池储能示范工程	25 MW/12.5 MWh
4	德国	Reizow100MW/200MWh 锂电池储能电站示范工程	100 MW/200 MWh
5	澳大利亚	特斯拉南澳储能示范工程	100 MW/129 MWh
6	日本	日本九州福冈钠硫电池储能示范工程	50 MW/300 MWh
		日本北海道纹别光伏电站储能示范工程	9 MW/8.17 MWh

综上，我国电化学百兆瓦级储能电站的应用已展露出良好的发展前景，但随着电网中主体日益复杂，实际应用中电站要满足多元化需求绝非易事。现如今，实际运行的电站在安全性和经济性方面不可兼得的状况表现出电力储能现有技术还有待提升，亟需更先进的数据分析、通讯、储能电站内外层管控技术在实际工程中得到应用，进而让电力储能在经济性、可靠性、稳定性等方面得到综合提升。

2 电化学储能电站数据分析及通讯技术

2.1 百兆瓦级电站数据预处理技术

储能电站历史和实时数据表征了机组运行的真实情况，将此类数据预处理是储能电站进行管控、调度的第 1 步[8-10]。数据预处理技术面向储能电站采集的可测数据和不可测数据，以数理统计或算法模型的方式对电站采集到的数据进行加工、整理，目前电站采集数据的主要范围如表 2 所示[11-12]。

可测数据主要分为数字量、模拟量和状态量，状态量多为电池好坏状态；不可测数据主要以数字量形式呈现，通过算法获得该数据后，利用通讯信号将其传入对应的管理单元中。

数据预处理包括数据清洗和数据集成。在数据清洗方面，采集后的数据集中往往会出现部分数据丢失和数据异常的现象，目前主要通过近邻值或均值补齐缺失数据，然后利用曲线拟合或现有聚类方法(如 K 均值算法、均值偏移聚类等)移除异常值[13]。作为大容量储能电站的大数据分析关键技术，数据集成可实现数据质量监控和数据融合。通过可视化数据监测，将执行过数据清洗的多来源、多模态数据集进行数据融合，便于储能电站的大数据存储。目前数据融合可通过小波变换、概率论统计等基于特征的融合法或决策树、逻辑推理等基于决策的融合方法实现[14]。其中，小波变换能够通过伸缩平移运算对信号进行多尺度分解，将高频处时间细分，低频处频率细分，可自适应时频信号分析需求，从而聚焦分析信号的任意细节，是目前数据融合的主流技术[15]。

表 2　电站采集主要数据

Table 2　Energy storage power station collects main data

序号	参数	测量方式	模块类别
1	单体电池电压	霍尔传感器	从控
2	电池簇/箱电压	霍尔传感器	主控
3	环境温度	霍尔传感器	主控
4	电池簇温度	霍尔传感器	主控
5	电池簇/箱电流	霍尔传感器	主控
6	电池簇/箱充放电功率	计算	主控
7	电池单体状态参数(荷电状态(state of charge, SOC)、健康状态(state of health, SOH 等)	计算	从控
8	储能变流器(power conversion system, PCS)参数	计算	从控
9	绝缘检测	电池组控制单元	主控
10	高压互锁、继电器等辅助设备	电池组控制单元	主控

现有数据预处理技术较为先进，利用其数据分析、存储、管理和共享等所需核心技术的先进性，可为储能电站提供灵活的交互分析和自由数据探索能力。目前已将上述部分技术投入到应用中，为电站的状态评估、内部管理和调度控制的工作打下坚实的基础，并通过大数据分析平台的形式予以呈现。

2.2　百兆瓦级储能电站通讯技术

根据 GB/T36558—2018《电力系统电化学储能系统通用技术条件》[16]，百兆瓦级电化学储能系统主要由监控系统、供配电系统、电池管理系统和能量管理控制系统构成。储能电站信息传递框架如图 2 所示。

电网侧和负荷侧需求信息通过信息接收系统传输至储能电站的通信管理装置中。电池管理系统(battery management system，BMS)接收监控系统和能量管理系统(energy management system，EMS)下达的电池运行参数，如电压、温度、SOC 的保护设

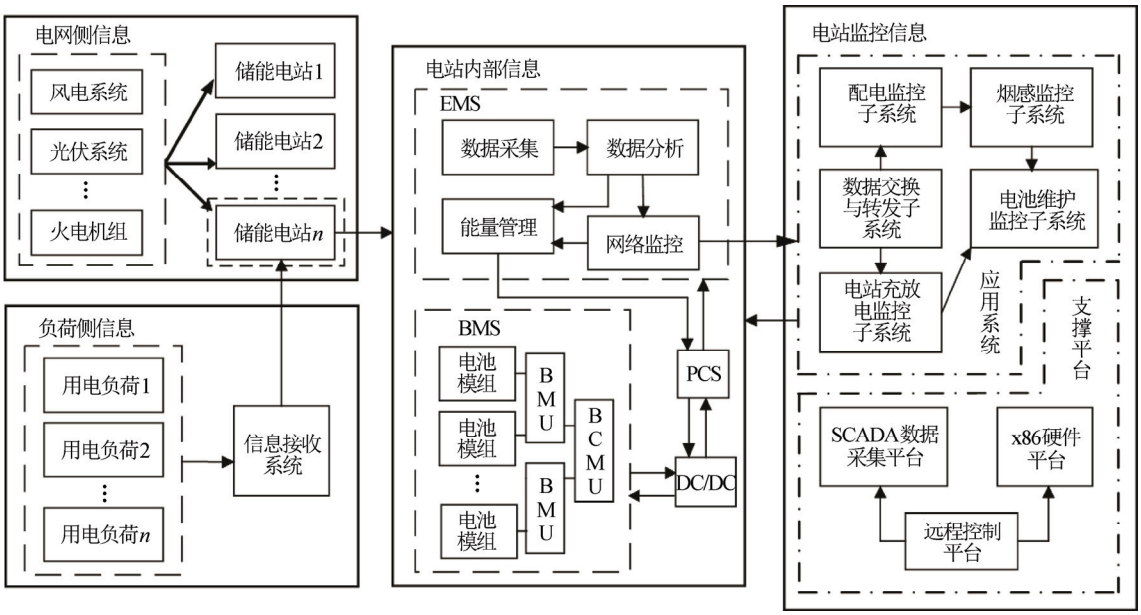


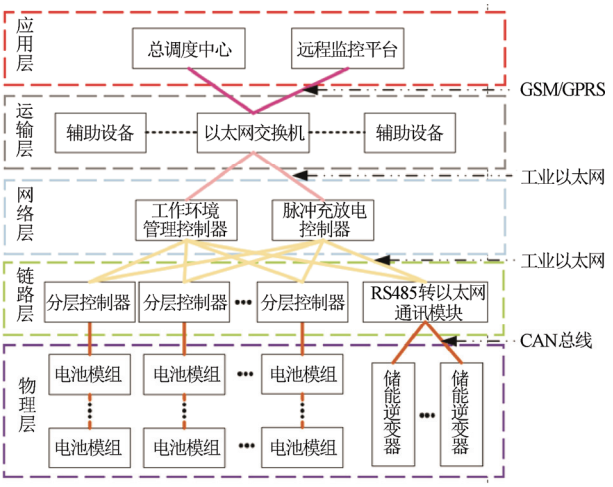
图 2　百兆瓦级电化学储能电站信息传递框架

Fig.2　Information transmission framework for 100-megawatt electrochemical energy storage power station

