

微电网源荷储多时间尺度分区自动化控制技术

郭强¹, 夏文芳¹, 郝良霞¹, 杜三元¹, 冯涛²

(1. 国网西宁供电公司, 青海 西宁 810000;
2. 天津天大求实电力新技术股份有限公司, 天津 300392)

摘要: 微电网作为一种新型的能源系统, 在全球范围内得到了广泛关注。为提升微电网源荷储的自动化控制质量, 提出一种基于多时间尺度分区的方法。过程中利用微电网不同区域的正序电压和负序电压作为计算参数, 设计3层控制层结构进行长时间尺度自动化控制, 针对随机性波动插入包含短时间和超短时间的短期控制策略进行优化。实验结果表明, 研究方法在分区数量为50时的电压不平衡度与预设值吻合度能保持在98.4%以上; 研究方法的指令计算时间低于其他方法。说明研究方法具有良好的微电网源荷储控制性能。

关键词: 微电网; 自动化控制; 时间尺度; 人工蜂群算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7241(2025)09-0018-05

Microgrid Source Load Storage Multi Time Scale Zoning Automatic Control Technology

GUO Qiang¹, XIA Wenfang¹, HAO Liangxia¹, DU Sanyuan¹, FENG Tao²

(1. State Grid Xining Power Supply Company, Xining 810000, China;
2. Tianjin Tianda Qiushi Power New Technology Co., Ltd., Tianjin 300392, China)

Abstract: As a new type of energy system, microgrids receive widespread attention worldwide. In order to improve the automatic control quality of microgrid source and load storage, a method based on multi time scale partitioning is proposed. During the process, the positive sequence voltage and negative sequence voltage of different regions of the microgrid are used as calculation parameters, and a three-layer control layer structure is designed for long-term automated control. Short term control strategies including short and ultra short time are inserted to optimize for random fluctuations. The experimental results show that the voltage imbalance of the research method can maintain a consistency of over 98.4% with the preset value when the number of partitions is 50. The instruction calculation time of the research method is lower than that of other methods. This indicates that the research method has good control performance for microgrid source load storage.

Keywords: microgrid; automatic control; time scale; artificial bee colony

0 引言

随着可再生能源的快速发展和分布式发电技术的日益成熟, 微电网作为一种新型的能源系统, 在全球范围内得到了广泛关注。微电网具有能源利用率高、运行灵活、环境友好等优点, 对于提高能源供应的可靠性和安全性具有重要意义^[1]。目前, 微电网能量管理领域的研究主要集中在以下方面: 长时间尺度的能量预测, 短期控制策略, 优化调度算法等。在实际应用中, 常用的方法包括基于模型预测控制、模糊控制、神经网络控制等^[2]。有国内学者尝试使用高频注入法进行微电网控制技术设计, 有效提高了微电网的直流均流控制^[3]。有国外学者对区域微电网的控制技术进行了研究, 一定程度上解决了微电

网的非预期性故障问题^[4]。然而, 这些方法在处理多时间尺度、多区域、多目标的能量管理问题时, 仍然存在一定的局限性^[5]。通过长时间分区控制可以将微电网的能量管理问题划分为多个相互关联的子问题, 降低问题的复杂性。短期控制策略可以针对不同时间尺度的子问题, 设计相应的控制算法, 实现对微电网内部能量的快速响应和精确调节。在这样的背景下, 本文研究尝试利用多时间尺度并与分区控制技术结合, 提出一种创新的微电网自动化控制技术, 以期为电力行业提供一定技术参考。

1 微电网源荷储多时间尺度分区自动化控制技术设计

1.1 微电网电压长时间尺度分区自动化控制技术设计

微电网的源、荷、储之间的协同控制是实现微电网稳

*基金项目: 青海省国网科技项目(522814170006)

