

## 能源互联网直流电源远程核容自适应补偿机制研究

贾平<sup>1</sup>, 高军锋<sup>2</sup>, 华伟韬<sup>1</sup>, 陈文<sup>3</sup>, 时维俊<sup>3</sup>, 徐惠臣<sup>1</sup>, 刘剑汛<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司信息通信分公司, 江苏 南京 210024; 2. 南京灵达电气有限责任公司, 江苏 南京 211112;  
3. 国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司, 江苏 泰州 225306)

**摘要:** 直流电源是能源互联网通信保障的基础设施, 针对其核对性放电时存在的工作量大、复杂度高、危险性高以及直接将电能消耗导致电能浪费等问题, 研究了基于物联网架构利用可控硅链降压模块实现远程充放电控制, 引入放电电流补偿控制单元, 实现了对真实负载的在线恒流放电, 通过分析直流电源远程测控业务需求, 提出了面向充放电实时控制的通信组网方案; 面向不同应用场景, 提出了3种蓄电池自动在线全容量核容方法, 通过搭建系统与控制模块的仿真模型, 验证了核容方法的有效性, 且核容过程中系统能量被全部利用, 实现了能源的清洁高效利用。

**关键词:** 能源互联网; 直流电源; 远程核容; 电流自适应补偿; 恒流放电

中图分类号: TN915.08

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00476

## Research on adaptive compensation mechanism for DC power remote capacity checking of Internet of energy

JIA Ping<sup>1</sup>, GAO Junfeng<sup>2</sup>, HUA Weitao<sup>1</sup>, CHEN Wen<sup>3</sup>, SHI Weijun<sup>3</sup>, XU Huichen<sup>1</sup>, LIU Jianxun<sup>2</sup>

1. Information & Telecommunication Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China

2. Nanjing Lingda Electric Co., Ltd., Nanjing 211112, China

3. Taizhou Power Supply Company Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou 225306, China

**Abstract:** Direct current (DC) power supply is the infrastructure of the guarantee of Internet of energy communication. It has many problems, such as heavy workload, high complexity, high risk and waste of electric energy when checking discharge. The remote charge and discharge control based on the architecture of Internet of things by using thyristor chain step-down module was studied. The discharge current compensation control unit was introduced to realize the on-line constant current discharge of the real load. By analyzing the remote measurement and control business requirements of DC power supply, a communication networking scheme for real-time control of charge and discharge was proposed. Aiming at different application scenarios, three automatic online full-capacity capacity checking methods for batteries were proposed. By building a simulation model of the system and control module, the effectiveness of the capacity checking method was verified, and the system energy was fully utilized in the process of capacity checking, which realized the clean and efficient utilization of energy.

**Key words:** Internet of energy, DC power, remote capacity checking, current adaptive compensation, constant current discharge

### 0 引言

能源物联网作为现代能源系统与物联网技术深

度融合的基础设施, 综合运用先进的电力电子技术、信息技术和智能管理技术, 将大量由分布式能量采集装置、分布式能量储存装置和各种类型负载

收稿日期: 2024-11-19; 修回日期: 2025-02-24

通信作者: 高军锋, buxd78@163.com

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目 (No. J2024113)

**Foundation Item:** The Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No. J2024113)

构成的新型电力网络、石油网络、天然气网络等能源节点互联起来, 以实现能量双向流动的能量对等交换与共享网络。直流 (DC, direct current) 电源系统是电力系统中发电厂、变电站和换流站提供直流电能的系统, 由蓄电池组、充电设备、直流配电柜、配电网等直流设备组成, 为站内控制负荷 (电气和热工的控制、信号、测量和继电保护、自动装置等)、动力负荷 (各类直流电机、交流不间断电源、通信电源、应急照明等) 等提供操作电源, 同时为交流系统故障停电时提供备用电源。直流电源系统是能源互联网的重要基础设施, 随着新型电力系统的建设, 海量分布式资源, 如光伏电站、风电场站、新型储能、电动汽车等, 部署了大量直流电源, 并以新型负荷形式参与电网调控, 这就要求直流电源系统具备数智化物联能力与能源网络进行深度融合, 推进能源的清洁高效利用。

针对能源行业直流电源在线状态监测及蓄电池远程在线核容等相关技术问题, 已有学者进行了研究。文献[1-8]提出了能源互联网、物联网、通信网融合发展的概念和需求。文献[9]针对变电站直流电源系统中传统蓄电池核容维护放电需要离线而影响设备安全运行的问题, 提出了并联型直流供电系统自动在线核容控制策略, 以及蓄电池自动在线全容量核容方法, 能够保证直流电源系统中的蓄电池不脱离母线, 解决了传统核容方案必须离线核容等问题。文献[10]针对电力通信直流系统中以串联方式接入的 DC 48 V 配套蓄电池组远程维护难度大、单节劣化影响整组性能等突出问题, 提出了利用并联直流电源技术, 将单体蓄电池以并联形式 12 V 接入, 借助电压转换模块进行在线核容、单体个性化调节等维护工作, 为提升电力通信电源系统的可靠性提供了新的解决方案, 并带来了显著的经济环境效益。文献[11]研究分析了 110 kV 智能变电站的直流负荷情况、磷酸铁锂电池的充放电特性, 提出了将环保无污染的磷酸铁锂电池应用于 110 kV 智能变电站的设计方案。文献[12]提出了一种基于间歇充电运行方式的锂离子电池直流电源系统及远程运维方案, 通过采用间歇充电方式, 实现了充放电循环使用的锂离子电池长期满容量备电, 以及蓄电池核容维护的全过程、全状态自动运行, 并在运行失常后将锂离子电池维持在低风险稳定状态。文献[13]针对现有蓄电池运维存在的问题, 提出了蓄电池状

态监测与在线核容活化的新方法, 设计了电池测控装置, 能够在各种充放电状态下, 监测蓄电池的状态参数, 并对其进行状态分析, 判断劣化电池, 并发出预警信号。文献[14]提出了变电站直流电源容量状态在线监测系统, 能够解决传统变电站直流电源容量状态在线监测中存在的缺陷, 但未核验测定结果的精密度与准确度。文献[15]研究了采用有源逆变模块作为变电站用蓄电池放电单元, 蓄电池电能回馈至电网效率达 85% 以上, 最大单次电流谐波小于 5%, 实现节能环保, 但未给出具体实施方案。文献[16]提出了面向电网应用的直流在线监测系统省级、地市级、电站三级建设方案及系统组成, 提出了一种基于状态空间预测理论的卡尔曼滤波器蓄电池剩余容量预测及在线测试方法。文献[17]研究了变电站蓄电池远程充放电装置的应用, 从无缝连接、充放电状态两个方面分析远程充放电装置的功能, 对延长蓄电池使用寿命与提高安全性具有重要作用。文献[18]引入远程充放电装置, 在整流模块与放电仪放电中获取远程充放电数据, 实时监测蓄电池电压、电流、温度等参数, 满足变电站蓄电池的管理需求。文献[19]设计了一种基于 DC/DC 变压装置的蓄电池远程在线核容装置, 通过远程控制单元把蓄电池电压升高至略大于整流器电压, 由蓄电池给负载供电, 实现远程放电, 并可代替传统的人工现场核容作业。文献[20]设计了以主控制器为核心, 调压装置、母联保护装置为主要组成部分的在线核容放电系统, 并给出了远程控制的详细策略。文献[21]提出了一种基于蓄电池在线监测系统和便携式放电负载的规约转换装置, 可实现远程放电作业和数据自动记录。文献[22-24]在原有直流系统中引入有源逆变模块和双向 DC/DC 模块, 以实现蓄电池在线自动核容维护策略, 大幅度地减少了人力成本, 且充电机和双向 DC/DC 都处在实时热备状态, 为核容蓄电池组提供在线后备电源, 保障了蓄电池组在核容过程中直流母线供电的可靠性。