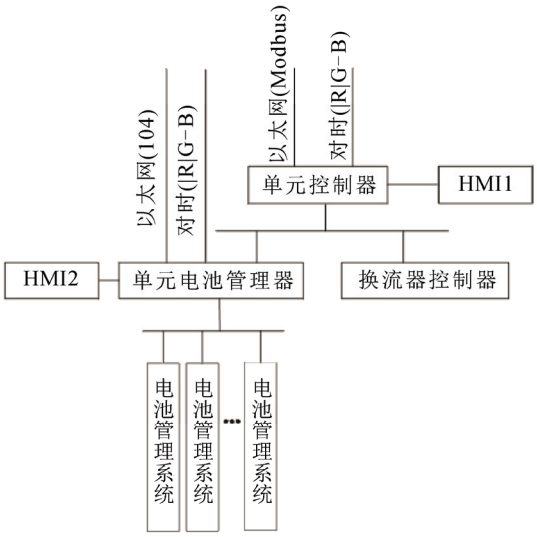
定值、报警设定值等。主控模块(body control module unit，BCMU)汇聚整个电池组单元的相关信息，并将电池单体、电池模组和电池簇信息通过以太网(RJ45)传递给监控系统 EMS。BMS 发送的信息有电池的充电电压、环境温度、内阻、SOC 和 SOH 等状态量信息，还有像 SOC 阈值、温度阈值和充放电量阈值等告警量相关信息。储能变流器(power conversion system，PCS)接到 BMS 告警信息后应进行相应的保护动作。监控系统主要监管供配电系统、电池管理系统和能量管理系统等设备的运行情况，方便统一管理和数据共享。

在符合国际规范和标准的情况下，根据具体需求，并充分利用现有资源，考虑储能电站箱体空间结构、电气排布，对储能电站通信网络架构进行科学合理的构建。当前储能电站通信领域主流架构如图 3(a)所示。NB/T 42090—2016 电化学储能电站监控系统技术规范强调储能系统通讯协议应具有多层次结构。考虑到海量的数据需要解析、聚合，应用层能够支持系统信号采集、监视、控制及故障处理，可采用双以太网对不同层级、不同维度数据进行高效处理。运输层通过以太网交换机建立虚拟传输网络，能够实现应用端与控制端的信号、信息交互。网络层既要解决不同网络的节点间通信的路由和协议识别问题，又要通过路由选择策略解决网络拥塞问题，尽可能提高网络通信的可靠性。链路层负责控制数据在上下层相互传输。采取差错检测、差错控制与流量控制等方法，将有差错的物理线路改进成逻辑上无差错的数据链路，以便向网络层提供高质量服务。作为整个百兆瓦级储能电站通信架构的最底层，物理层将数据状态量转换成可传输量并传送至上级。在物理层中，可利用 CAN/RS485 总线分别连接至 BMS 和电池模组的通信接口，使得电池模组的性能状态、通讯状态等数据转换成二进制载波信号传输到 BMS 中[17]。这种多层次的通信网络架构大大提高了储能电站通信系统的可靠性和冗余性，且技术比较成熟，目前应用较为广泛。

每个电池管理系统、变流器控制器和人机界面(human machine interface，HMI)对一簇电池簇进行管理，并且电池管理系统和变流器之间能交互通信、协调储能电池簇运行，如图 3(b)所示。每个电池管理系统都具有一个 IEC 104 接口，用来传达电池一般状态信息；变流器控制器具有一个 Modbus TCP/IP 接口，用来和储能监控系统进行通信，传达



(a) 兆瓦级储能电站通信网络架构



(b) 电池系统通讯架构

图 3 电化学储能电站通讯结构

Fig.3 Communication structure of electrochemical energy storage power station

电池关键状态信息，并能根据上位机的指令进行相关动作；电池管理器对外提供以太网通讯接口和对时接口，同时将电池模组信息传送给单元控制器，并在变流器 HMI 界面上显示。

2.3 小结

多层次的通信网络架构以及电池系统通讯架构在实际中得到较为广泛的应用，在一定程度上提高了电站运行的传输效率、降低了电站运行故障率。储能电站内部空间狭小，电气排布密集，信息采集点多，采集数据量大，总线吞吐率高。未来关于进一步提升百兆瓦级储能电站通信鲁棒性的难题在于如何综合考虑通信网络的可靠性与实时性以及以太网交换机的处理速度。

3　百兆瓦级电化学储能电站需求响应及外部调度管理技术

3.1　电化学储能电站外部需求响应分析

目前，电化学储能电站外部需求响应主要分为调峰调频、平抑新能源波动、削峰填谷、应急供电、计划跟踪出力、黑启动等[18-20]。

在辅助传统火、水、燃气等发电机组为电网调频时，储能系统主要下发紧急交换功率控制，以合适的补偿度水平来补偿机组出力与自动增益控制(automatic gain control，AGC)指令的实时偏差，迅速提升火电机组的调节速率、调节精度和响应时间，进而大幅度提高 AGC 性能指标，同时补偿费用也能得到大幅度提升。

风光等新能源发电存在不稳定性，电化学储能系统可通过充放电调节，使得新能源输出的功率曲线更加平滑。考虑到时间尺度，储能平抑新能源出力波动需要同时兼具瞬时大功率和长时小功率供电能力，以提升新能源供电可靠性。此方式不仅可以提高新能源在当地的利用水平，也可以助力新能源跨区消纳。

在针对用户侧削峰填谷时，储能系统通过下发定/变功率控制指令，在电力系统需求处于低谷和高峰状态时，分别执行电网向储能系统充电，储能系统放电至电网操作，可实现峰谷价差套利这一商业盈利模式。考虑到运行经济成本，在此功能实现方式下，更适合采用能量型电化学储能系统满足用电需求。

在为工厂、电网、城市进行应急供电时，电化学储能系统下发紧急交换功率控制，根据用户具体用电情况调整储能系统出力时间及大小，进而保障重要用户重要负荷供电的连续性，为用户提供不间断、持久、经济的应急电力供应。