收稿日期: 2024-01-10

定运行和优化调度的关键^[6-7]。分区控制可以将系统划分为多个子系统,每个子系统可以独立进行控制和优化,能够提高系统整体性能^[8-9]。研究针对微电网不同区域对电能的不同质量要求,建立微电网电压在长时间尺度下的分区控制技术。当不平衡负荷被接入电路的公共耦合点时,微电网公共耦合点会出现电压不平衡,进而出现负序分量。负序分量计算如式(1)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{ss} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Y}_{ph} \mathbf{A} \\ \mathbf{V}_{ss} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{V}_{ph} \\ \mathbf{I}_{ss} = \mathbf{Y}_{ss} \mathbf{V}_{ss} \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{Y}_{ss} 代表导纳矩阵; \mathbf{A} 代表负序分量转换矩阵; \mathbf{Y}_{ph} 代表两相导纳矩阵; \mathbf{V}_{ss} 代表电压矩阵; \mathbf{V}_{ph} 代表相电压矩阵; \mathbf{I}_{ss} 代表电流矩阵。

求解负序分量得到正负序电流数据,将负序电路简化后对分配关系进行分析。研究设计微电网电压自动化控制技术包含3个控制层。其中第1个控制层使用虚拟阻抗环和电压控制环实现对电压频率和幅值的控制,进而达到对分布式电源补偿量的分配。第2个控制层对补偿参数进行生成,进行补偿增益后作为分布式补偿量的优化参数输入第1个控制层中。第2个控制层的优化补偿过程如图1所示。

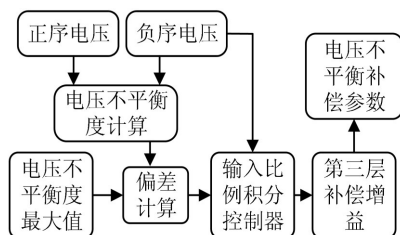


图1 第2个控制层的优化补偿过程

由图1可见,第2个控制层对本地系统捕捉到的公共耦合点正序和负序电压进行计算,得到公共耦合点的电压不平衡度。将电压不平衡度参考值和计算结果进行对比,将偏差输入比例积分控制器中处理。将处理结果和公共耦合点负序电压相乘,获得电压不平衡补偿的参考量。其中电压不平衡度计算如式(2)所示。

$$VUF = \frac{\sqrt{(\omega_{PCCd}^N)^2 + (\omega_{PCCq}^N)^2}}{\sqrt{(\omega_{PCCd}^P)^2 + (\omega_{PCCq}^P)^2}} \quad (2)$$

式中, VUF 代表电压不平衡度; ω_{PCCd}^N 代表公共耦合点正序电压 d 轴数据; ω_{PCCq}^N 代表公共耦合点正序电压 q 轴数据; ω_{PCCd}^P 代表公共耦合点负序电压 d 轴数据; ω_{PCCq}^P 代表公共耦合点负序电压 q 轴数据。

第3个控制层包含初始计算、数学模型和优化算法,研究选用人工分权算法对第3层补偿增益进行寻优。将所得的补偿增益输入第2个控制层中对各分布式电源的

补偿量进行优化调整。第3层补偿增益能够对各分布式电源补偿公共耦合点的出力进行调节,进而将不同母线的电压不平衡度控制在正常区间,保证不同区域的电压质量。第3层补偿增益计算如式(3)所示。

$$TCG_i = \frac{S_i n}{\sum_{j=1}^n S_j} \quad (3)$$

式中, TCG_i 代表第3层补偿增益; S_i 代表第 i 个分布式电源可参与补偿的容量; n 代表分布式电源总数。

使用人工蜂群算法进行第3层补偿增益求解时,需要先预设算法蜂群总数、迭代次数和局部搜索次数^[10-11]。之后对系统数据进行读取,并进行算法初始化。对各向量的适应度进行计算,按适应度值进行排序,取列表上半区解作为采蜜蜂种群,对同一蜜源上蜜蜂的连续停留次数进行记录。将计算结果和约束条件进行对比,若计算结果和约束条件有出入则重新进行适应度计算。然后进行局部搜索并更新蜜源位置,对解的正确概率进行计算。当局部搜索次数达到预设次数时,采蜜蜂转化为侦察蜂并重新初始化并循环,直到迭代次数达到预设次数时输出结果。利用3个控制层调节分布式电源的输出功率参考值,进而实现微电网长时间尺度的电压分区控制。

1.2 加入短期控制策略的微电网源荷储分区自动化控制技术

在实际电网运行中,要求并网型微电网能够支持电网调度相关任务,但电网环境中的随机性波动会导致长期控制策略的预测结果和短期真实情况存在偏差^[12]。研究针对电网环境的随机波动问题,设计短期控制策略对微电网源荷储自动化控制技术进行优化。研究将功率型储能和能量型储能进行结合作为微电网储能系统,在此基础上设计分为上、下两层结构的微电网控制策略,并设置时间尺度为短时间和超短时间两类。分两层结构的微电网控制策略结构如图2所示。

