

基于可重构电池网络的数字储能系统建模与运行控制 ——基站储能应用案例研究

慈松*, 周杨林, 王红军, 石清良

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Modeling and Operation Control of Digital Energy Storage System Based on Reconfigurable Battery Network——Base Station Energy Storage Application

CI Song*, ZHOU Yanglin, WANG Hongjun, SHI Qingliang

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: Energy storage systems (ESSs) are changing the real-time balance characteristics of ready-to-use power systems use and have become an important supporting technology for the construction of smart grids. Battery energy storage technology is a systematic project whose research fields include chemistry, dynamic modeling, and system management. Designers need to understand the electrochemical and material properties of batteries to design and implement efficient battery management algorithms based on mathematical models and control systems. Nevertheless, traditional ESSs using fixed welding connections cannot achieve accurate detection and control based on battery cells. The failure of any battery cell will cause a system-level failure, and its safety cannot be guaranteed. With the aid of reconfigurable battery networks, the digital energy storage (DES) technology discretizes and digitizes the continuous energy flow of the battery cells, thereby shielding the differences caused by the physical and chemical properties of the battery cells, as well as flexibly adjusting the battery topology to achieve load matching with multiple application scenarios.

Keywords: digital energy storage system; large-scale energy storage system; second battery utilization; base station powering

摘要: 储能系统可以改变电力系统实时动态平衡特性, 已成为智能电网和能源互联网建设的重要支撑。电池储能技术作为一项复杂系统工程, 其研究领域涉及电化学、材料、信息技术、电力电子及大规模复杂系统建模和优化等。储能系统管理需要基于对电池的 electrochemical 和材料特性的感知, 实

现基于模型的高效均衡和控制。然而, 传统储能系统采用固定串并联连接方式, 无法实现电池单体层面的精准检测和管控, 单点故障将极大影响到系统性能, 储能系统能量效率、可靠性和安全性难以保障。基于可重构电池网络的数字储能技术通过高频高效的电力电子半导体器件将电池单体产生的连续能量流进行离散化和数字化处理, 电池在物理域的映射关系转化为数字域映射, 从而消除电池单体物理和化学属性所造成的差异性, 克服电池系统的“短板效应”, 并可通过电池网络拓扑结构的灵活调整能力实现与多种应用场景需求的匹配。

关键词: 数字储能系统; 大规模电池储能; 电池梯次利用; 通信基站供电

0 引言

快速发展的储能技术正在逐步改变电力系统即发即用的实时平衡特性, 已然成为智能电网建设中大规模集中式/分布式新能源接入与利用的重要支撑技术, 具有广阔的发展和前景^[1]。纵观全球能源技术发展动态和主要能源大国推动能源科技创新的举措, 绿色低碳是能源技术创新的主要方向, 集中在能源互联网、大规模储能、先进能源装备及关键材料等重点领域。“先进储能技术创新”是《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》的重点任务, 而掌握储能技术各环节的关键核心技术是其重要内容之一, 行动计划中明确提出发展目标: 研究面向可再生能源并网、分布式及微电网、电动汽车应用的储能技术, 掌握储能技术各环节的关键核心技术, 引领国际储能技术与产业发展。2017年, 中国国家发

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“面向5G的信息能源融合技术与装备研制”(5206002000DB)。

Science and Technology Foundation of SGCC (5206002000DB).

展改革委、国家能源局等五部门联合印发了《贯彻落实〈关于促进储能技术与产业发展的指导意见〉》，制定了“十三五”和“十四五”期间储能技术的发展要求，明确提出“十三五”期间中国储能技术达到国际先进水平，“十四五”期间实现完整的储能产业体系及推广应用^[2]。2020年，教育部、国家发展改革委、国家能源局联合印发《储能技术专业学科发展行动计划（2020—2024）》，进一步强调了储能技术作为一个专业学科发展的重要性和紧迫性^[3]。

电化学储能系统具有快速功率响应、密集能量存储、灵活方便部署等优势，是目前发展最快、应用最广的储能技术之一，其规模化建设有望在电网调峰调频、波动平抑、紧急功率支援等应用场景中发挥重要作用，并在电动汽车、微电网以及可再生能源并网应用方面有着其他储能方式不可比拟的优势。随着电池储能技术的进步，大量的电池单体以预先设计的固定串/并联拓扑封装为电池模组，由于电池最小控制单元电压和容量级别较低，大容量电池储能系统通常将“数百万”的电池单元进行串/并联，以提高电压、电流等级。传统固定串/并联的电池连接拓扑无法匹配由动态电化学行为、生产工艺和应用工况带来的电池单体的差异性，由此造成的系统“短板效应”问题始终存在。作为可靠性评估的串联环节，固定焊接连接的电池系统中任意电池单元失效将会造成“系统级”故障。采取提高备用冗余的提升系统可靠性的措施，降低了储能系统的经济性和集约性。此外，在固定串/并联连接的储能系统中，电池单元检测和运行控制颗粒度较大，电池系统无法实现对电池单元的精准主动管理和精准隔离，导致电池单元热失控而引起的燃烧和爆炸事故频发^[4]。