综上，若要满足现如今实际应用当中负荷的大小、时间长短以及功能要求，制定好控制时间尺度、出力程度的百兆瓦级电化学储能系统充放电控制策略至关重要。

3.2　电化学储能电站充放电控制策略

以实现功能、需求响应时间和电站内各电池簇能量协调这 3 种因素为参考角度，可将储能充放电控制策略分为基于目标函数、时间尺度以及博弈论的充放电控制策略。

3.2.1　基于目标函数的充放电控制策略

储能电站充放电控制为单目标函数时主要以满足负荷用电需求情况下总调度周期内运行费用最少或系统能量损耗最少为主。例如，针对光伏发电波动性和随机性较强问题，文献[21]提出了基于光伏功率预测的光储电站能量管理策略，根据光伏功率和并网功率的波动以及储能电池的实时充电状态，通过控制理论调整最大功率点跟踪(maximum power point tracker，MPPT)的工作点和储能电站充放电功率。所提出光储电站能量管理策略能够有效抑制光伏发电的波动，光储电站能够有效跟踪计划出力，同时该策略可提高光储电站并网系统的稳定性，但该方法未考虑系统损耗和经济情况。

在考虑多目标函数时，储能系统多以储能运行费用最少、运行效率最高、较好地维持电网电压和频率水平、故障情况下投切设备等因素构建多目标函数，从而根据预测需求和实际需求之差对储能电站出力进行调整。基于多目标因素的充放电控制策略多根据典型功率曲线和电站内部状态、地区分时电价等因素建立多目标函数，通过执行智能优化算法求解出储能电站每个时段内电站的出力情况，具体流程如图 4 所示(T 为控制策略执行的时间，一般取 24，即每日执行一次图 4 中的储能电站充放电控制策略)。

文献[22]提出了计及配电网经济、网络损耗和提高电压质量的多目标储能系统运行模型，将纵横

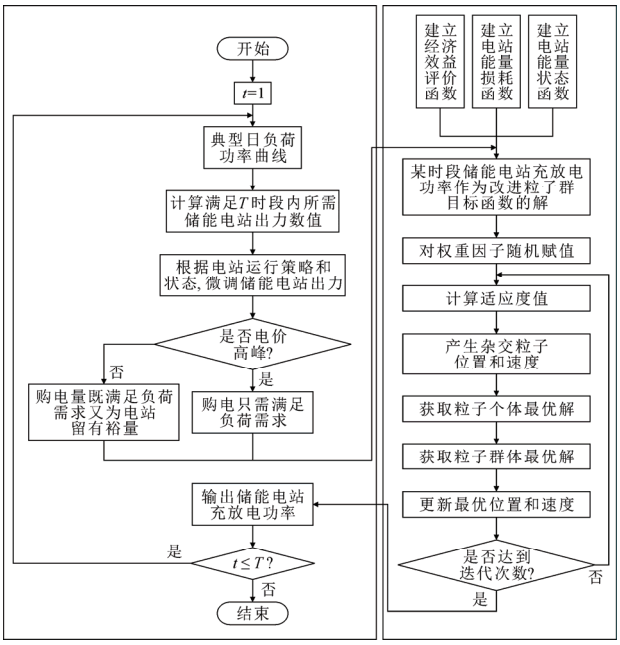


图 4　储能电站充放电控制优化策略

Fig.4　Common process of charging and discharging control optimization strategy for energy storage power station

交叉算子引入粒子群算法，并采用交叉搜索的方法以维护种群多样性，以电池 SOC 为粒子位置矢量元素，实现储能系统优化运行策略求解。实验表明，多目标优化算法效果较好，不仅能提升配电网经济效益，还可提高配电网电压质量。

多目标储能电站充放电控制策略对各类电源与负荷建立模型，分别对其需求进行预测，根据负荷重要程度进行分类，在满足系统高效稳定运行的基础上，通过调研的方式进行失负荷价值评估，经分析后确定电源的调度指令及切负荷操作，可更全面地实现储能电站优化调度。

3.2.2 基于时间尺度的充放电控制策略

滚动时域优化电站充放电过程中，调度出力计算需考虑小时级、分钟级和秒级的时间尺度。

文献[23]采用超级电容器和蓄电池作为功率型和容量型储能载体，将载体的荷电状态分区域进行功率分配调控，通过算例分析可得，此策略能够实现 1 min 和 30 min 时间尺度下并网波动率的降低以及储能系统总体运行成本最低。文献[24]对单台风电机组和风电场输出功率在不同时间尺度下的波动特性进行了量化分析对比，利用基于模糊控制的储能控制策略平抑时、分、秒级时间尺度下风电波动。文献[25]首先计算风电功率偏差并构建考虑补偿系数的储能系统充放电指令，然后建立了长时间尺度下电池容量变化和输出功率波动的补偿系数寻优模型和短时间尺度下电池充放电状态的补偿系数修正模型，所提策略能够较好地实现削峰填谷。

大规模电化学储能系统在实际运行时会存在小时级、分钟级、秒级等不同时间节点储能系统爬坡需求，基于时间尺度下的储能充放电策略可优化不同应用场景中储能系统调度精度，使之可满足外界功率需求的情况下不存在出力冗余现象。电化学储能系统调度模型随时间尺度减小而复杂，已经较为理想地实现了能量优化调度。但储能系统存在同一时刻不能既充电又放电的情况，目前主要将充电和放电功率作为两个独立的优化变量进行建模求解，但这两个变量之间存在约束关系，使得计算量较为复杂、且计算时间较长，在未来服务于百兆瓦级电化学储能电站时还需对现有策略进行更深一步优化。

3.2.3 基于博弈论的充放电控制策略

博弈论是指通过评判依据分析各个主体的利益，进而达到各方共赢。在储能电站充放电控制策略中引入博弈论，可动态调整电站某时段或预测未来时段的出力程度，进而保障电站所服务系统的稳定运行，基于博弈论的电站充放电控制示意图如图 5 所示。

文献[26]在微电网中采用非合作完全动态信息博弈理论，建立以微网发电成本最低、满足设备容量和电池本身状态为边界条件的微网运行博弈模型，能够在满足负荷需求的基础上实现供应商利益最大化。文献[27]根据能源共享的 3 个阶段，基于 Stackelberg 博弈理论，提出了一种具有隐私意识的分布式能量管理策略，通过适时改变博弈论中参与者的身份，使得所有参与者均能做出最优反应，同时运用模拟退火算法寻找博弈平衡点；实验表明，采用共享储能后的社区微电网对电网的影响显著降低，且产销者和共享储能提供者的效益都有一定程度的提升。文献[28]建立了上层含供电公司和微网，下层含微网和用户能源交易均衡问题的双层 Stackelberg 博弈模型；经算例验证，所提方法使得各参与者都获得了均衡策略，并解决了不同利益主体之间的冲突问题，此方法具有良好的收敛性和经济性。

目前博弈论主要集中分析微网中多个利益主体的能量分配和经济效益，解决了区域能源合理利用，微网、产销者和用户的购电、用电等问题。但储能电站内部各电池簇或模组适应于外界负荷需求的功率分配问题尚未有过多研究，此方面或可成为“十四五”政策下电化学储能领域研究的热点之一。