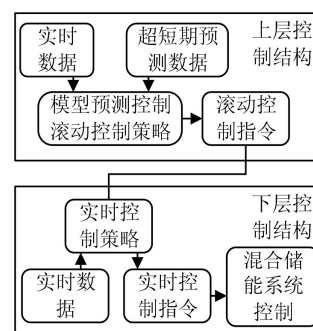


图2 分两层结构的微电网控制策略结构

由图2可见,上层控制结构的控制周期为5 min,由实时数据和超短期预测数据生成模型预测控制滚动控制策略,进而发出滚动控制指令。下层控制结构的控制周期

为1 min,由实时数据和上层控制结构输出的滚动控制指令生成实时控制策略,进而打出实时控制指令,同时对混合储能系统进行控制。建立模型预测控制的预测模型时,使用储能系统荷电状态计算方程和微电网功率平衡方程进行结合,如式(4)所示。

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k) + D\Delta v(k) \\ y(k) = Cx(k) \\ S_h(k) = \frac{S_e(k)E_e + S_b(k)E_b}{E_e + E_b} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $x(k)$ 代表状态向量; $y(k)$ 代表输出向量; A, B, C, D 代表系数矩阵; $S_h(k)$ 代表 k 时刻混合储能系统的荷电状态,由超级电容和电池储能的实时荷电状态计算得到; E_e 代表超级电容容量; E_b 代表电池储能容量; $\Delta u(k)$ 代表控制向量; $\Delta v(k)$ 代表扰动向量; $S_e(k)$ 代表 k 时刻超级电容的荷电状态; $S_b(k)$ 代表 k 时刻电池储能的荷电状态。

进行多次向前迭代获得时域内的预测模型状态向量和输出向量。对上层控制结构进行优化时,需要保证时域内的功率跟踪偏差,对混合储能系统的调度性能进行优化。对上层控制施加有功功率平衡约束、储能荷电状态约束、联络线功率约束和储能功率约束。为了提升预测模型的预测准确性,对下层控制的反馈进行收集并对系统向量进行校正,如式(5)所示。

$$x(k+1|k) = x_{\text{rak}}(k+1) \quad (5)$$

式中, $x(k+1|k)$ 代表 k 时刻预测 $k+1$ 时刻的状态向量; $x_{\text{rak}}(k+1)$ 代表由下层控制结构完成实时控制后 $k+1$ 时刻的状态向量。

在模型求解中引入松弛变量的平方作为惩罚项,将模型预测控制的优化转为二次规划问题进行求解。使用下层控制结构在超短时间尺度下对功率波动产生的影响进行消除。下层控制结构在接收到上层控制结构的滚动

控制指令信息后,由实时数据对混合储能系统每分钟需要提供的功率进行计算,如式(6)所示。

$$P_h^*(i) = P_{g,\text{ref}}(k) - P_{pv,\text{real}}(i) + P_{l,\text{real}}(i) \quad (6)$$

式中, $P_h^*(i)$ 代表混合储能系统每分钟需要提供的功率; $P_{g,\text{ref}}(k)$ 代表联络线的目标功率; $P_{pv,\text{real}}(i)$ 代表 i 时刻的能源实时功率; $P_{l,\text{real}}(i)$ 代表 i 时刻的负荷实时功率。

对超级电容提供的高频分量和电池储能提供的低频分量进行低通滤波,分离出混合储能系统所需提供的功率高低频分量,计算得到电池储能和超级电容需要提供的功率值。使用变滤波系数方法划分出超级电容的5个荷电状态区间,分别选取对应的滤波系数进行滤波处理。计算得到的功率控制指令发送到超级电容和电池储能后实现对储能的控制。研究构建的微电网自动化控制流程如图3所示。

由图3可见,在进行微电网源荷储多时间尺度分区自动化控制时,需要判断是否出现短期随机性波动,若出现短期随机性波动则进入短期控制策略,更新相关控制信息后由短期控制策略的上层控制结构输出联络线功率目标指令。之后由下层控制结构生成储能的功率指令,完成所有荷电状态区间计算后对是否继续滚动优化进行判断。若需要则循环执行短期控制策略,若不需要则正常执行长期控制策略,通过3层控制层完成对微电网电压频率和幅值的控制。最终达到对微电网源荷储多时间尺度分区进行自动化控制的目的。