基于可重构电池网络的电池能量管控系统被公认为克服这些缺陷最有前景的解决方案^[5-11]，高频电力电子开关阵列组成的可重构电池网络，电池单元之间的连接拓扑可以动态重构以适应电池特性和系统负载的动态变化。每个电池单元连续的能量流被电力电子离散化和数字化，进而通过能量管控算法实时控制系统中每个电池单元参与充电或放电回路中占空比和电流大小，满足不同储能应用场景的需求^[12-13]。在实际工程应用中，综合考虑电池自身复杂电化学特性、电力电子集成的系统特性、外部电气系统（电网侧应用或电动汽车等）对储能系统的能量调控的多样化需求，数字储能系统为解决电池“短板效应”，实现电池储能系统定制化提供创新路径。

本文从数字储能系统关键技术出发，着重阐述数字储能系统电力电子集成的柔性控制架构、基于可重构电池网络的电池状态检测、系统运行优化控制以及系统安全评估方法，以应用案例展示基于数字储能的分布式退役动力电池梯次利用、储能系统电池一致性管理与功率调节等方面的效果。

1 储能行业痛点问题与储能系统数字化

为满足高电压、高容量的电池储能系统规模化应用的需求，电压和容量级别较低的电池单元通常在“数百万”数量级上进行重组，传统电池储能系统先将电池单体串/并联形成电池模组，然后通过多个电池模组DC/DC隔离级后以并联或功率转换系统（power conversion system, PCS）交流侧并/级联等形式提高电压、电流等级^[14]。储能系统PCS部分通常采用单级型或者多级型电力电子拓扑结构连接电池模组^[15]：单级型直接采用DC-AC整流环节接入电网，H桥和模块化多电平是常采用的级联方式；多级型则包含DC-AC整流级和DC-DC隔离级，隔离级可通过移相调节控制实现灵活功率均衡和电气隔离，尤其适合于差异化电池模组的充放电控制。

传统电池储能系统固定焊接的电池模组构成方式，仅依靠上层电力电子拓扑无法精细控制到电池单体。有学者提出用于高电压串联电池存储系统的集成可重构转换器，能够重新配置电池拓扑结构以实现不同的运行模式，并采用共享拓扑设计减少系统冗余，实现系统轻量化，同时可以应用于电池与超级电容组成的混合介质的电池储能系统^[7, 9]。相似地，在电池模组内的电池单元通过开关器件构成的可重构电池电路拓扑，电池单元之间的连接拓扑根据负载变化动态地与需求进行匹配重构配置。

电池储能系统作为一项系统工程需要从电池单体模型、电池荷电状态（state of charge, SOC）、电池健康状态（state of health, SOH）、循环寿命等性能状态感知出发，建立电池应用过程中的系统性操作。基于可重构电池网络的大规模电池储能系统构建了电池管理的系统性理论方法^[4-6, 11, 16-18]，高频电力电子开关阵列与电池单体之间的耦合控制架构将电池单元连续的能量流进行离散化和数字化处理，通过时分和频分的控制构成了数字化、信息化能量管控系统^[1, 12, 19]。通过软件定义的方式灵活调整电池模组内的连接形式，能量管控系统能够实现故障容错和均衡控制等^[20-21]，有

效避免固定串/并联刚性系统架构与电池差异化导致的系统“短板效应”, 其技术路线被称为数字储能系统, 能够满足垂直行业的多样化需求^[13]。

目前, 基于可重构电池网络的数字储能系统已经在电网侧规模化储能系统^[22]、数据中心不间断电源^[23]和通信基站梯次利用动力电池供电^[24-25]等场景中完成应用示范。接下来, 将介绍数字储能系统在架构与可重构电池网络设计、电池状态评估、运行优化等方面的关键技术。

2 数字储能系统关键技术

针对差异化性能的电池单体大规模集成的电池管理系统, 可重构电池网络是电池状态检测和控制策略实施的基础。可重构电池网络解决传统电池储能系统“断不开”、“测不准”的难题, 实现基于电池单体与网络的状态检测、运行优化与控制。

2.1 可重构电池网络

规模化的电池储能系统包含了大量电力电子开关器件(如PCS系统), 可重构电池网络的电池模组设计也包含大量可控开关管。以基于可重构电池网络的规模化电池储能系统为例, 为实现精确控制, 在电池模组内每个最小控制单元需要连接 K 个可控开关, 同时电池模组之间也采用电力电子开关连接, 实现对整体模组的精准管控。大规模电池储能系统通过功率调节系统, 采用模块化级联的电力电子变压器, 耐压等级高、传输功率大(如级联H桥和MMC), 同时采用双有源桥含有直流隔离级, 通过移相调节控制可以灵活地实现功率均衡和电气隔离, 对SOC差异性大的电池模组进行充放电均衡控制。