文献分析表明, 目前用户侧分布式储能和直流电源中储能设置都存在参与能源互联网中能量交互广度和深度不够的问题, 主要受限于接入电网时通信网络的可靠性和远程控制安全性, 另外有些直流系统虽然能够借助电压转换模块进行在线核容、单体个性化调节, 但工程造价高, 且电力行业现有的蓄电池仍以 220 V 或 48 V 铅酸蓄电池为主, 充放电

交互频次受限。在控制方面,已有文献提出了通过蓄电池电压升高或充电模块降压模式来实现远程充放电控制,但需要额外增加控制电路,电压控制方式不够灵活,且均不能实现对真实负载的恒流放电。本文针对上述缺陷提出了采用物联网架构实现终端数据采集与传输,利用可控硅链实现放电电压控制,并通过补偿单元实现蓄电池对真实负载的 $I_{10}$ (10倍率放电电流)恒流放电,从而支撑储能设施与电网的能量双向交互。

## 1 主要问题及方案原理

### 1.1 存在的主要问题

目前能源生产和消费之间充分互动是能源互联网的关键,而构建能源物联网是实现能源互联的技术保障,其主要问题表现在两个方面:一是用户用电设备在接入时设备兼容性问题,不同厂商生产的设备标准和接口不统一,导致设备之间难以互操作和协同工作;二是数据采集和传输问题,数据采集的可靠性和数据传输的实时性是能源物联网发展的关键问题。

直流电源系统同样面临上述两个问题,在实际运行时,系统配置了蓄电池组。为检验蓄电池容量,要求以规定的放电电流定期恒流放电,通过计算放电电流和放电时间得出蓄电池组的实际容量,称为核对性放电,又称为核容。根据核对性放电要求,蓄电池组实际容量应不低于80%的标称容量,需要定期对蓄电池进行核容维护放电工作。蓄电池核容方式有多种,按照核容时是否脱离母线分为离线核容和在线核容。

离线核容即待测蓄电池组必须脱离母线后测量,面临需要准备足够备用电池组、蓄电池组,并需要在核容前后反复接线等问题,且在这种方式下,运维人员需要到现场操作并记录放电数据,远程运维人员无法看到蓄电池放电状态,蓄电池核容现场操作如图1所示。检查每个蓄电池电压等参数,能够及时发现单体蓄电池存在的问题,但工作量极大,而且危险系数高,容易造成人身事故。

在线核容即待测蓄电池放电时不脱离母线,通过改变蓄电池与母线之间的电压关系,使电流从蓄电池流向母线或者负载,具有操作灵活、运维方便等优势,但也存在以下问题。

1) 现有系统采用传统的工控系统架构,数智化

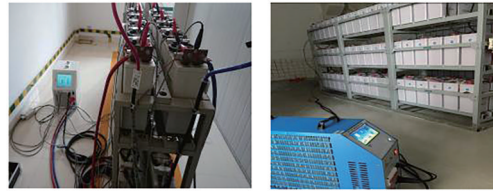


图1 蓄电池核容现场操作

程度低,竖井式部署导致系统开放性差。主要表现为:数据采集方面,终端品牌繁多、接口异构、协议差异大、数据格式不统一;终端控制方面,主要采用关停等刚性控制,缺乏柔性调节手段及边缘计算能力;数据传输方面,部署环境复杂导致通信可靠性差;数据处理方面,尚未建立统一物管平台,数据共享和业务融合难以实现。

2) 在线自动核对放电安全性差。目前有些变电站试点采用远程或自动核对性充放电,需要接入放电阻,更改直流二次回路,存在直流充放电回路重构、放电阻柜内发热等可靠性、安全性风险,推广应用困难<sup>[13]</sup>。

3) 现有核对性放电系统能耗大。采用电阻消耗电能不仅耗时,而且浪费了电池储存的全部能量,无法二次利用导致能源无法高效利用。

### 1.2 解决方案基本原理

针对第1.1节提出的问题,本文提出了基于物联网框架的直流电源远程核容解决方案,直流系统工作原理示意图如图2所示,在直流充电屏和直流母线之间串一个降压硅链,降压硅链由多个串联的硅二极管组成,通过改变硅二极管的导通数量来改变直流电源的输出电压(即母线电压),从而实现对蓄电池充电和放电状态的控制。

直流电源系统正常工作状态下,蓄电池一直处于浮充状态,如图2所示,电操开关S连接1,降压硅链不进行降压工作,电源屏对直流母线正常输出。逆变部分中,常闭接触器 $KC_{11}$ 闭合,常开接触器 $KO_{11}$ 和 $KO_{12}$ 断开,由直流母线给蓄电池浮充电以及给负载供电,系统电源取自蓄电池组,保证系统工作不受市电故障影响。

蓄电池核容放电状态下,当平台发送放电命令后,电操开关S连接2,降压硅链进入工作,使充电屏的输出电压低于直流母线电压,此时蓄电池通过负载进行放电。逆变部分,常闭接触器 $KC_{11}$ 断开,常开接触器 $KO_{11}$ 和 $KO_{12}$ 闭合,蓄电池的直流电经过逆变器转换为交流电,并入电网供交流负载

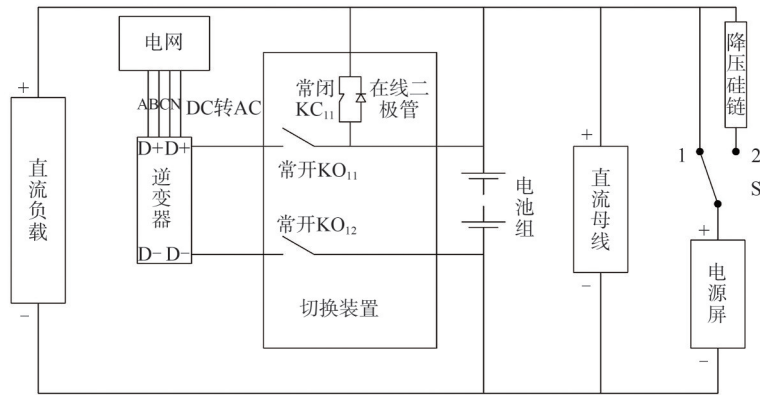


图2 直流系统工作原理示意图

消耗。逆变器通过自适应电流补偿技术，使蓄电池放电电流稳定在 $I_{10}$ 持续对外放电。放电过程中，组端电压持续下降，降压硅链根据蓄电池电压的变化，持续调节母线电压，满足蓄电池对外放电的需求。

核容放电后蓄电池充电状态下，当放电停止条件达到时，电操开关S恢复连接1，降压硅链退出工作，逆变部分常闭接触器 $KC_{11}$ 闭合，常开接触器 $KO_{11}$ 和 $KO_{12}$ 断开，逆变器退出工作，系统由充电机给蓄电池充电，到蓄电池充电饱和，充电机停止充电。