3.3 小结

储能电站可广泛应用于发电侧、电网侧、用户

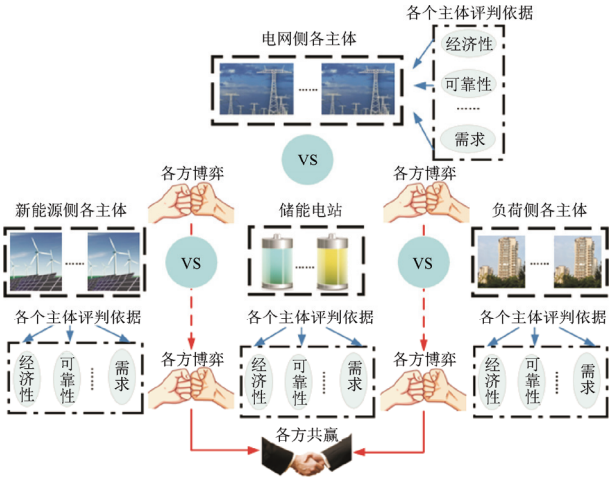


图 5 基于博弈论的电站充放电控制示意图

Fig.5 Schematic diagram of power station charging and discharging control based on game theory

侧场景中，制定符合场景需求的充放电控制策略尤为重要。考虑时间尺度和博弈论的储能充放电控制策略分别侧重于调度精度和经济效益，基于目标函数的充放电控制策略能够尽可能满足调度需求、经济最优、损耗最小等多重因素，但其求解的调度精度没有基于时间尺度的控制策略理想，求解经济效益结果没有博弈论控制策略理想。未来创新储能充放电策略可将 3 者理论进行融合，使得充放电策略的目标更加全面，求解效果更加优异。

4　电化学储能电站系统内部管理技术

4.1　电站状态估计技术

《电化学储能电站设计规范 GB 51048—2014》要求储能电站的运行状态参数误差要在预设的范围内。从电池储能系统的角度来说，其充放电功率和储能容量有限，且过度充电和过度放电都将对储能电池的寿命造成影响。因此，合理管控储能电池状态，在满足储能系统外部充放电功率需求的前提下，对不同性能状态的各支路电池模块功率进行动态分配，可实现基于各支路电池模块的储能电站能量管理。

4.1.1　基于电化学内部机理的电站状态估计技术

对电池内部微观的物理及电化学过程进行分析，主要侧重于对电池衰老过程的分析。寻找恰当的老化程度表征参数，并建立这些参数和电池老化程度之间的对应关系，进而获得老化机理模型，该方法示意图如图 6 所示[29-31]。此方法估算精度差一些，但工作量较小，是目前主流发展方向之一，技术难点是特征参数的定位与获取。

电化学内部机理分析包括模型构建和解析。对于内部机理模型的构建，通过设计特定的电流激励信号，将电池内部不同过程对应的端电压表现依次激发出来，构建锂离子电池简化电化学模型，虽然整包检测需要深度充放电激发电池的特性，耗时较长，但是整包利用经济性最佳，并且可以同时获知多个内部单元的状态，从而抵消时间和设备成本。

储能电站内部电池测试数据的模型解析主要分为两方面：

一方面，在经典复杂电化学性能仿真模型的基础上，可研究数学变换、模型降阶和近似等效方法的模型简化、参数约减方法，进一步探讨不同电池电压成分与模型内部不同动力学过程的关联关系，从而实现电化学模型参数的解耦辨识。这种方法中常用概率模型法，将电池等效电路模型与概率分析方法(如贝叶斯回归及分类算法)相结合来描述电池的老化及容量衰减过程，并通过实验对模型进行验证。除此之外，还有利用阿伦尼斯模型关注温度对电池耐久性的影响，逆幂律模型通过电压击穿等电应力研究电池失效机理，使用机械应力(SOC 增量与 SOC 均值的乘积)表征电池实时状态。

另一方面，针对阻抗谱数据构建分数阶等效电路模型并辨识其参数，重点研究基于阻抗谱形貌特征和电池机理分析的模型参数初值选取方法，保证参数辨识结果的稳定性，进一步通过时频域变换将频域阻抗模型转换为时域等效电路模型。通过上述两个方面的研究，对外部可观测电压、电流数据进行模型解析，可实现电池包内最小可分辨单元(电压、电流可测的单体或者最小模组)物性参数的解耦辨识。

对于单体电池状态检测场景，由于其数量较大，且考虑检测时间问题，未来可采用基于频域电

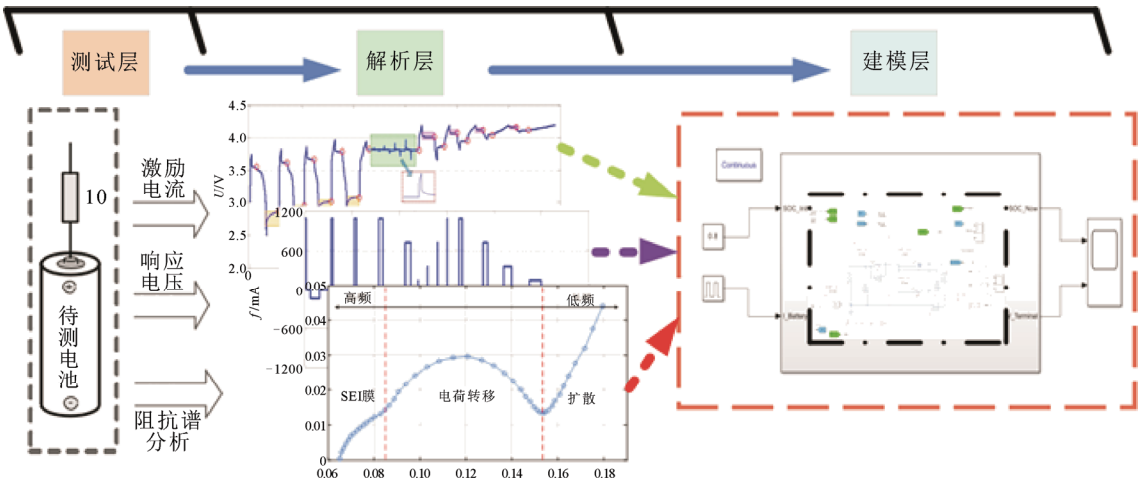


图 6　基于电化学内部机理的电站状态估计技术示意图

Fig.6　Schematic diagram of power plant state estimation technology based on the internal mechanism of electrochemistry

化学阻抗谱技术对其特性进行测量和解析。首先，设计开发基于多正弦叠加电流激励的阻抗谱快速测量装置；然后，构建电池频域分数阶等效电路模型，并结合电池频域响应机理和参数辨识算法可靠获取频域模型参数；最后，通过时频域变换方法将频域阻抗模型映射到时域，从而实现对电池电压–电流特性的时域仿真。