学术界已经较早地开展可重构电池网络设计与应用研究。Muhammad等从可重构电池系统硬件架构与应用挑战方面做了综述, 为可重构电池网络领域的研究提出一些开放性问题^[11], 比如: 如何设计硬件架构才能兼顾管控效率与控制复杂度, 如何制定系统架构建模与电池控制方法策略实现电池可感知“白盒”化的控制。文献[5]从可重构电池网络模组与系统设计的角度综述了发表文献中可重构模组架构, 给出了常见的电池模组可重构电池结构的对比。文献[6]提供了可重构电池网络优化架构理论研究方法。

文献[13]研究可重构电池网络理论, 完成基于26650锂离子电池单体样机研制, 该系统构成4并4串

的可重构电池模组, 其可重构电池网络的设计如图1所示。电池储能系统构建12 V低压直流数据中心不间断供电系统, 结合图论的优化配置方法生成电池均衡管理与可重构策略^[26]。

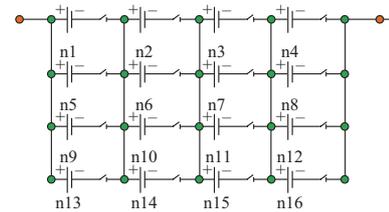


图1 可重构电池网络设计^[13]

Fig 1 Reconfigurable battery network design

2.2 基于可重构电池网络的单体容量建模

数字储能系统构建基于断路电压检测的单体电池和任意电池网络拓扑等效的电池SOC数学模型, 支撑规模化数字储能系统的实时精准管控, 对于任意电池网络拓扑的荷电容量的精准估算是规模化可重构电池网络设计的基础。

目前文献中已经有多种SOC估算方法, 包括应用最广泛的安时积分法、开路电压(open circuit voltage, OCV)与SOC映射法等, 均依赖于电流或电压的测量精度并受到电池非线性特性影响, 其估算方法的精度受到质疑。其中, SOC-OCV映射法是业界公认的最简单、最精确的电池SOC估算方法, 但是传统固定串/并联电池系统无法在电池系统充放电过程中动态实时测量电池单体的OCV, 因此传统固定拓扑连接的电池系统无法直接利用电池单体层面的OCV-SOC的一一对应关系, 只能通过测量工作电压和电流推算电池内阻, 进而通过内阻估算值进一步估算OCV, 然后得到当前的SOC, 过程中将引入两次估算误差传递, 导致最终得到的结果误差过大, 严重影响了实际系统的用户体验和系统能量控制精度。图2为基于重构电池网络SOC估计原理示意图。



图2 基于可重构电池网络SOC估计原理

Fig. 2 SOC estimation method based on reconfigurable battery network

在可重构电池网络构成的数字储能系统中, 电池单体能够自主可控地从电池网络拓扑中断开, 从而实现电池单体层面的开路电压测量。可重构电池网络中电池单体从电池网络断开的时间很短, 能够根据电池暂态响应特性推断长时间静置后恢复的真正OCV, 从而实现基于可重构电池网络的开路电压补偿修正方法, 消除了SOC-OCV映射法的估计误差。

与传统SOC估算方法相比, 基于数字储能系统架构提出的电池状态估计方法能够得到更加准确和可靠结果, 并克服估算过程误差传递和累积。由于估算过程不需要训练和学习, 相比目前流行的基于CNN、RNN等神经网络的SOC估算方法, 该方法的计算复杂度可以根据系统计算能力和应用对估算精度的要求进行定制化的调整, 更加适宜在实际系统中推广应用。同时, 该方法可用于在线精准估算方法和SOH分析, 通过添加学习过程建立马尔可夫或时间序列的电池寿命模型实现电池SOH估算^[27]。

2.3 可重构电池网络系统容量建模

可重构电池网络模组能够实现基于电池单体层面的SOC精准估算, 可以得出任意给定电池网络拓扑的等效荷电容量模型。任意给定的电池网络拓扑等效串/并联原理示意如图3所示。

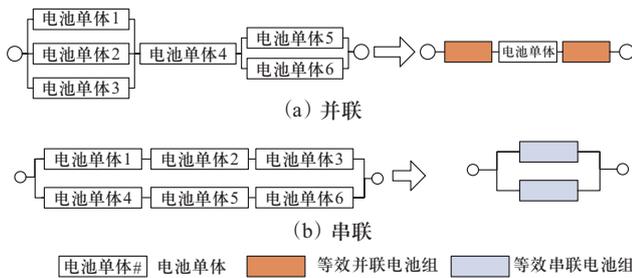


图3 电池网络拓扑的等效串/并联原理模型

Fig. 3 Equivalent series-parallel principle model of battery network topology

串联电池组中, 电池电流相同, 电池网络可以等效为电池单体模型; 并联电池组中, 电池电流分布不均匀但电池的端电压相同。针对图3(a)、图3(b)所示的可重构电池网络, 电池网络的可重构行为可表达为^[28]

$$p = f(g[(I_1, \varphi_1), (I_2, \varphi_2), (I_3, \varphi_3)], s[(I_4, \varphi_4)], g[(I_5, \varphi_5), (I_6, \varphi_6)]) \quad (1)$$

$$p = g(f[(I_1, \varphi_1), (I_2, \varphi_2), (I_3, \varphi_3)], f[(I_4, \varphi_4), (I_5, \varphi_5), (I_6, \varphi_6)]) \quad (2)$$