## 2 系统组网架构

### 2.1 系统技术架构

针对传统电池管理系统（BMS, battery management system）中工控系统终端感知深度及广度不

足、感知层资源统一困难、网络传输安全性差、数据处理及共享实时性弱等问题，以数据流为纽带，将系统升级为“云-管-边-端”4层协同的物联网体系架构。在终端层增加部署了基于磁阻电流的霍尔传感器和可控硅链，实现对蓄电池单元的细粒度广域测量和电压的深度柔性调节；边缘层的主控单元运行卡尔曼滤波器等轻量级智能算法，充放电电流能够自适应补偿，使蓄电池能量与电网双向流动<sup>[25]</sup>，在边缘侧支撑能源互联；网络层根据网络安全防护要求和数据传输需求，灵活选择通信方式并动态调度网络资源，确定数据确定性传输，具备低时延、大带宽、广覆盖等通信能力；平台层统一各类物联终端数据模型，为大数据分析和业务层业务拓展提供数据支撑。基于物联网框架的直流电源远程核容系统云边协同技术架构如图3所示。

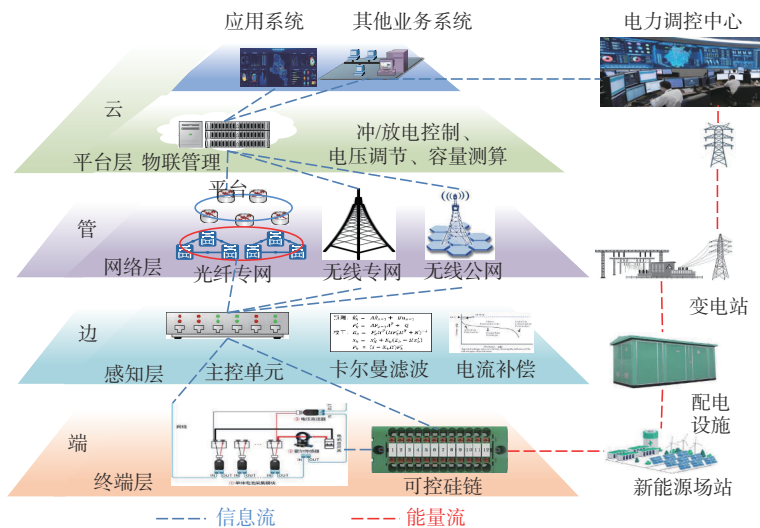


图3 基于物联网框架的直流电源远程核容系统云边协同技术架构

## 2.2 数据传输需求

与传统工控架构下离线核容系统相比，由于采用物联网在线核容系统涉及远程实时控制，且直流电源系统不仅广泛应用在电力系统内部场站，如火力发电厂、变电站、配电房、通信机房等，随着能源互联网下的新型电力系统建设，用户侧的分布式储能、集中式光伏场站、风电场等也部署了大量直流电源设施，根据《电力监控安全防控规定》（国家发改委2024年第27号令）提出的横向隔离、纵向加密的网络安全防护要求，电网侧和用户侧的物联终端（采集单元、监测模块、可控硅链、交直流开关等）应分别通过信息管理大区 and 互联网大区接入物联管理平台，实现对能源系统直流电源的统一管理和控制。

直流电源在远程核容时，主要涉及的业务分为两类。一是实时控制类业务，主要包括充放电合闸及跳闸、逆变器控制、电压控制等；二是非实时控制业务，包括采集监测类窄带业务和文件传输等宽带业务。直流电源远程核容业务通信需求见表1。

## 2.3 远程协同通信设计方案

物联网是实现能源互联网的关键技术，能够将能源系统各要素通过网络连接起来，并对各类终端提供实时控制，这要求通信网络具备跨域组网能力，且具备一定的可靠性和安全性。因此，在直流电源系统中，面向直流系统终端数据采集和充放电控制，单一的通信模式无法满足承载业务的需求，一般采用由“广域通信+局域通信”的复合通信模式承载。本文对广域通信的光纤专网、无线专网、

工业以太网和局域通信的RS-485、电力线通信(PLC, power line communication)、Wi-Fi等通信方式，在传输距离、传输带宽、误码率、覆盖率等方面进行了测试，不同通信方式下的通信能力见表2，结合通信业务需求对比分析，可以看出，对于电网侧终端接入，由于光纤覆盖率较高，且对远程充放电控制可靠性高，建议采用“光纤专网+PLC”的通信方式；对于用户侧终端接入，因网络建设成本较高，建议采用“无线公网+RS485”的通信方式，对于比较复杂的环境也可采用Wi-Fi无线通信。

## 3 基于云边协同通信的核容方案设计

通过对直流系统蓄电池核对性放电的基本原理分析，实现蓄电池的远程在线核容，需要解决两项关键技术。一是电压控制，即根据直流母线电压变化，实时调整可控硅链的输出电压，使蓄电池端电压低于直流母线电压，实现对真实负载的远程放电；二是电流控制，即当真实负载电流小于蓄电池核容电流 $I_0$ 时，利用补偿控制单元，自动调整补偿电流的大小，实现以 $I_0$ 恒流放电<sup>[26-31]</sup>。整合以上两项关键技术，本文提出了3种蓄电池远程核容放电设计方案。

### 3.1 核容系统设计方案

#### 方案一 调充电机输出电压方式技术方案

调整充电模块输出电压核容技术方案如图4所示，远程在线核容流程如下： $K_1$ 保持闭合，核容装置控制调节充电整流器输出电压降低，此时 $U_a < U_b$ ，

表1 直流电源远程核容业务通信需求

业务类型	业务功能	业务类型	交互周期	通信时延	通信带宽	安全需求
远程控制	远程充放电合闸	生产控制类	按需交互(3次/天)	≤500 ms	4.8 KHz	物理隔离
	远程充放电跳闸	生产控制类	按需交互(3次/天)	≤500 ms	4.8 KHz	物理隔离
	DC/AC控制	生产控制类	按需交互(1次/季度)	≤100 ms	5.2 KHz	物理隔离
	可控硅调节	生产控制类	按需交互(1次/季度)	≤100 ms	5.2 KHz	物理隔离
远程召测	运行数据	实时监测类	按需交互	≤500 ms	42.0 KHz	数据加密
	历史数据	实时监测类	按需交互	≤500 ms	42.0 KHz	数据加密
	告警信息	实时监测类	按需交互	≤500 ms	8.0 KHz	数据加密
数据采集	电压、电流、功率等	采集类	1次/分钟	≤1 s	30.0 KHz	数据加密
参数配置	参数查询	管理类	按需交互	≤1 s	30.0 KHz	数据加密
	下发参数	管理类	按需交互	≤1 s	30.0 KHz	数据加密
	统计参数	管理类	按需交互	≤1 s	58.0 KHz	数据加密
事件上报	控制跳闸、开关量变位等	实时监测类	按需交互	≤100 ms	30.0 KHz	数据加密
远程升级	文件传输	管理类	按需交互	≤1 s	2.4 MHz	数据加密
	操作日志	管理类	按需交互	≤1 s	97.2 KHz	数据加密