4.1.2 基于特征工程的电站状态估计技术

目前电化学储能电站多为锂电池单体通过集成方式组合而成，考虑到锂电池分析技术成熟度有待进一步提升，且锂电池老化机理分析复杂，可通过观察能够表征电池退化机理的外部数据，将数据经过一系列处理，转变成整个电站的能量状态的电站状态估计技术，即基于特征工程的电站状态估计技术，此类技术示意图如图 7 所示。

特征工程主要分为特征选择和特征提取。特征选择在数据集合中发现并挑选出最能够反映电站能量状态的几个参数；特征提取在已选出的几个重要性参数数据中找出反映电站能量状态变化趋势的某个特征数值。目前在电池状态估计领域的研究中，特征选择与特征提取主要方法见附录 A 表 A1[32-36]。

将特征工程筛选出的数据代入到机器学习模型中训练状态估计模型，再将实时数据导入至此模型中即可获得电站内部单体级、模组级甚至各簇级电池的能量状态。文献[37]使用随机森林算法对电池电流、电压和温度数据作为输入，与 3 者相对应的 SOC 作为输出的估计模型进行训练，实验证明该方法具有很高的估计电池 SOC 能力。文献[38]在低平均倍率脉冲放电工况下，运用非线性最小二乘法、卡尔曼滤波联合方法提取电池容量特征和内阻特征参数，并通过容量衰退实验验证了该方法的有效性。文献[39]通过电池寿命循环实验分析电池老化机理，建立了基于容量增量曲线的电池 SOH 估计模型。通过容量增量曲线提取部分特征参数，将特征参数和电池剩余容量分别作为模型输入量和输出量，利用神经网络模型实现电池 SOH 的估算。

若考虑成本问题，常采用传统经验法作为特征选择方法，特征提取方法通常运用像非线性最小二乘法等步骤、操作简单的算法实现；若考虑精度问题，常采用随机森林、灰色关联对数据进行特征选择，利用容量增量曲线(IC 曲线)或伏安曲线(CV 曲线)提取数据特征，实现电站的状态估计。根据已获得的电站内部各电池簇状态信息，对其进行功率分配。

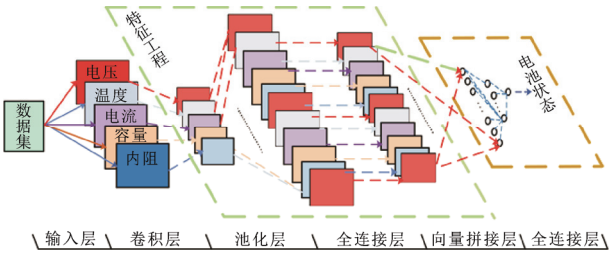


图 7 基于特征工程的电站状态估计技术示意图

Fig.7 Schematic diagram of power station state estimation technology based on feature engineering

4.2 电化学储能电站均衡管理策略

生产、工作环境带来的不一致性问题会导致整个电池容量不能有效发挥，整体存在“木桶效应”。综合储能电池组状态、电池电压、电池 SOC、温度、电池厂家、循环次数等相关因素，对储能电站中的各个电池组进行均衡管理，能够在高压使用环境下对电池组端电压进行一致性的控制，使得各电池组工作时状态基本趋于一致。

4.2.1 储能电站被动均衡技术

被动均衡一般通过电阻放电的方式，对电压较高的电池进行放电，以热量形式释放电量，其余低电压电池继续充电，直至所有电池电压一致。在锂动力电池电芯两端并联电阻，让电阻消耗掉部分锂动力电池能量。电阻长期并联在电池两端，电池电芯(或电池组)电压较高时，通过电阻的电流大，消耗的电量多；电池电芯(或电池组)电压较低时，电阻消耗电量小。可通过电阻这种压敏特性，实现电池端电压的均衡。

目前最简单的均衡电路为负载消耗型均衡电路，即在每节电池上并联一个电阻，并串联开关起到控制作用。在某节电池电压过高时打开开关，充电电流通过电阻分流，使得电压高的电池充电电流小，电压低的电池充电电流大，但这种实现电池电压均衡的方式只能适用于小容量电池，对于大容量电池，此管理方式下的电池间端电压一致性较差。未来随着电芯一致性的提高，对被动均衡的需求会逐渐降低。

4.2.2 储能电站主动均衡技术

为解决上述大容量一致性较差问题，专家们研发了不同种主动均衡电路。主动均衡电路在充电时通过均衡电容器或均衡电感等元件及双向开关的频繁切换，将多余电量转移至高容量电池模组，放电时将多余电量转移至低容量电池模组，实现电池间

的电压及 SOC 均衡，进而提高电池模组间使用效率。但此方式成本较高，电路复杂，可靠性低。主动均衡策略技术拓扑及效果示意图如图 8 所示。

4.2.3　储能电站主动被动协同均衡技术

考虑到电池参数间的耦合性和上述两种均衡技术的优缺点，文献[40-41]均提出了新型主动被动协同均衡技术，通过对硬件电路的修改，在电压极差较小时采用被动均衡技术，既简单又能节省成本；必要时采用主动均衡技术，既提高电池间均衡效果又降低线路间能量损耗。

随着电池间不一致性要求的提高及提高可靠性、节约使用成本的需求提出，主动被动协同均衡是日后均衡技术发展的主流方向。但目前此方式的控制电路存在一些技术难题尚未攻破，未来可通过深入研究，将电量转移的优化算法与主被动协同均衡电路结合起来，进一步提高均衡效果和电路可靠性，为百兆瓦级电化学储能电站建设提供更优服务。

4.3　电化学储能电池簇功率分配策略

从电池储能的角度来说，过度的充电和放电都会对电池的寿命造成影响。因此，根据电池荷电状态等重要性参数合理分配储能电站中各电池簇有功功率需求是十分必要的。

4.3.1　考虑电池 SOC 不一致性的储能电池簇功率分配方法

考虑经济性和持续可调度性两方面因素，文献[42]制定了 3 种基于电池 SOC 的控制策略。其中，按比例分配方法求出各电池组 SOC 并利用电池 SOC 表征剩余容量，利用剩余容量之比分配功率，经济分配综合考虑外界对电池 SOC 的需求，按最大能力输出策略将电池组各 SOC 分区，形成在不同区域下的动态能量分配。实验结果证明了这 3 种策略均能实现储能系统的优化运行，并提高系统运行的经济性。文献[43]提出了一种支持黑启动的多储能协调控制策略。根据储能系统荷电状态的工作分区，将储能系统划分为 24 种运行模式。针对每个储能电站的功率分配问题，提出了一种自适应的多储能动态分配模型。功率跟踪控制层采用 V/f 和 PQ 相结合的控制策略，能够完成储能电站之间上层功率指令的最优分配，并将实时 SOC 反馈给功率计算分配层。实验表明，该控制策略可实现电网黑启动时的功率平衡和电压频率稳定。