式中: f 为串联表达式; g 为并联表达式; I 、 φ 分别表达电池单体的电流和电动势。

在串联电池组中, 电池组容量性能由状态最差的电池单体决定, 即为避免电池单体过充或过放引起的安全问题。在并联电池组中, 电池组的容量是所有电池单体容量的总和。可重构电池模组的等效SOC表达式为

$$Q_s = \min\{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\} \quad (3)$$

$$Q_p = \sum_{i=1}^N Q_i, I_i \geq 0 \quad (4)$$

综合考虑电池单体在不同工况及其之间的拓扑连接状态结构与电池性能之间的关系, 能够为可重构电池网络在实践中的工程简化应用提供理论依据。

2.4 数字储能系统的运行优化与控制

电池网络拓扑动态重构是影响系统特性的重要因素, 其性能优化可建立电池网络拓扑动态重构优化问题。设 $x_i \in \mathbf{R}^m$ 表示 m 个电池单体状态变量组成的向量, 具体可表示为电池单体端电压、电流或SOC等, $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in \mathbf{R}^{m \times N}$ 表示 N 种动态拓扑变换下电池状态矩阵, 其具体意义与电池状态变量 x_i 表示的物理意义相关, \mathbf{Y} 为与优化变量相关的性能指标。可重构电池网络优化问题可以建模为

$$\begin{aligned} \max \quad & \mathbf{Y}(\mathbf{X}) \\ \text{s.t.} \quad & H_n(\mathbf{X}) \geq 0, \forall n \in N \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $H_n(\mathbf{X})$ 表示第 n 个电池拓扑所受逻辑约束, 考虑电池状态、负载状况和环境因素, 电池的动态网络重构模型的收到上下界的限制, 限制条件定义为 $H_n \geq 0$ 。考虑电池本体在时间维度上的动态特性, 电池单体的性能损耗可以通过细粒度计算电池SOC变化带来的消耗和恢复特性得到, 可以表示为电池性能指标 \mathbf{Y} 与电池拓扑 \mathbf{X} 之间的哈达玛积^[6]

$$\Gamma = \mathbf{Y} \circ \mathbf{X} \quad (6)$$

在 T 个拓扑变换周期内电池性能损耗可表示为

$$\Gamma = \sum_{t=1}^T (\Gamma_t) \quad (7)$$

由于电池容量在电池操作过程中表现为单调递减特性, 为了对动态可重构电池系统在运行期间的性能进行建模, 有向无环图用来表示单元拓扑的演化过程, 如图4所示。

有向无环图中的每一个点代表可能的电池网络拓扑, 由现在电池拓扑状态选择为下一个电池网络拓扑

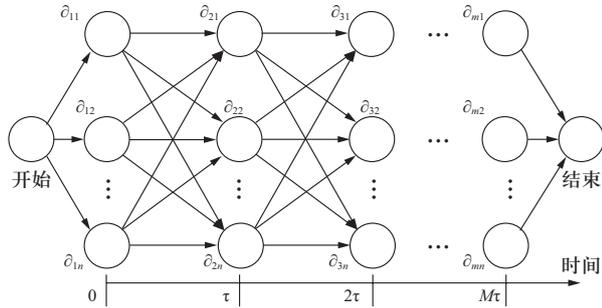


图4 有向图表示的动态可重构电池系统

Fig. 4 Directed acyclic graph of dynamic reconfigurable battery network system

状态所产生的电池性能损耗为边的权重。在 T 个拓扑变换周期内, 储能系统在连续运行过程中电池网络拓扑变换控制策略可执行为寻找有向无环图中最短加权路径。

3 数字储能系统的应用案例

目前通信基站、数据中心等存在大量碎片化、闲置的电池备用资源, 如何在保证电池储能系统备电功能的基础上实现储能资源的最大利用率是储能系统运维中的重要问题。为实现储能系统的高效运行和高水平的智能化运维^[12,19,22,24-25], 数字储能系统采用数字化、信息化、网络化的管控方式, 利用本地和储能云平台的分散自律协同控制。以数字储能系统在通信基站备用电池储能系统中的应用为例, 采用基于“云储能”和能源互联网的运营模式, 对电池储能系统进行能量管理与调度。

3.1 系统应用概述

在落实“智慧广州”、枢纽型国家信息港建设的战略背景下, 广州市白云区、越秀区、天河区等部署超高密度的通信基站基础设施。为探索通信基站储能系统在城市智慧能量管理中的优势作用, 广州市白云区选取100个符合建设条件的通信基站进行备用电池系统的数字化改造, 并选取8个站点作为与电网双向互动的试点示范, 以期待能够改善该地区供电负荷分布不均衡和供电容量的限制, 发掘通信基站电池储能系统未来参与电网调峰、调频、需求侧响应等电力市场辅助服务的潜力。