表2 不同通信方式下的通信能力

指标	光纤专网	4G/5G	以太网	RS-485	PLC	Wi-Fi
传输距离/km	20.0	0.4	40.0	1.5	0.1	0.3
传输带宽/GHz	1.25	1.00	100.00	0.10	0.50	0.20
接入终端	多	中	多	中	少	中
误码率	$1.0 \times 10^{-10}$	$5.3 \times 10^0$	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-4}$
丢包率	$2.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$4.4 \times 10^{-1}$	$1.0 \times 10^0$
故障时间/ms	1 000	200	500	1 500	8 000	2 000
网络隔离	强	中	强	强	中	中
网络安全	高	中	高	低	中	中
建设成本/万元	33 000.0	36.0	21 000.0	20.4	50.0	6 400.0
系统崩溃可能性	低	中	低	低	中	低
覆盖率	96%	92%	68%	80%	98%	80%
地理情况	低	中	低	中	中	中

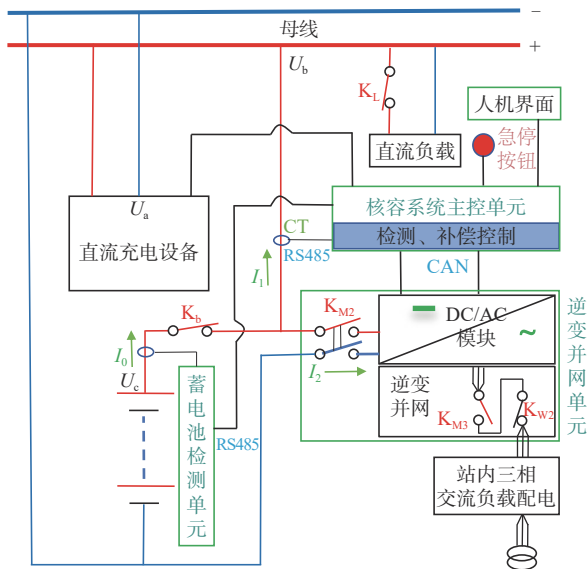


图4 调整充电模块输出电压核容技术方案

蓄电池开始直接对直流母线进行放电，随着蓄电池持续放电， $U_b$ 越来越低，需要控制充电整流器输出电压逐渐降低，保证放电过程中 $U_b$ 始终大于 $U_a$ 。如果此时充电整流器停止工作，蓄电池仍通过 $K_b$ 与直流母线保持连通，补偿控制模块停止工作，蓄电池直接为母线供电，保证母线不失电。

系统主控单元实时持续监测 $I_0$ 变化，当 $I_0 < I_{10}$ 时，由补偿控制单元启动DC/AC逆变输出给站内交流负载供电，始终控制蓄电池恒流在 $I_{10}$ 进行放电。并实时持续监测 $I_0$ 变化，通过电流负反馈电路，调节逆变模块开关管输出占空比，采取比例积分微分控制（PID, proportional-integral-derivative control）技术来控制逆变模块的输入电流 $I_2$ 的大小，依此来实现蓄电池以 $I_{10}$ 恒流放电。放电结束

后，可选择由DC/AC模块向电池恒流充电，也可以选择由直流系统的充电整流器向蓄电池恒流充电。

图4中， $K_b$ 为蓄电池连接熔丝或开关， $K_L$ 为直流负载连接熔丝或开关，CT为电流监测霍尔传感器， $K_{M2}$ 为直流接触器， $K_{M3}$ 为交流接触器， $K_{w2}$ 为外置交流连接开关。

### 方案二 DC/DC方式技术方案

调整DC/DC模块输出电压核容技术方案如图5所示，远程在线核容流程如下： $K_{M1}$ 自动断开， $Q_1$ 无压差而截止，随着蓄电池持续放电， $U_b$ 越来越低， $U_a > U_b$ ， $Q_1$ 反向截止，阻断了充电整流器向蓄电池充电。如果此时充电整流器停止工作，主控单元控制DC/DC模块、DC/AC模块停止工作，而 $Q_1$ 因 $U_b > U_a$ 处于导通状态，保证母线不失电。

$K_{M2}$ 自动闭合，DC/DC模块工作，将电压 $U_b$ 变换为电压 $U_c$ ，设定 $U_c$ 恒压且大于 $U_a$ ，即DC/DC输出端电压高于充电整流器输出电压，由蓄电池经DC/DC模块给实际负载供电。

主控单元实时持续监测 $I_1$ 变化，当 $I_1 > I_{10}$ 时，反馈调整控制DC/DC模块输出电压 $U_c$ 接近直流充电机输出电压 $U_a$ ，始终控制恒流在 $I_{10}$ 放电。当 $I_1 < I_{10}$ 时，由补偿控制单元启动 $K_{M3}$ 、 $K_{M4}$ 自动闭合，DC/AC逆变输出给站内交流负载供电。并实时持续监测 $I_0$ 变化，通过电流负反馈电路，调节逆变模块开关管输出占空比，采取PID技术来控制逆变模块的输入电流 $I_2$ 的大小，依此来实现蓄电池以 $I_{10}$ 恒流放电。待放电结束后，可选择由双向DC/AC模块向电池恒流充电，也可以选择由直流系统的充电整流

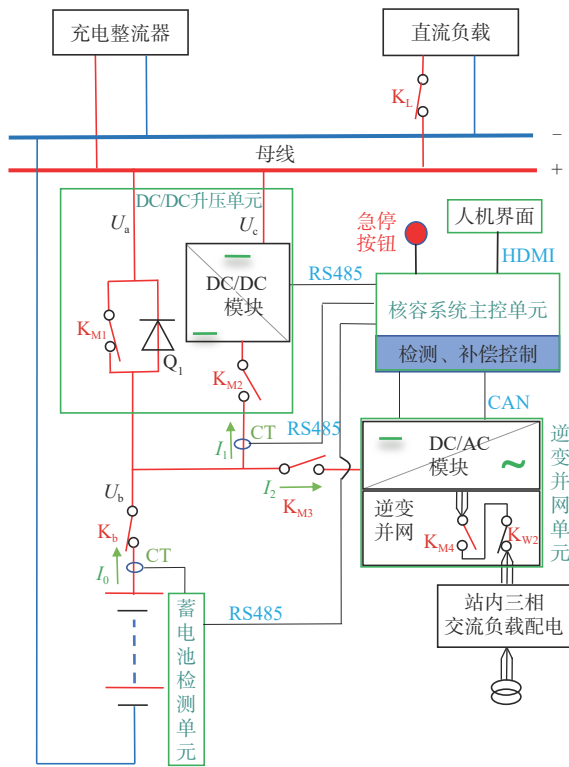


图5 调整DC/DC模块输出电压核容技术方案

器向蓄电池恒流充电。

图5中， $K_b$ 为蓄电池连接熔丝或开关， $K_L$ 为直流负载连接熔丝或开关，CT为电流监测霍尔传感器， $K_{M1}$ 、 $K_{M2}$ 、 $K_{M3}$ 为直流接触器， $K_{M4}$ 为交流接触器， $K_{W2}$ 为外置交流连接开关。