2 微电网源荷储多时间尺度分区自动化控制技术有效性分析

为了对研究设计的微电网源荷储自动化控制技术在环境中的有效性进行分析,研究设置Alpha和Bravo两个实际场景进行测试分析。Alpha场景为总装机容量

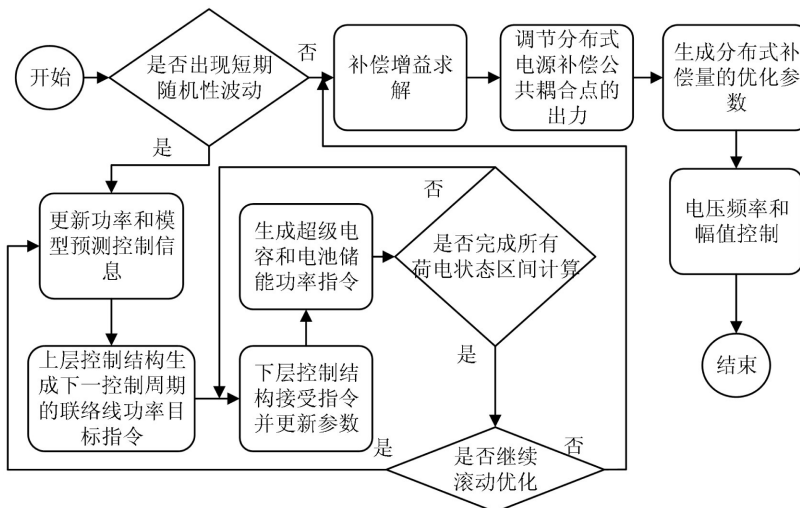


图3 微电网自动化控制流程

190 kW 的光伏储能微电网,Bravo 场景为额定功率 35 kW 的逆变器微电网。进行分析时与单时间断面法和虚拟储能协调法对比。对进行控制时的电压不平衡度与预设值吻合度进行测试,如图4所示。

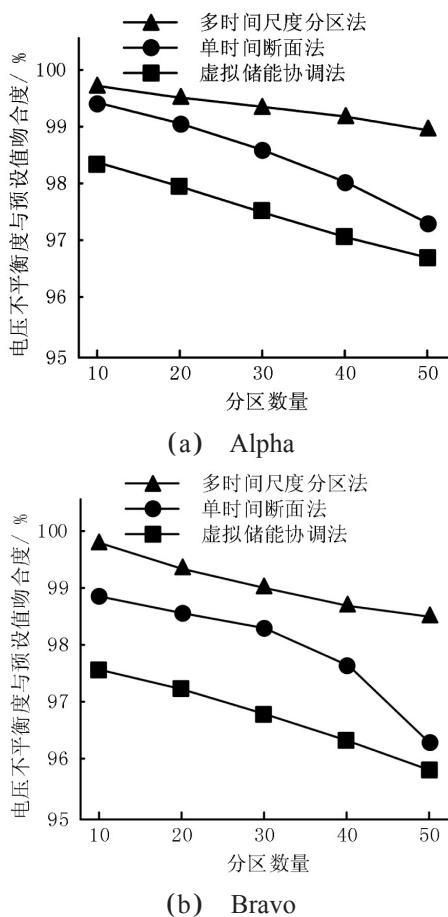


图4 电压不平衡度与预设值吻合度

由图4可见,不同方法的电压不平衡度与预设值吻合度都随着分区数量增多而下降。由图4(a)可见,在Alpha场景中,单时间断面法在分区数量为50时的电压不平衡度与预设值吻合度下降到97.3%。虚拟储能协调法在分区数量为10时的电压不平衡度与预设值吻合度为98.4%;在分区数量为50时的电压不平衡度与预设值吻合度下降到96.7%。多时间尺度分区法在分区数量为10时的电压不平衡度与预设值吻合度为99.7%;在分区数量为50时的电压不平衡度与预设值吻合度下降到98.9%。由图4(b)可见,在Bravo场景中,单时间断面法在分区数量为50时的电压不平衡度与预设值吻合度下降到96.3%。虚拟储能协调法在分区数量为50时的电压不平衡度与预设值吻合度下降到95.8%。多时间尺度分区法在分区数量为10时的电压不平衡度与预设值吻合度为99.8%;在分区数量为50时的电压不平衡度与预设值吻合度下降到98.4%。说明研究方法能够进行更准确的电压不平衡分配。对调度计划跟踪相对偏差进行分析,如图5所示。