3.2 系统方案设计

数字储能系统应用示范方案采用动态重构拓扑管

理的能量交换机电池管理方案, 方案中包括电池能量网卡、电池能量集线器、电池能量交换机、电池能量适配器、以及云平台(巡检云平台及调度云平台)及通信信道等, 构建能量流、信息流统一收集、传输、处理及控制的分布式储能管控系统^[25], 整体架构如图5所示。

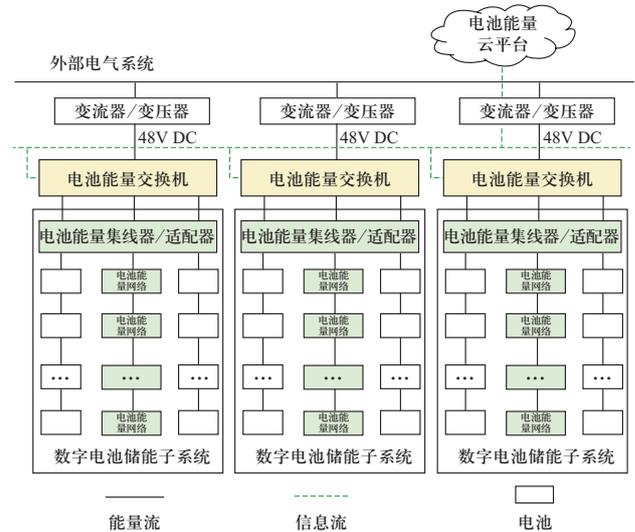


图5 系统整体架构图

Fig. 5 Overview of the system architecture diagram

电池能量网卡集成了MOSFET等电力电子开关, 开关频率范围为10~100 kHz, 电池连续的能量流被离散为能量片段, 电压控制范围为0~3.8 V; 电池能量集线器组合构成可重构电池网络, 同时也是电池状态信息的汇集, 采用CAN和RS-485通信方式, 构建底层的信息物理融合; 电池能量交换机连接了电池能量集线器与电池能量适配器, 控制局域电池系统的能量管理策略生成与执行; 电池能量适配器将电池能量交换机输出的能量进行整流控制, 使之满足电池储能系统输出及与外部负载匹配的能量要求。

在构成与电网互动的数字储能系统中, 以双向互动试点为例, 交流备电系统直流侧工作电压范围为216~292 V (单体2.7~3.65 V), 该电压范围与双向储能变流器的直流侧电压匹配(200~900 V)。直流备电系统直流侧工作电压范围为43.2~58.4 V (单体2.7~3.65 V), 通过AC/DC电源(AC 380 V/DC 48 V)对电池能量交换系统(含电池)进行充电和对基站核心直流负载进行供电, 现场部署如图6所示。

本应用案例选用退役动力电池替代铅酸电池应用于分布式储能系统, 不需要将退役动力电池模组拆解至电池单体, 而是采用可重构电池模组构成的电池网络消除电池的差异性。传统梯次利用电池储能系统设



图6 通信基站数字无损梯次利用储能系统应用部署
Fig 6 Deployment of DES in communications base station

计方案先将电池单体串/并联形成电池模组，然后通过多个电池模组DC/DC隔离级后以并联或PCS交流侧并/级联等形式提高电压、电流等级，多级能量变换过程损失了系统能量效率。相比之下，数字储能系统省掉多级DC/DC隔离级或PCS交流侧并/级联，能量效率损

耗仅来自于MOSFET电力电子开关，由于其电压等级较低，在降低系统能量损耗方面存在优势。

3.3 功能和性能验证

在保持电池一致性的前提下，完成电池放电并保持功率稳定是储能系统设计的性能要求。为验证数字储能系统性能，特进行数字储能系统放电过程均衡测试、多站点功率联动测试和有功/无功调节测试。

3.3.1 储能系统电池均衡性能测试

选取长岗村C基站储能系统进行测试，数字储能系统采用3.2 V/100 Ah的退役磷酸铁锂电池，构成4并80串数字储能系统，系统容量为102.4 kWh。在室温条件下，设定数字储能系统的放电倍率为0.3 C，平均测量时隙约为0.5 min，验证数字储能系统SOC在[70%, 100%]运行范围内电池模组SOC、端电压的均衡特性。