### 方案三 降压模块方式技术方案

调整降压模块电压核容技术方案如图6所示，远程在线核容流程如下： $K_{M1}$ 自动断开，降压硅链 $Q_d$ 介入充电整流器与直流母线之间，充电整流器输出至母线，电压降低，此时硅降压链出口电压 $U_b$ 小于蓄电池组端电压 $U_c$ ，蓄电池开始直接对直流母线进行放电，随着蓄电池持续放电， $U_c$ 越来越低， $Q_d$ 降压规电幅度逐渐提升，保证放电过程中 $U_c$ 始终大于 $U_b$ 。如果此时充电整流器停止工作，蓄电池仍通过原主线路与直流母线保持直连（蓄电池与直流母线主回路上不串入任何装置，安全性最高），补偿控制单元停止工作，蓄电池直接为母线供电，保证母线不失电。

系统主控单元实时持续监测 $I_1$ 变化，当 $I_1 < I_{10}$ 时，由补偿控制单元启动 $K_{M2}$ 、 $K_{M3}$ 自动闭合，DC/AC逆变输出给站内交流负载供电。并实时持续监测 $I_0$ 变化，通过电流负反馈电路，调节逆变模块开

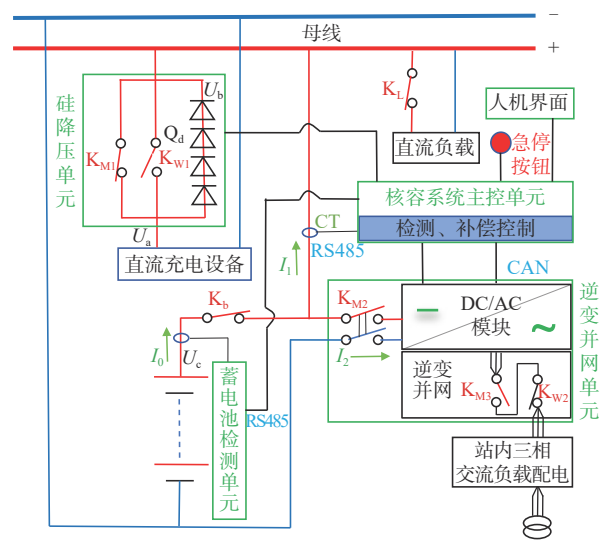


图6 调整降压模块电压核容技术方案

关管输出占空比，采取PID技术来控制逆变模块的输入电流 $I_2$ 的大小，依此来实现蓄电池以 $I_{10}$ 恒流放电。待放电结束后，可选择由DC/AC模块向电池恒流充电，也可以选择由直流系统的充电整流器向蓄电池恒流充电。

图6中， $K_b$ 为蓄电池连接熔丝或开关， $K_L$ 为直流负载连接熔丝或开关，CT为电流监测霍尔传感器， $K_{M1}$ 、 $K_{M2}$ 为直流接触器， $K_{M3}$ 为交流接触器， $K_{W1}$ 为外置直流维护开关， $K_{W2}$ 为外置交流连接开关。

### 3.2 技术方案比对分析

本文对第3.1节中描述的3种方案在操作复杂度、安全性节能能力、维护便利性等方面进行了技术对比和分析，3种核容放电方案技术对比分析见表3。3种方案主要区别是蓄电池放电时的电压控制方式，方案一采用降低充电机输出电压，使蓄电池电压高于母线电压，该方式需要对充电机进行远程控制，但在实施中，由于各厂商充电机控制方式、控制协议、通信接口差异较大，二次开发工作量大，实施难度高；方案二采用DC/DC模块升高蓄电池电压，使蓄电池电压高于母线电压，该方式需要额外增加DC/DC模块，复杂度、能源效率转换损耗、成本都会增加，在蓄电池回路上串入电气装置，安全性稍低；方案三采用可控硅链降压，使充电机输出电压经可控硅链降压后低于蓄电池电压，复杂度和成本增加相对较小。经分析，采用可控硅链降压（本文方案三）能够兼顾各方面的优势和性能，最大限度地保证蓄电池的后备安全性，如

表3 3种核容放电方案技术对比分析

对比内容	调整充电机输出电压方案	DC/DC 蓄电池组升压方案	硅链直流母线降压方案
人工用时	操作人工用时少,开发工作量大。放电操作远程控制,但需要大量的充电机通信接口控制开发	操作人工用时少,开发工作量大。放电操作远程控制,DC/DC 变换单元开发工作量大	操作人工用时少,开发工作量较大。放电操作远程控制,现场加装核容装置以及降压硅单元,安装工作量较大
安全性	较低。涉及控制直流充电机的问题,充电机是否可控(设备本身是否可控,控制后充电机的稳定性,普遍性)、可控程度等问题,如充电机控制异常,放电不能正常进行,对充电机设备运行的安全性有影响,极端情况可能会影响到母线供电的稳定性	低。DC/DC 接在蓄电池与母线之间,只有在蓄电池放电时 DC/DC 才启动工作,如 DC/DC 故障,对直流电源蓄电池主链路的供电安全有影响	较高。硅降压单元串接在直流充电机与母线之间,但硅降压单元日常不参与工作,异常也不会影响到母线供电。蓄电池主回路上不串入任何电气装置,后备有保证
控制方式	复杂。要适配控制多品牌、新旧不一的充电机监控模块,安全性认证、控制、操作都比较复杂	相对复杂。DC/DC 的控制相对复杂(连续性调节稳压控制)	简单。硅链的控制相对简单(阶梯式控制)
放电科学性	科学。可深度放电核容	科学。可深度放电核容	科学。可深度放电核容
充电科学性	科学。由直流充电机给蓄电池充电科学	科学。由直流充电机或 DC/AC 变换器给蓄电池充电科学	科学。由直流充电机给蓄电池充电科学
节能	节能。蓄电池能量可以直接利用,逆变效率损耗低	节能。可以直接利用蓄电池能量,存在 DC/DC 变换和逆变效能损耗	很节能。可以直接利用蓄电池能量,逆变效率损耗低
复杂程度	复杂。直流充电机的控制复杂	复杂。DC/DC 变换单元的控制较复杂	一般。硅降压单元的控制容易实现
现场置入难易程度	高。现场加装核容装置,需要连接控制多品牌充电机监控模块,有大量协调和现场调测工作,现场工作量大	高。DC/DC 装置体积较大,现场难以分布式或嵌入式安装,加装核容装置及 DC/DC 变换单元,现场工作量较大	低。硅降压装置、逆变补偿装置经模块化和小型化设计后可以分布式嵌入现场直流电源屏柜内
维护便利性	一般。系统中主要增加了 DC/AC 逆变并网单元、蓄电池监测单元、核容主控单元,经模块化设计后可以对其单独进行维护,但维护时涉及直流充电机的控制问题	一般。系统中主要增加了 DC/AC 逆变并网单元、DC/DC 变换单元、蓄电池监测单元、核容主控单元,经模块化设计后可以对其单独进行维护,但 DC/DC 作为电气设备也需要进行维护	便利。系统中主要增加了硅降压单元、DC/AC 逆变并网单元、蓄电池监测单元、核容主控单元,经模块化设计后可以对其单独进行维护