由于电站在实际运行中主要目的是满足外界负荷的用电需求，因此考虑电池荷电状态是储能电池簇功率分配策略的重中之重，但在多场景下保证电化学储能系统安全、提高其运行效率并发挥系统商业价值是目前亟需解决的关键问题，需要进一步研究储能系统内部功率分配策略，使其在满足不同调度指令要求的条件下同时具备较高效率、安全性和可控性。

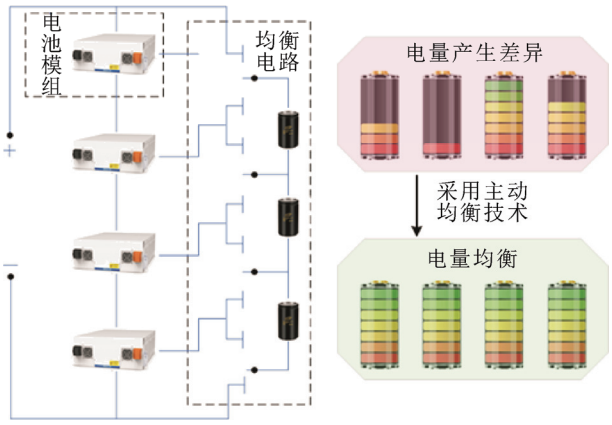


图 8　主动均衡策略技术拓扑及效果示意图

Fig.8　Technical topology and effect diagram of active balancing strategy

4.3.2　考虑电池其他因素的储能电池簇功率分配方法

目前储能电池簇功率分配主要考虑各电池簇 SOC，随着电化学储能技术逐渐向商业化、规模化发展，近几年里对储能内部控制的目标包括：满足外界需求和保证安全的情况下系统运行效率更高、延长系统使用寿命、更具盈利前景。

文献[44]考虑效率、经济性、SOC 一致性等因素，对全钒氧化还原液流电池储能系统的功率分配展开了研究。该文建立了储能系统折损成本最低、储能系统损耗率最小和电池 SOC 一致性较好为多目标函数的系统内部功率分配模型，在构建因某标准而制定的 4 个评价指标的条件下，采用改进自适应权重算法求解模型，实验证明该策略可减少电池充放电次数，降低电池运行成本，提高工作效率。文献[45]为了延缓电池寿命衰退、提高储能系统使用年限，提出一种计及电池组健康状态的储能系统能量管理策略，策略包括确定负荷要求所需工作电池组个数以及制定电池组充/放电优先级判据。仿真结果表明，工作的电池组能够保持较为均衡的 SOC，且放电深度较为一致。文献[46]在所提控制策略中考虑功率损耗因素，采用自适应差分进化算法对策略进行求解，实验证明相比于传统策略，采用此策略后电池组投切次数和系统整体损耗大大减少。

为了加强日后百兆瓦级储能电站实际应用中的管控能力、提高经济效益，除上述考虑因素外，电站功率分配策略还可考虑内阻一致性、线损、网损和可持续调度性等因素。

4.4 小结

数据驱动方法求解电池状态的精度取决于数据的数量和精准度，电池内部机理模型分析较为复杂，不能将此方法单独用于电站级状态估计，储能电站状态估计应朝着融合内部机理与数据驱动法的方向开展研究。为保障电池组一致性，提高电池组运行效率，在电力电子电路方面需加强主动被动协同均衡技术攻关。综合考虑电池本体以及电路和设备性能，建立精准有效的电池簇功率分配策略模型，通过机器学习、智能算法等先进算法对其进行求解，以保障储能电池簇稳定、可靠运行。

5 结论

百兆瓦级电化学储能电站能量管理有助于推动我国碳达峰、碳中和目标加速进行，需重点关注数据处理、通讯技术、内外部调度管理技术及状态评估技术。现将上述讨论内容总结梳理如下：

1）百兆瓦级储能电站相关政策需细化至全国各地各县，将储能电站能量管理逐步规范化，由示范工程牵头，带领更多的试点企业参与百兆瓦级电化学储能电站项目，进一步扩大兆瓦级储能电站应用推广范围。

2）百兆瓦级电化学储能电站数据庞大，应运用智能采集终端、大数据云平台、AI 人工智能分析等核心技术，更好地为电站远程管理、智慧运营提供智能化、精准化服务。

3）储能电站并网运行过程中，不同应用场景下储能电站的运行功能需求不同，且一天内不同时间段运行功能需求也不同。储能电站能量管理系统需要集成大规模多元化运行策略或者不考虑多种策略之间的配合，以提升百兆瓦级电化学储能电站利用率。

4）储能电站内部能量管理涉及到电站簇间、经济性、可靠性以及满足需求的系统优化问题，不论是基于规则的启发算法还是数学优化算法，它们的适用范围都受到限制，如何兼顾储能子站自身情况优化功率分配和多类需求问题还需要深入研究。

5）百兆瓦级储能系统运行应以延长储能设施寿命为核心，在满足调度要求的条件下，尽量避免设备使用次数不均衡、设备频繁操作和电池系统长时间深度充放电。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 发展改革委，能源局. 发展改革委 能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报，2021(25)：43-46.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding opinions of the national development and reform commission and the national energy administration on accelerating the development of new types of energy storage[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(25): 43-46.

[2] 李建林，王上行，袁晓冬，等. 江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J]. 电力系统自动化，2018，42(21)：1-9，103.
LI Jianlin, WANG Shangxing, YUAN Xiaodong, et al. Enlightenment from construction and operation of battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 1-9, 103.

[3] 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.

[4] 张伟明，许德智，颜文旭，等. 基于自适应积分滑模约束控制的电池储能系统能量管理[J]. 电工技术学报，2019，34(6)：1282-1289.
ZHANG Weiming, XU Dezhi, YAN Wenxu, et al. Energy management of battery energy storage system based on adaptive integral sliding mode constrained control[J]. Transactions Of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1282-1289.

[5] 贾 科，林瑶琦，陈奕汝，等. 基于储能实时修正双环控制的微电网能量管理方法[J]. 电力系统自动化，2018，42(14)：131-138.
JIA Ke, LIN Yaoqi, CHEN Yiru, et al. Energy management method for microgrid based on real-time corrected double-loop control of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 131-138.

[6] 李建林，李雅欣，周喜超，等. 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, et al. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 168-178.

[7] 任大伟，侯金鸣，肖晋宇，等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2751-2759.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu,et al. Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2751-2759.

[8] 李建林，李雅欣，吕 超，等. 退役动力电池梯次利用关键技术及现状分析[J]. 电力系统自动化，2020，44(13)：172-183.
LI Jianlin, LI Yaxin, LÜ Chao, et al. Key technology and research status of cascaded utilization in decommissioned power battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 172-183.