运行状态下，数字储能系统电池SOC、端电压的变化曲线及对应的统计标准差如图7所示。结果显示，

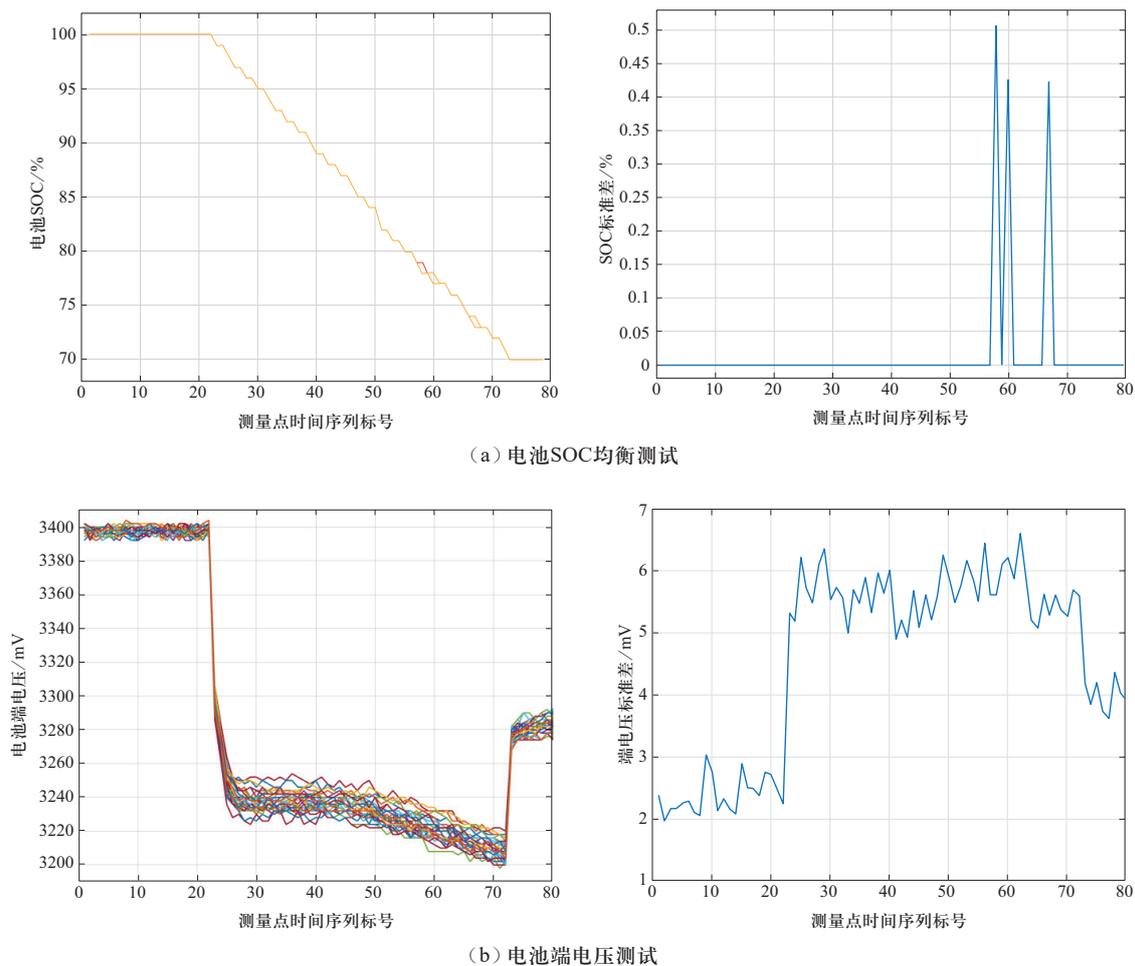


图7 电池SOC和端电压一致性测试

Fig. 7 Battery SOC and terminal voltage consistency test

在0.3 C倍率放电条件下, 电池SOC最大差异为1%, 最大统计标准差为0.508%; 电池端电压最大差异为28 mV, 最大统计标准差为6.631 mV。

3.3.2 储能系统协调功率测试

通信基站数字储能系统能够在电网削峰填谷能量调度中发挥作用, 单个通信基站的数字储能系统站点装配双向电池能量交换系统, 通过云平台远程控制电池能量交换系统某个时段充电、放电行为, 使之能够满足通信基站参与电网需求侧响应的功能要求。

为验证特定台区变压器内多个通信基站数字储能系统功率联动输出的稳定性, 设定长岗村台区变压器下4个通信基站中的数字无损梯次利用储能系统以24 kW功率放电50 min, 联合输出功率曲线如图8所示。结果表明数字储能系统能够维持输出功率的稳定性。



图8 系统输出功率测试

Fig. 8 System output power test

3.3.3 储能系统有功/无功测试

储能系统参与电力市场辅助服务, 要求具备功率调节和维持电网稳定的功能。对安装在长岗村通信基站中数字储能系统进行功率测试, 分析系统总进线功率与子系统进线总线数据。储能变流器额定功率100 kW, 额定电压380 V AC, 功率因数为1。该装置支持并/离网模式, 在市电断电时, 双向储能变流器的并/离网切换装置能够在20 ms内无缝切换至离网模式。系统总进线三相基波功率如图9所示, 单相基波功率如图10所示, 系统总进线基波功率较子系统功率稳定, 表明数字储能系统在维持系统总线输出功率稳定中发挥作用。