现场核容放电时无须额外接线, 蓄电池放电能量能直接被最大化地利用和回馈电网, 操作完全自动化, 复杂度相对较低等。

### 4 核容方案对比分析及仿真

#### 4.1 蓄电池核容流程

本文以某 110 kV 变电站 220 V 直流电源系统为例, 采用方案三进行核容性放电。按照行业标准 DL/T 5044-2014 对蓄电池容量和各类工况下直流电源系统标称电压要求, 经负荷计算, 该站配置两套参数完全一致的蓄电池组, 每组电池由 18 节 12 V 单体电池组成, 标称容量均为 150 Ah, 均充电压  $U_c = 254 \text{ V}$ , 浮充电压  $U_f = 243 \text{ V}$ , 放电终止电压  $U_{set} = 195 \text{ V}$ , 恒流放电电流  $I_{set} = 15 \text{ A}$ ; 直流母线最低工作电压  $U_{min} = 192.5 \text{ V}$ 。系统正常工作情况下, 直流母线浮充电压  $U_a = U_b = U_c = 243 \text{ V}$ , 开关  $K_{M1}$  处

于闭合状态,  $K_{M2}$ 、 $K_{M3}$  处于断开状态, 放电设备电流补偿单元、有源逆变模块等处于关机状态。对蓄电池进行自动核容共分为 3 个阶段, 蓄电池核容流程如图 7 所示, 蓄电池核容算法如算法 1 所示。

#### 算法 1 蓄电池核容算法

```

初始化  $K_2$  开关状态:  $K_{2on} = \text{true}$ ;
初始化充电电压:  $U_a = 243 \text{ V}$ ; //  $U_a$  初始
初始化母线电压:  $U_b = 243 \text{ V}$ ; //  $U_b$  终止值
初始化蓄电池端电压:  $U_c = 243 \text{ V}$ ; //  $U_c$  初始值
初始化 10 小时放电电流:  $I_{10} = 30 \text{ A}$ ; // 恒定放电电流
do while  $K_{2on} = \text{false}$ 
{
    startCapacityCheckTask(); // 启动核容任务
    if  $U_c > U_b$  then
         $I_2 = I_{10} - I_1$ ; // 计算逆变电流值为  $I_2$ 
    else

```

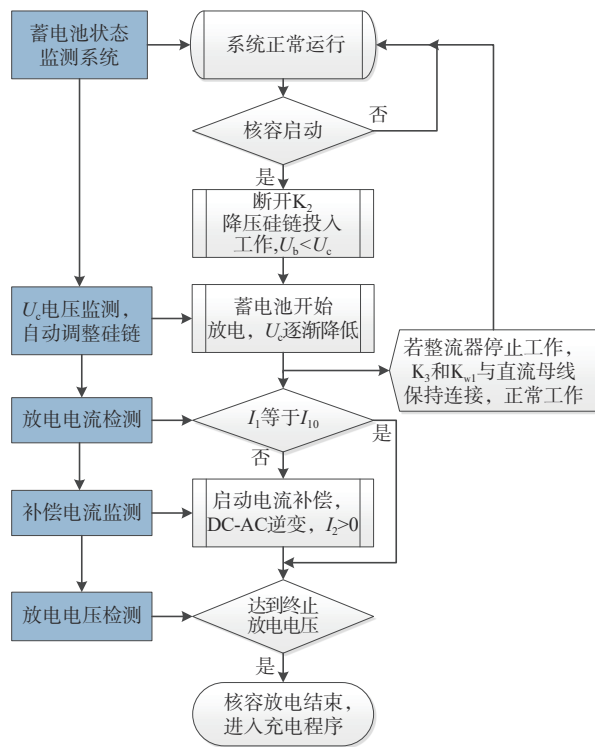


图7 蓄电池核容流程

```

startChargeTask(); //开始充电任务
    K2on=ture;
}
int I1=calcLoadCurrent(); //计算当前负载电流值
if (I1 != I10)
{
    dcAcWork(I10 - I1); // DC-AC 逆变器开始
工作
}
    
```

### 4.2 蓄电池核容仿真测试

根据核容工作要求，电力系统通常以  $C_{10}$ （10 h 率放电容量）标定蓄电池的额定容量。根据不同情况，可以采取放电 30%~50% 额定容量，即以  $0.1C_{10}$  电流放电 3~5 h；或者放电 80%~100% 额定容量，即以  $0.1C_{10}$  电流放电 8~10 h。本文测试放电电流按  $0.1C_{10}$  进行设置，单体电压下限对 12 V 蓄电池按 10.8 V 设置，总电压下限为：单体电压×电池节数（N）。

核容能力测试主要针对  $U_a$ 、 $U_b$  和  $U_c$  这三个点电压控制过程以及补偿容量进行实时测试，采集间隔设置为 6 s，放电运行时间 5 h。核容过程中各点电压测试结果如图 8 所示，总电压开始电压 246.39 V，结束电压 222.31 V，满足最终放电电压要求；放电电流 30.0 A，放电结束时蓄电池各单体电压如图 9 所示，最低单体电压为 12.27 V，最高单体电压为 12.31 V，单体电压落差为 0.34%。

根据以上测试数据，采用积分法计算电池的实际容量，计算方法如式(1)所示。

$$C = \int_0^t i(t) dt \quad (1)$$

其中， $C$  为蓄电池的实际容量， $i(t)$  为实时电流， $t$  为蓄电池放电时间，总容量为各单体容量之和。

经计算，蓄电池组的总电压等于单体电压之和，总容量等于单体容量之和，蓄电池放电容量及补偿容量对比如图 10 所示，经计算，负载放电容量为 53%，其余 47% 电能反馈到电网。