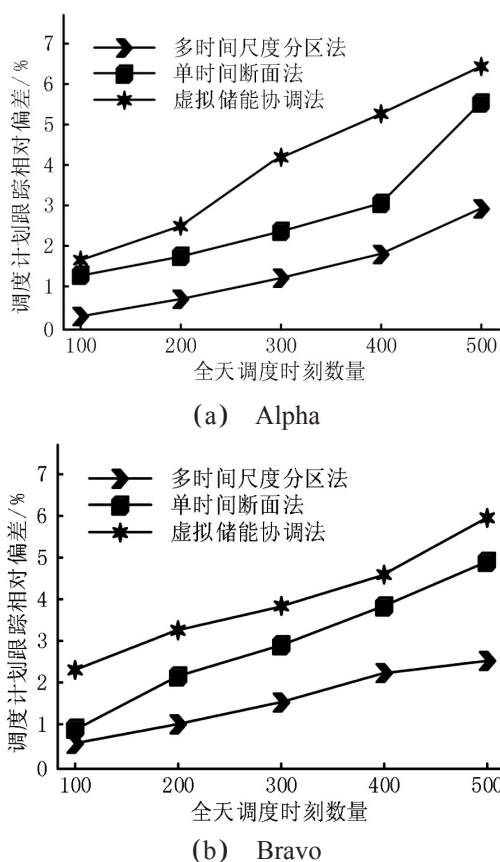


图5 调度计划跟踪相对偏差

由图5可见,不同方法的调度计划跟踪相对偏差随着全天调度时刻数量上升而上升。由图5(a)可见,在Alpha场景中,单时间断面法在全天调度时刻数量为100时的调度计划跟踪相对偏差为1.2%。虚拟储能协调法在全天调度时刻数量为100时的调度计划跟踪相对偏差为1.7%;在全天调度时刻数量为500时的调度计划跟踪相对偏差上升到6.4%。多时间尺度分区法在全天调度时刻数量为100时的调度计划跟踪相对偏差为0.3%;在全天调度时刻数量为500时的调度计划跟踪相对偏差上升到2.8%。由图5(b)可见,在Bravo场景中,单时间断面法在全天调度时刻数量为500时的调度计划跟踪相对偏差上升到4.8%。虚拟储能协调法在全天调度时刻数量为100时的调度计划跟踪相对偏差为2.3%。多时间尺度分区法在全天调度时刻数量为100时的调度计划跟踪相对偏差为0.6%;在全天调度时刻数量为500时的调度计划跟踪相对偏差上升到2.6%。说明研究方法能够更准确地执行微电网控制方案。对指令的计算时间进行测试,如图6所示。

由图6可见,不同方法的指令计算时间随分区数量增加而上升。由图6(a)可见,在Alpha场景中,单时间断面法在分区数量增加到80时的指令计算时间上升到47.8 ms。虚拟储能协调法在分区数量为10时的指令计算时间为25.2 ms;在分区数量增加到80时的指令计算时间上升到51.6 ms。多时间尺度分区法在分区数量为10时的指令

计算时间为6.3 ms;在分区数量增加到80时的指令计算时间上升到20.9 ms。由图6(b)可见,在Bravo场景中,单时间断面法在分区数量为10时的指令计算时间为17.0 ms;在分区数量增加到80时的指令计算时间上升到51.1 ms。虚拟储能协调法在分区数量增加到80时的指令计算时间上升到64.8 ms。多时间尺度分区法在分区数量为10时的指令计算时间为2.9 ms;在分区数量增加到80时的指令计算时间上升到26.3 ms。说明研究方法具有良好的指令计算速度。