4 结论与展望

储能技术正在经历重大变革, 基于可重构电池网络的数字储能技术成为一项系统性工程, 其技术核心是采用高频电力电子开关实现模拟能量流的离散化、

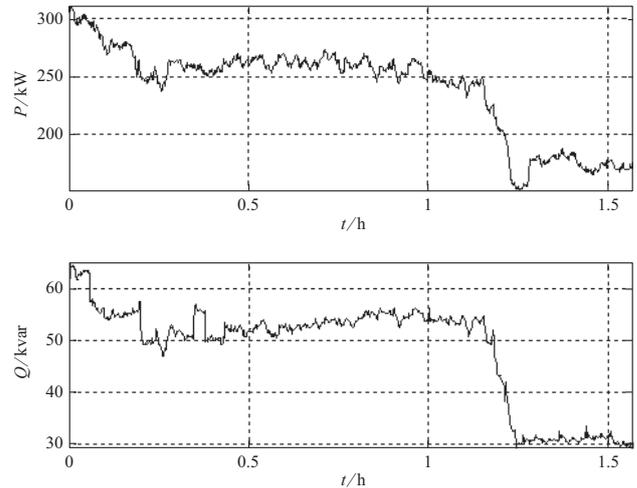


图9 总线基波功率

Fig. 9 Fundamental wave power trend of bus base line

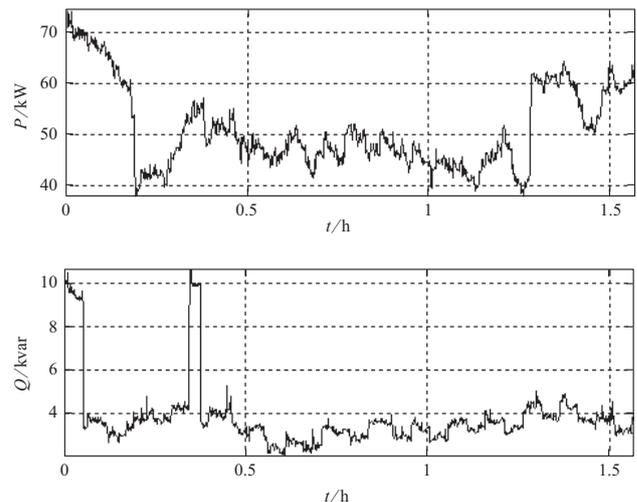


图10 单相基波功率趋势

Fig. 10 Fundamental wave power trend of one phase

数字化处理, 实现电池电化学模型、电池状态建模以及系统集成应用。

作为一种新业态, 数字储能技术将横向贯穿电池储能系统应用的全行业, 将在通信基站、数据中心、用户侧储能、大规模电网侧储能中形成较广泛的应用。随着半导体功率器件高压化、大容量化的发展, 用于构建电力电子开关器件的半导体价格呈现下降趋势, 数字储能系统建设成本将大幅降低。考虑基于数字储能系统架构的系统集成、运行优化等, 数字储能系统满足场景要求的安全性、可靠性与经济性。对于行业关注的储能系统成本、能量效率等问题, 后续将会开展更多实验及示范项目, 完成数字储能系统经济性、能量效率等定量分析, 验证数字储能性能。在当今储能行业蓬勃发展的背景下, 数字储能系统将