经仿真分析和计算，该方法采用带负载放电能够实时模拟蓄电池在线远程核容放电，且蓄电池放电过程中根据实时负载电流自适应地调整流向电网的逆变电流，实现恒流放电。

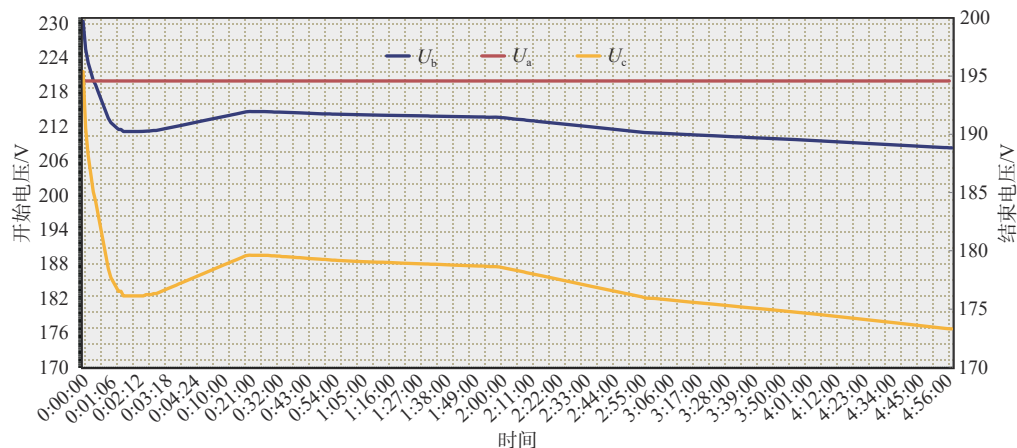


图8 核容过程中各点位电压测试结果

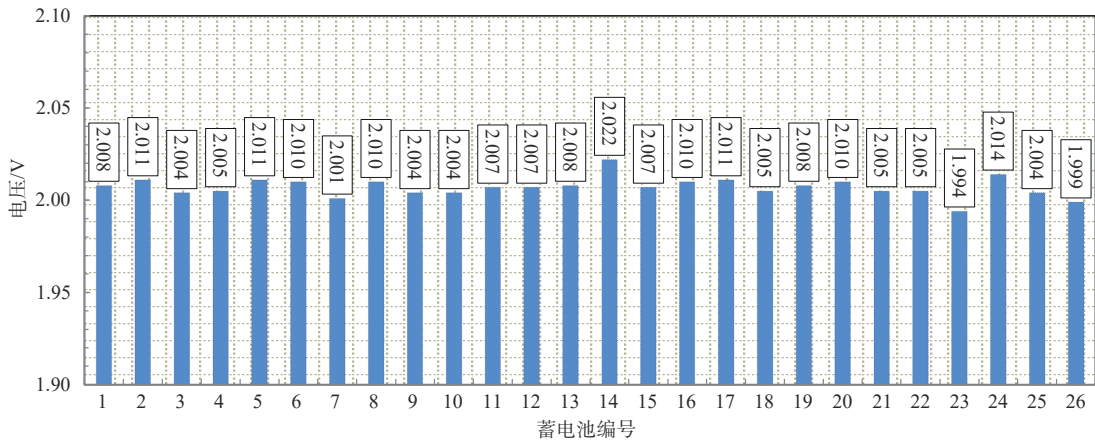


图9 放电结束时蓄电池各单体电压

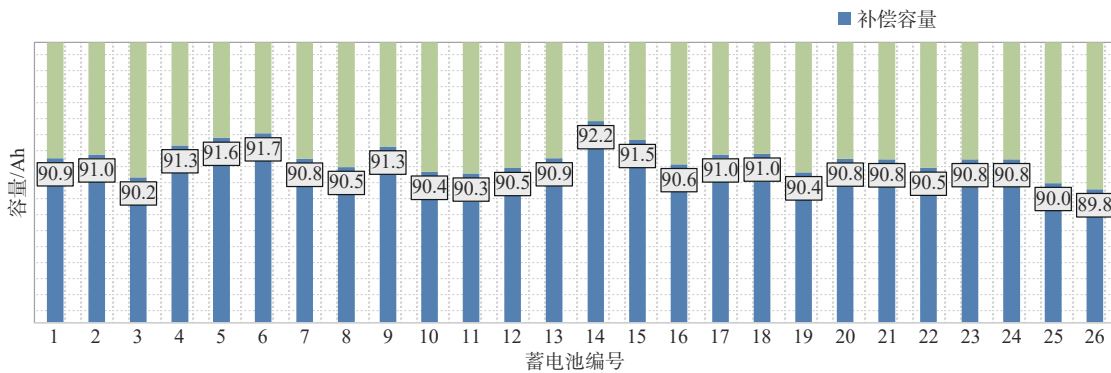


图10 蓄电池放电容量及补偿容量对比

### 5 结束语

本文针对直流电源蓄电池远程在线核容问题，提出了基于物联网架构远程充放电控制的3种设计方案以及具备实时控制能力的通信组网方案，能够满足电力系统直流电源的智能化运维需求；创新性地提出了电流补偿控制方法，实现了蓄电池带真实负载并以 $I_{10}$ 恒流放电，具备交流系统失电场景下蓄电池供电能力，通过仿真计算验证了核容放电的有效性和可靠性，解决了传统核容方案必须离线核容等问题。此外，在充放电过程中，利用DC/AC进行自适应电流补偿，将直流电源蓄电池储能能量与电网双向交互，该方案不仅适用于能源企业内部直流系统，同样适用于用户侧分布式储能、光伏储能的远程控制，推动能源的高效利用和大规模用户侧能源的泛在互联。

### 参考文献:

[1] 刘俊勇, 潘力, 何迈. 能源物联网及其关键技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(4): 9-16.

LIU J Y, PAN L, HE M. Internet of energy things and its key technologies[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(4): 9-16.

[2] 薛禹胜, 朱洪波, 王琴, 等. 物联网对能源转型的支撑[J]. 物联网学报, 2019, 3(1): 1-7.

XUE Y S, ZHU H B, WANG Q, et al. Support of the Internet of Things for energy transformation[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(1): 1-7.

[3] 黄媛, 吴刚, 刘俊勇, 等. 基于物联网技术的空港区智慧能源管控平台的研究与设计[J]. 物联网学报, 2021, 5(2): 125-133.

HUANG Y, WU G, LIU J Y, et al. Research and design of the intelligent energy management and control platform in the airport area based on the IoT technology[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2021, 5(2): 125-133.

[4] 韩青, 高昆仑, 赵婷, 等. 边云协同智能技术在电力领域的应用[J]. 物联网学报, 2021, 5(1): 62-71.

HAN Q, GAO K L, ZHAO T, et al. Application of edge-cloud collaborative intelligence technologies in power grids[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2021, 5(1): 62-71.

[5] CHEN L, WANG J X, WU Z Y, et al. 5G and energy Internet planning for power and communication network expansion[J]. iScience, 2024, 27(3): 109290.