[9] 刘建军，邓洁清，郭世雄，等. 基于知识学习的储能电站健康监测与预警[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(4)：64-71.
LIU Jianjun, DENG Jieqing, GUO Shixiong, et al. Health monitoring and early warning of an energy storage plant based on knowledge learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 64-71.

[10] 彭志强，卜强生，袁宇波，等. 电网侧储能电站监控系统体系架构

及关键技术[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(10)：61-70.
PENG Zhiqiang, BU Qiangsheng, YUAN Yubo, et al. Architecture and key technologies of a monitoring and control system for an energy storage power station[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 61-70.

[11] 陈　娟，惠　东，范茂松，等. 基于粗糙集的电池储能电站海量数据处理方法[J]. 中国电力，2022，55(2)：44-50，208.
CHEN Juan, HUI Dong, FAN Maosong, et al. Massive data processing method for battery energy storage power stations based on rough sets[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 44-50, 208.

[12] 李笑彤，宋宝同，吕风波，等. 基于负荷数据聚类的充电站储能容量规划方法[J]. 电网与清洁能源，2021，37(1)：90-96.
LI Xiaotong, SONG Baotong, LÜ Fengbo, et al. An energy storage capacity planning method of charging station based on load data clustering[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 90-96.

[13] 周泉锡. 常见数据预处理技术分析[J]. 通讯世界，2019，26(1)：17-18.
ZHOU Quanxi. Analysis of common data preprocessing techniques[J]. Telecom World, 2019, 26(1): 17-18.

[14] 孔　钦，叶长青，孙　赟. 大数据下数据预处理方法研究[J]. 计算机技术与发展，2018，28(5)：1-4.
KONG Qin, YE Changqing, SUN Yun. Research on data preprocessing methods for big data[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(5): 1-4.

[15] 曹　辉，杨理践，刘俊甫，等. 基于数据融合的小波变换漏磁异常边缘检测[J]. 仪器仪表学报，2019，40(12)：71-79.
CAO Hui, YANG Lijian, LIU Junfu, et al. Magnetic flux leakage anomaly edge detection based on data fusion and wavelet transformation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 71-79.

[16] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 电力系统电化学储能系统通用技术条件：GB/T 36558—2018[S]. 北京：中国标准出版社，2018.
State Administration of Market Supervision and Administration of the people's Republic of China, Standardization Administration. General technical requirements for electrochemical energy storage system in power system: GB/T 36558—2018[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2018.

[17] 国家能源局. 电化学储能电站监控系统技术规范：NB/T 42090—2016[S]. 北京：新华出版社，2017.
National Energy Administration. Technical standard for monitoring and control system of electrochemical energy storage station: NB/T 42090—2016[S]. Beijing, China: Xinhua Publishing House, 2017.

[18] 徐　谦，孙轶恺，刘亮东，等. 储能电站功能及典型应用场景分析[J]. 浙江电力，2019，38(5)：3-10.
XU Qian, SUN Yikai, LIU Liangdong, et al. Review of function and typical application scenario analysis for energy storage station[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(5): 3-10.

[19] 黄碧斌，胡　静，蒋莉萍，等. 中国电网侧储能在典型场景下的应用价值评估[J]. 中国电力，2021，54(7)：158-165.
HUANG Bibin, HU Jing, JIANG Liping, et al. Application value assessment of grid side energy storage under typical scenarios in China[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 158-165.

[20] 杨子龙，宋振浩，潘　静，等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J]. 中国电机工程学报，2019，39(8)：2213-2220.
YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2213-2220.

[21] SHI S S, YU Z, CHEN F, et al. Energy management mode of the photovoltaic power station with energy storage based on the photovoltaic power prediction[C]//Proceedings of the 2019 6th International Conference on Systems and Informatics. Shanghai, China: IEEE, 2019: 319-324.

[22] 张江林，庄慧敏，刘俊勇，等. 基于 CS-PSO 算法的电池储能系统多目标优化运行策略[J]. 工程科学与技术，2018，50(4)：193-200.
ZHANG Jianglin, ZHUANG Huimin, LIU Junyong, et al. Multi-objective optimal operation scheme based on CS-PSO Algorithm of battery energy storage system[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(4): 193-200.

[23] 孙玉树，李　星，唐西胜，等. 应用于微网的多类型储能多级控制策略[J]. 高电压技术，2017，43(1)：181-188.
SUN Yushu, LI Xing, TANG Xisheng, et al. Multi-level control strategy of multi-type energy storages for microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 181-188.

[24] 刘春燕，晁　勤，魏丽丽. 基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平抑波动[J]. 电力自动化设备，2015，35(2)：35-41.
LIU Chunyan, CHAO Qin, WEI Lili. Wind-storage coupling based on actual data and fuzzy control in multiple time scales for real-time rolling smoothing of fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 35-41.

[25] 佘慎思，李　征，蔡　旭. 风储联合发电系统电池荷电状态和功率偏差控制策略[J]. 电力系统自动化，2014，38(20)：9-17.
SHE Shensi, LI Zheng, CAI Xu. SOC and power deviation control strategy for hybrid generation systems of wind power and energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 9-17.

[26] 李晨迪，陈渊睿，曾　君，等. 基于非合作博弈的微电网能量管理系统优化算法[J]. 电网技术，2016，40(2)：387-395.
LI Chendi, CHEN Yuanrui, ZENG Jun, et al. Research on optimization algorithm of microgrid energy management system based on non-cooperative game theory[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 387-395.

[27] 徐瑞龙，田佳强，朱亚运，等. 基于博弈论的共享储能社区微电网能源管理[C]//陈宗海. 第二十届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集(20th CCSSTA 2019). 合肥：中国科学技术大学出版社，2019：493-497.
XU Ruilong, TIAN Jiaqiang, ZHU Yayun, et al. Energy management for a community microgrid with a shared energy storage based on game theory[C]//CHEN Zonghai. Proceedings of the 20th China System Simulation Technology and its Application Annual Conference (20th CCSSTA 2019). Hefei, China: China University of Science and Technology Press, 2019: 493-497.

[28] 林凯骏，吴俊勇，刘　迪，等. 基于双层 Stackelberg 博弈的微能源网能量管理优化[J]. 电网技术，2019，43(3)：973-981.
LIN Kaijun, WU Junyong, LIU Di, et al. Energy management optimization of micro energy grid based on hierarchical stackelberg game theory[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 973-981.

[29] 张青松，赵启臣. 过充循环对锂离子电池老化及安全性影响[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3390-3397.
ZHANG Qingsong, ZHAO Qichen. Effects of overcharge cycling on the aging and safety of lithium ion batteries[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3390-3397.

[30] 李文华，邵方旭，暴二平，等. 六自由度振动老化条件下锂离子电池的衰退机理诊断与 SOH 预测[J]. 仪器仪表学报，2021，41(8)：62-69.
LI Wenhua, SHAO Fangxu, BAO Erping, et al. Diagnosis of degradation mechanism and SOH prediction of lithium-ion batteries under 6-DOF vibration and aging conditions[J]. Chinese Journal of Scientific

Instrument, 2021, 41(8): 62-69.