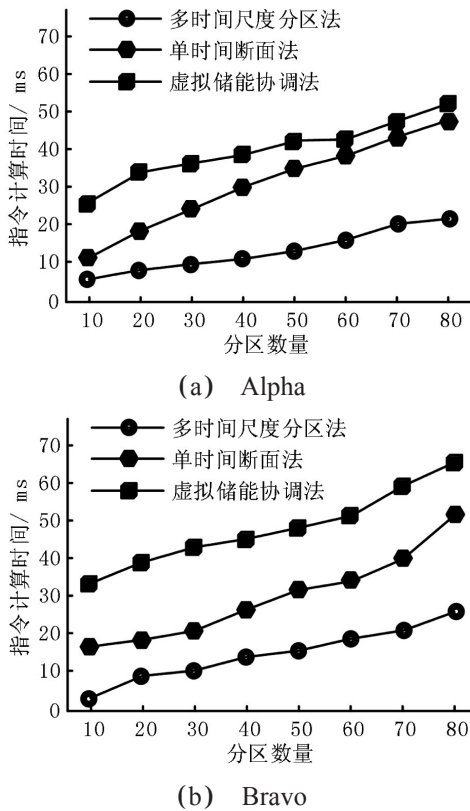


图6 指令计算时间

3 结束语

随着能源系统的快速发展,微电网逐渐成为解决分布式能源集成和智能电网管理的有效途径。研究提出了一种结合多时间尺度的微电网源荷储分区自动化控制方法。过程中在长时间尺度下对微电网电压进行控制,之后使用建立模型预测控制法建立预测模型,然后设计了完整的自动化控制流程,最后对研究方法进行了有效性分析。实验结果表明,研究方法在电压不平衡度与预设值吻合度测试中,在分区数量为10时的电压不平衡度与预设值吻合度最高达到99.8%;进行调度计划跟踪相对偏差测试时,研究方法在全天调度时刻数量为500时的调度计划跟踪相对偏差最高仅为2.8%;在指令计算时间测试中,研究方法分区数量增加到80时的指令计算时间最高仅为26.3 ms。说明研究方法能够以更快速更准确的方式

对微电网源荷储进行控制。但研究仅在中小型电力网络中进行测试,后续将扩大测试范围,以丰富实验结果并优化方案。

参考文献:

- [1] 程浩原,艾芊,孙东磊,等.多微电网虚拟备用模型在计及不确定性的需求侧资源分配中的应用[J].电力自动化设备,2022,42(2):210-216.
- [2] 于立岩,吴迪迪,满成,等.光伏并网接入配电网的太阳能发电系统设计[J].计算机测量与控制,2018,26(3):107-111.
- [3] 李涛.基于关联特性矩阵的电网信息物理系统建模及设计[J].微型电脑应用,2019,35(1):103-106.
- [4] ZHOU Y, ZHAI Q, WU L. Optimal operation of regional microgrids with renewable and energy storage: solution robustness and nonanticipativity against uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4218-4230.
- [5] 陈页,郭亦宗,郭创新,等.计及需求响应的微电网云储能配置模型[J].电气自动化,2022,44(2):25-28.
- [6] 汤志锐,邝梓佳,郭志燊.计及电网运行方式的配网风险评估技术研究[J].微型电脑应用,2023,39(5):178-181.
- [7] 张珂珩,彭晨辉,赵康.基于全息时标量测数据挖掘的配电网设备健康状态诊断分析[J].计算机测量与控制,2018,26(3):29-34.
- [8] 陈丽光,何绍洋,钟永城,等.粒子群算法下考虑停电成本的微电网储能优化配置模型[J].自动化技术与应用,2022,41(8):106-108,157.
- [9] YIN L, KIM K N, TRIFONOV A, et al. Designing wearable microgrids: towards autonomous sustainable on-body energy management[J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(1): 82-101.
- [10] 董天强,陈波,周克,等.一种裕量最大的高速载波比特功率分配算法[J].计算机测量与控制,2017,25(6):192-198.
- [11] 袁敬中,苏东禹,姜宇,等.基于LSM树的电网远程监控数据混合存储方法[J].微型电脑应用,2023,39(4):76-78.
- [12] 薛建德,王海龙,李盼盼,等.基于ST7单片机的储能供电容量优化控制系统[J].自动化技术与应用,2023,42(5):27-30.

作者简介:郭强(1988—),男,硕士,副高级工程师,研究方向:电网规划。

通信作者:冯涛(1984—),男,本科,中级工程师,研究方向:电网规划。