- [6] SHEN J, DONG W Q, WANG Z F, et al. Negotiation of the global grid inspection UAV with random delay uncertainty in an information communication network based on a robust fault tolerance mechanism[J]. *Frontiers in Aerospace Engineering*, 2023, 1: 978261.
- [7] 刘建明, 赵子岩, 季翔. 物联网技术在电力输配电系统中的研究与应用[J]. *物联网学报*, 2018, 2(1): 88-102.  
LIU J M, ZHAO Z Y, JI X. Research and application of Internet of things in power transmission and distribution system[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2018, 2(1): 88-102.
- [8] 沈晓东, 刘俊勇, 胡帅, 等. 泛在电力物联网形势下考虑多主体投资的配电网运行优化策略[J]. *物联网学报*, 2021, 5(1): 117-122.  
SHEN X D, LIU J Y, HU S, et al. Optimization strategy of distribution network operation considering multi-investment entities under the situation of ubiquitous power Internet of things[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2021, 5(1): 117-122.
- [9] 黄烈江, 陈思超, 王鹏程, 等. 变电站并联型直流蓄电池全容量核容方法研究[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 38(2): 56-61.  
HUANG L J, CHEN S C, WANG P C, et al. Study on full-capacity checking method of parallel DC battery in substation[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 38(2): 56-61.
- [10] 贾平, 周鸿喜, 冷旭东, 等. 并联直流电源技术在电力通信系统中的应用[J]. *电力信息与通信技术*, 2019, 17(9): 62-66.  
JIA P, ZHOU H X, LENG X D, et al. Application of parallel DC power technology in power communication system[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2019, 17(9): 62-66.
- [11] 聂小勇, 蒋兴, 陈波波, 等. 并联磷酸铁锂电池在110kV变电站的应用研究[J]. *电源技术*, 2016, 40(5): 979-981.  
NIE X Y, JIANG X, CHEN B B, et al. Application of lithium iron phosphate batteries in parallel 110 kV substation[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(5): 979-981.
- [12] 赵梦欣, 陶文彪, 易永利, 等. 基于间歇充电的锂电池直流电源系统远程运维方案[J]. *电力信息与通信技术*, 2022, 20(6): 75-81.  
ZHAO M X, TAO W B, YI Y L, et al. Remote operation & maintenance solution for DC power supply system with lithium-ion battery based on intermittent charge[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2022, 20(6): 75-81.
- [13] 宋会平, 杨东熏, 卢萍, 等. 变电站蓄电池状态监测与在线核容活化研究[J]. *湖北电力*, 2016, 40(4): 29-31, 41.  
SONG H P, YANG D X, LU P, et al. Study on condition monitoring and on-line capacity checking and activation for substation battery[J]. *Hubei Electric Power*, 2016, 40(4): 29-31, 41.
- [14] 蒙小胖, 梁泓泉, 齐安新. 变电站直流电源容量状态在线监测系统[J]. *通信电源技术*, 2021, 38(02): 98-100.  
MENG X P, LIANG H Q, QI A X. On-line monitoring system of DC power supply capacity in substation[J]. *Telecom Power Technology*, 2021, 38(02): 98-100.
- [15] 邓渝生, 赵应春, 叶云. 变电站用蓄电池在线有源逆变核容放电研究[J]. *华东电力*, 2012, 40(2): 313-315.  
DENG Y S, ZHAO Y C, YE Y. Online active inverter check discharge of substation batteries[J]. *East China Electric Power*, 2012, 40(2): 313-315.
- [16] 李秉宇, 陈晓东, 范辉, 等. 变电站直流电源在线监测系统关键技术研究[J]. *电源技术*, 2016, 40(10): 2064-2067.  
LI B Y, CHEN X D, FAN H, et al. Research on crucial technology of on-line monitoring system in station DC power[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(10): 2064-2067.
- [17] 刘海峰, 万宁坤, 苏琨, 等. 智能变电站蓄电池在线评估方法研究[J]. *制造业自动化*, 2024, 46(6): 191-198, 214.  
LIU H F, WAN N K, SU K, et al. Research on on-line evaluation method of battery in intelligent substation[J]. *Manufacturing Automation*, 2024, 46(6): 191-198, 214.
- [18] 韩少卫, 洪卫华, 李传江. 变电站蓄电池远程充放电装置的应用[J]. *自动化应用*, 2024(12): 156-158.  
HAN S W, HONG W H, LI C J. Application of remote charging and discharging device for battery in substation[J]. *Automation Application*, 2024(12): 156-158.
- [19] 蔡勇超, 余勇, 曹小冬, 等. 以实际负载放电的蓄电池远程核容装置设计[J]. *蓄电池*, 2021, 58(2): 92-96.  
CAI Y C, YU Y, CAO X D, et al. Design of remote battery capacity verification device discharged by actual load[J]. *Chinese LABAT Man*, 2021, 58(2): 92-96.
- [20] 杨忠亮, 黄世回, 王汝钢. 蓄电池在线核容放电关键装置与远程控制策略的研究[J]. *蓄电池*, 2020, 57(1): 5-11.  
YANG Z L, HUANG S H, WANG R G. Research on key device and remote control strategy for on-line capacity check discharge of batteries[J]. *Chinese LABAT Man*, 2020, 57(1): 5-11.
- [21] 王杰, 马海, 张康, 等. 基于智能蓄电池监测的远程核容作业方案设计[J]. *电源技术*, 2018, 42(4): 575-577.  
WANG J, MA H, ZHANG K, et al. Design of long distance capacity check discharge scheme based on smart battery monitoring[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42(4): 575-577.
- [22] 邱育义, 李欧. 一种基于蓄电池组自动核容的新型直流系统设计与研究[J]. *通信电源技术*, 2019, 36(8): 8-9, 13.  
QIU Y Y, LI O. Design and research of a new DC system based on automatic nuclear capacity of battery pack[J]. *Telecom Power Technology*, 2019, 36(8): 8-9, 13.
- [23] 李学斌, 解放, 张焱. 基于容量分解的电力直流电源系统蓄电池容量计算方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(3): 966-972.  
LI X B, XIE F, ZHANG Y. Calculation method of battery capacity in DC power supply system based on capacity decomposition[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 966-972.
- [24] 钟景瑜, 廖凯, 李波, 等. 基于随机片段数据的锂电池状态估计方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 205-212.  
ZHONG J Y, LIAO K, LI B, et al. State estimation method of

lithium battery based on random fragment data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 205-212.

- [25] 马文忠, 李冠成, 张奎同, 等. 面向能源互联网的多端口DC/DC能源路由器控制策略研究[J]. 物联网学报, 2020, 4(4): 32-42.  
MA W Z, LI G C, ZHANG K T, et al. Research on the control strategy of multi-port DC/DC energy router for the energy Internet[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(4): 32-42.
- [26] 陈轲娜, 罗锦, 宁鑫, 等. 直流电源系统在国内外应用状况[J]. 四川电力技术, 2018, 41(3): 52-55.  
CHEN K N, LUO J, NING X, et al. Application status of DC auxiliary power system at home and abroad[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(3): 52-55.
- [27] 钟国彬, 刘石, 徐凯琪, 等. 变电站用VRLA蓄电池典型失效模式及危险性分析[J]. 蓄电池, 2017, 54(4): 160-169, 194.  
ZHONG G B, LIU S, XU K Q, et al. Analysis of the typical failure modes and risk of the VRLA batteries for substations[J]. Chinese Labat Man, 2017, 54(4): 160-169, 194.
- [28] 王洪, 林雄武, 赵立成, 等. 直流电源阀控密闭铅酸蓄电池组智能管理[J]. 电源技术, 2017, 41(5): 738-740, 745.  
WANG H, LIN X W, ZHAO L C, et al. Intelligent management for DC power supply valve-control sealed lead-acid battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(5): 738-740, 745.
- [29] 李晶, 罗洋, 邹学毅, 等. 基于蓄电池冗余技术的直流系统失压补偿研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(12): 55-59.  
LI J, LUO Y, ZOU X Y, et al. Research on voltage loss compensation of DC system based on battery redundancy technology[J]. Power Electronics, 2019, 53(12): 55-59.
- [30] 黎可, 穆居易, 金翼, 等. 磷酸铁锂电池火灾危险性[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 1177-1186.  
LI K, MU J Y, JIN Y, et al. Fire risk of lithium iron phosphate battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(3): 1177-1186.
- [31] 傅旭, 肖汉, 姚力, 等. 基于随机生产模拟的间歇性电源可信容量计算[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 82-89.  
FU X, XIAO H, YAO L, et al. Credit capacity calculation of intermittent power based on stochastic production simulation[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 82-89.

[作者简介]



贾平(1982-), 男, 国网江苏省电力有限公司信息通信分公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信组网规划、新一代通信电源与系统运维技术。



高军锋(1978-), 男, 南京灵达电气有限公司工程师, 主要研究方向为直流电源系统、自动控制理论与技术。



华伟韬(1995-), 男, 国网江苏省电力有限公司信息通信分公司助理工程师, 主要研究方向为电力通信运维技术、蓄电池远程监控。



陈文(1980-), 男, 国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司高级工程师, 主要研究方向为直流电源运行检修、蓄电池状态监测技术。



时维俊(1988-), 男, 国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司高级工程师, 主要研究方向为电网直流电源监控、蓄电池远程核容与检修。



徐惠臣(1994-), 男, 国网江苏省电力有限公司信息通信分公司工程师, 主要研究方向为电力通信网络技术、电力物联网、智慧运检技术。



刘剑汛(1982-), 男, 南京灵达电气有限公司助理工程师, 主要研究方向为通信电源技术。