突破系统经济性束缚, 有望革新当今储能行业, 实现广泛的商业应用。

参考文献

- [1] 慈松, 李宏佳, 陈鑫, 等. 能源互联网重要基础支撑: 分布式储能技术的探索与实践[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 762-773.
CI Song, LI Hongjia, CHEN Xin, et al. The cornerstone of energy Internet: research and practice of distributed energy storage technology[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2014, 44(6): 762-773(in Chinese).
- [2] 中华人民共和国发展和改革委员会. 关于印发《贯彻落实〈关于促进储能技术与产业发展的指导意见〉2019-2020年行动计划》的通知 [EB/OL]. (2019-07-01) [2021-03-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201907/t20190701_962470.html.
- [3] 中华人民共和国教育部. 教育部 国家发展改革委 国家能源局关于印发《储能技术专业学科发展行动计划(2020—2024年)》的通知 [EB/OL]. (2020-02-11) [2021-03-20]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202002/t20200210_419693.html.
- [4] HE L, KONG L H, LIN S Y, et al. Reconfiguration-assisted charging in large-scale lithiumion battery systems[C]//2014 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs). April 14-17, 2014, Berlin, Germany. IEEE, 2014: 60-71.
- [5] CI S, LIN N, WU D L. Reconfigurable battery techniques and systems: a survey[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1175-1189.
- [6] LIN N, CI S, WU D L, et al. An optimization framework for dynamically reconfigurable battery systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 1669-1676.
- [7] MOMAYYEZAN M, ABEYWARDANA D B W, HREDZAK B, et al. Integrated reconfigurable configuration for battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(4): 1583-1590.
- [8] MOMAYYEZAN M, HREDZAK B, AGELIDIS V G. A load-sharing strategy for the state of charge balancing between the battery modules of integrated reconfigurable converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 4056-4063.
- [9] MOMAYYEZAN M, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Integrated reconfigurable converter topology for high-voltage battery systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 1968-1979.
- [10] MORSTYN T, MOMAYYEZAN M, HREDZAK B, et al. Distributed control for state-of-charge balancing between the modules of a reconfigurable battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7986-7995.
- [11] MUHAMMAD S, RAFIQUE M U, LI S, et al. Reconfigurable battery systems: a survey on hardware architecture and research challenges [J]. ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems, 2019, 24(2): 1-27.
- [12] 慈松. 数字储能系统[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(3): 338-347.
CI Song. Digital energy storage system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 338-347(in Chinese).
- [13] ZHOU Y L, CHENG L, YANG Y. Exploring reconfiguration-assisted optimization framework to digital power supply system[C]//2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). December 9-13, 2019, Waikoloa, HI, USA. IEEE, 2019: 1-6.
- [14] 凌志斌, 黄中, 田凯. 大容量电池储能系统技术现状与发展[J]. 供用电, 2018, 35(9): 3-8.
LING Zhibin, HUANG Zhong, TIAN Kai. The state of art and trend of large scale battery energy storage system technology[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(9): 3-8(in Chinese).
- [15] 孙玉巍, 付超, 李永刚, 等. 用于电池储能系统的级联式电力电子变压器均衡及协调控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 123-130.
SUN Yuwei, FU Chao, LI Yonggang, et al. Balancing and coordinated control of cascaded power electronic transformers for battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 123-130(in Chinese).
- [16] CI S, ZHANG J C, SHARIF H, et al. Dynamic reconfigurable multi-cell battery: a novel approach to improve battery performance[C]//2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). February 5-9, 2012, Orlando, FL, USA. IEEE, 2012: 439-442.
- [17] LIN N, CI S, WU D L. A novel low-cost online state of charge estimation method for reconfigurable battery pack[C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). March 20-24, 2016, Long Beach, CA, USA. IEEE, 2016: 3189-3192.
- [18] RAHN C D, WANG C Y. Battery systems engineering[M]. USA: Wiley 2013.
- [19] 慈松. 能量信息化和互联网化管控技术及其在分布式电池储能系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3643-3648.
CI Song. Energy informatization and Internet-based management and its applications in distributed energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3643-3648(in Chinese).
- [20] 慈松, 周杨林, 林倪. 软件定义可重构电池系统及其应用[J]. 中国材料进展, 2017, 36(10): 694-699.
CI Song, ZHOU Yanglin, LIN Ni. Software-defined reconfigurable battery system and its applications[J]. Materials China, 2017, 36(10): 694-699(in Chinese).
- [21] BADAM A, CHANDRA R, DUTRA J, et al. Software defined batteries[C]//Proceedings of the 25th Symposium on Operating Systems Principles. Monterey California. New York, NY,

- USA: ACM, 2015: 215-229.
- [22] 许苑, 李涛, 周杨林, 等. 退役电池储能系统中可重构电池网络技术应用[J]. 电源技术, 2020, 44(6): 908-910.
XU Yuan, LI Tao, ZHOU Yanglin, et al. Application of reconfigurable battery network in retired battery energy storage system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(6): 908-910(in Chinese).
- [23] 慈松, 刘宝昌, 马雁序, 等. 基于能量信息化技术的IDC 12V分布式低压直流供电方案[C]//2017年中国通信能源会议论文集. 北京, 2017: 41-44.
- [24] 岑海凤, 许苑, 王军伟, 等. 通信基站备用电池的云储能系统设计与应用[J]. 电源技术, 2020, 44(6): 902-904.
CEN Haifeng, XU Yuan, WANG Junwei, et al. Design and application of cloud energy storage system for backup battery in communication base station[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(6): 902-904(in Chinese).
- [25] CI S, ZHOU Y L, XU Y, et al. Building a cloud-based energy storage system through digital transformation of distributed backup battery in mobile base stations[J]. China Communications, 2020, 17(4): 42-50.
- [26] HE L, GU L P, KONG L H, et al. Exploring adaptive reconfiguration to optimize energy efficiency in large-scale battery systems[C]//2013 IEEE 34th Real-Time Systems Symposium. December 3-6, 2013, Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2013: 118-127.
- [27] SHEN S Q, CI S, ZHANG K, et al. Lifecycle prediction of second use electric vehicle batteries based on ARIMA model[C]//2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). December 9-13, 2019, Waikoloa, HI, USA. IEEE, 2019: 1-6.
- [28] ZHANG J C, CI S, SHARIF H, et al. Modeling discharge behavior of multicell battery[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1133-1141.

收稿日期: 2020-11-18; 修回日期: 2021-05-06。

作者简介:



慈松

慈松 (1970), 男, 教授, 主要研究方向大规模复杂系统建模、控制与优化理论研究及其在信息能源交叉研究领域中的应用。通信作者, E-mail: sci@tsinghua.edu.cn。

周杨林 (1991), 男, 助理研究员, 主要研究方向分布式能量管控技术与绿色通信, E-mail: zhouylstu@

tsinghua.edu.cn。

王红军 (1982), 男, 高级工程师, 研究方向为信息通信系统、分布式能量管控及嵌入式软件开发, E-mail: wanghongjun@tsinghua.edu.cn。

石清良 (1983), 男, 工程师, 主要研究方向为分布式数据存储、大数据, E-mail: sqlzy@mail.tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)