[31] 孙丙香，任鹏博，陈育哲，等. 锂离子电池在不同区间下的衰退影响因素分析及任意区间的老化趋势预测[J]. 电工技术学报，2021，36(3)：666-674.
SUN Bingxiang, REN Pengbo, CHEN Yuzhe, et al. Analysis of influencing factors of degradation under different interval stress and prediction of aging trend in any interval for lithium-ion battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 666-674.

[32] 毛莺池，曹　海，平　萍，等. 基于最大联合条件互信息的特征选择[J]. 计算机应用，2019，39(3)：734-741.
MAO Yingchi, CAO Hai, PING Ping, et al. Feature selection based on maximum conditional and joint mutual information[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(3): 734-741.

[33] 崔鸿雁，徐　帅，张利锋，等. 机器学习中的特征选择方法研究及展望[J]. 北京邮电大学学报，2018，41(1)：1-12.
CUI Hongyan, XU Shuai, ZHANG Lifeng, et al. The key techniques and future vision of feature selection in machine learning[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(1): 1-12.

[34] 陈　谌，梁雪春. 基于基尼指标和卡方检验的特征选择方法[J]. 计算机工程与设计，2019，40(8)：2342-2345，2360.
CHEN Chen, LIANG Xuechun. Feature selection method based on Gini index and chi-square test[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(8): 2342-2345, 2360.

[35] 姜文煊，段友祥，孙歧峰. 基于交互信息的混合特征选择算法[J]. 应用科学学报，2021，39(4)：545-558.
JIANG Wenxuan, DUAN Youxiang, SUN Qifeng. Hybrid feature selection algorithm based on mutual information[J]. Journal of Applied Sciences, 2021, 39(4): 545-558.

[36] 张海宁. 基于非线性最小二乘法的光伏电池参数辨识[J]. 现代电力，2017，34(6)：79-84.
ZHANG Haining. Parameter identification method for photovoltaic cells based on nonlinear least square method[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(6): 79-84.

[37] 韦振汉，宋树祥，夏海英. 基于随机森林的锂离子电池荷电状态估算[J]. 广西师范大学学报(自然科学版)，2018，36(4)：27-33.
WEI Zhenhan, SONG Shuxiang, XIA Haiying. State-of-charge estimation using random forest for lithium ion battery[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(4): 27-33.

[38] 李晓宇，徐佳宁，胡泽徽，等. 磷酸铁锂电池梯次利用健康特征参数提取方法[J]. 电工技术学报，2018，33(1)：9-16.
LI Xiaoyu, XU Jianing, HU Zehui, et al. The health parameter estimation method for $LiFePO_4$ battery echelon use[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 9-16.

[39] 张　昊. 基于 IC 曲线特征参数的锂离子电池 SOH 估计及 DSP 实现[D]. 北京：北京交通大学，2018.
ZHANG Hao. SOH estimation and DSP implementation of lithium ion battery based on characteristic parameters of IC curve[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2018.

[40] 赵光金，唐国鹏. 主被动均衡技术及其在电池梯次利用中的应用[J]. 电源技术，2018，42(7)：983-986，1075.
ZHAO Guangjin, TANG Guopeng. Active-passive hybrid equalization circuit design technology and its application in echelon use of lithiumion power batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(7): 983-986, 1075.

[41] 李建林，李雅欣，黄碧斌，等. 退役动力电池一致性评估及均衡策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(12)：1-7.
LI Jianlin, LI Yaxin, HUANG Bibin, et al. Research on consistency evaluation and control strategy of a retired power battery[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 1-7.

[42] 苏　浩，张建成，王　宁，等. 基于分层优化的大容量混合储能系统能量管理策略[J]. 高电压技术，2018，44(4)：1177-1186.
SU Hao, ZHANG Jiancheng, WANG Ning, et al. Energy management strategy of large-scale hybrid energy storage system based on layered optimization[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1177-1186.

[43] LI C P, ZHANG S N, LI J H, et al. Coordinated control strategy of multiple energy storage power stations supporting black-start based on dynamic allocation[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101683.

[44] 邱　亚，李　鑫，陈　薇，等. 基于 P-AWPSO 算法的全钒液流电池储能系统功率分配[J]. 高电压技术，2020，46(2)：500-510.
QIU Ya, LI Xin, CHEN Wei, et al. Power distribution of vanadium redox battery energy storage system based on P-AWPSO algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 500-510.

[45] 李相俊，马　锐. 考虑电池组健康状态的储能系统能量管理方法[J]. 电网技术，2020，44(11)：4210-4217.
LI Xiangjun, MA Rui. Energy management method of energy storage system considering the SOH of battery pack[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4210-4217.

[46] 陈　薇，侯杨成，张　里，等. 计及损耗的钒电池储能系统功率优化分配策略[J]. 电工技术学报，2020，35(19)：4038-4047.
CHEN Wei, HOU Yangcheng, ZHANG Li, et al. Power optimization allocation strategy for vanadium battery energy storage system considering loss[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4038-4047.



李建林
1976—，男，博士(后)，教授，博导
主要从事大规模储能技术方面的研究工作
E-mail: dkyljl@163.com

LI Jianlin
Post-doctorate
Professor



王　哲(通信作者)
1997—，男，硕士生
从事电化学储能能量管理技术方面的研究工作
E-mail: 794775011@qq.com

WANG Zhe
Corresponding author

收稿日期　2021-11-16　在线出版日期　2022-02-25　　编辑　程子丰

附录 A

表 A1　特征选择与特征提取常用方法

Table A1　Common methods of feature selection and feature extraction

序号	方法	功能类型	介绍	优劣势
1	互信息	特征选择	变量间相互依赖的程度	操作简单，但未考虑类别间的冗余
2	随机森林	特征选择	一种由决策树构成的集成算法	准确率高，容易实现，但训练需要时间长
3	主成分分析	特征选择	用少数几个综合变量来代替原始多个变量	可消除评价指标间相关影响；但特征值分解中变换矩阵须为方阵
4	卡方检验	特征选择	以卡方分布为基础的假设检验方法	检验用途较广，但计算过程较为复杂
5	灰色关联分析	特征选择	根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密	计算方便，与样本量多少无关，但不适用于信息完全准确的数据集进行比较
6	非线性最小二乘法	特征提取	以非线性组合建立输入与输出的关系	可解决小数据量、关系简单的问题，但难以表达高度复杂的数据。
7	神经网络	特征提取	通过调整内部大量节点之间相互连接关系来处理信息	准确度高，但需要大量数据
8	IC 曲线	特征提取	分析容量增量曲线变化与电池内部变化规律	效率高，结果准确
9	CV 曲线	特征提取	不同放电循环之间容量-电压曲线不同	准确率高，但数据要能够微分