

光储充一体化系统容量优化配置方法研究

李建林, 许 璐, 马凌怡

(储能技术工程研究中心(北方工业大学), 北京 100144)

摘要: 电动汽车的发展对于推动双碳目标实现具有重要作用, 但是大规模的电动汽车负荷接入电网后, 会影响电网的安全运行, 光储充一体化系统可以利用光伏系统、充电站和储能系统平衡电动汽车充电负荷引起的波动, 故容量优化配置方法的选取对光储充一体化系统的建设与发展至关重要。首先对光储充一体化系统的组成以及光储充一体化充电站发展现状作了简要的概述, 列举国内典型的光储充一体化系统示范项目的分布情况。然后分析了电动汽车充电负荷影响因素及基于蒙特卡罗法的电动汽车负荷预测方法。最后比较了几种典型的优化算法应用于系统容量配置的优缺点, 以期为科学合理地配置光储充一体化系统的容量提供借鉴。

关键词: 光储充一体化系统; 电动汽车; 蒙特卡罗法; 容量配置; 多目标优化算法

Research on optimal capacity configuration method of PV-energy storage-charging integrated system

LI Jianlin, XU Lu, MA Lingyi

(Energy Storage Technology Engineering Research Center (North China University of Technology), Beijing 100144, China)

Abstract: The development of electric vehicles plays an important role in promoting the double carbon goal. However, the large-scale electric vehicle load connected to the power grid will affect the safe operation of the power grid. The PV-energy storage-charging integrated system is a green and intelligent charging mode for the reason that it can use photovoltaic system. Therefore, how to configure the capacity of the photovoltaic and energy storage system, And the selection of capacity optimization method is very important for the construction and development of optical storage and charging integrated system. Firstly, a brief overview of the composition of the integrated optical storage and charging system and the development status of the integrated optical storage and charging charging station is giver, and the distribution of typical domestic integrated optical storage and charging system demonstration projects is listed. Then the influencing factors of electric vehicle charging load and the electric vehicle load forecasting method based on Monte Carlo method is analyzed. Finally, the advantages and disadvantages of several typical optimization algorithms applied to the system capacity configuration are compared, in order to provide reference for the scientific and reasonable configuration of the capacity of the integrated optical storage and charging system.

Key words: PV-energy storage-charging integrated system; electric vehicle; Monte Carlo method; capacity configuration; multi-objective optimization algorithm

大学生创新创业课题“兆瓦级储能三电平变流器仿真建模及控制策略研究”(108051360022XN296); 国家电投集团科学技术研究院科技项目“电源侧储能创新课题研究”(126005JX0120220023)研究成果

0 引言

由于工业的发展,不可再生能源的大量消耗与浪费,使得环境恶化问题日益严重。近年来,随着碳中和、碳达峰目标的逐步落实,加速了电动汽车与储能市场的发展^[1-2]。我国光伏资源储备量丰富,故面向环保、便捷和安全等目标的“光伏+储能+充电站”一体化系统(简称光储充一体化系统)逐渐受到了人们的青睐。光伏系统可以实现清洁能源的有效利用,储能系统可以存储光伏发电剩余电量,与电网协调配合,缓解电动汽车充电负荷对电网的冲击,充电站作为中间环节,有序控制能量交换。光储充一体化系统对于抑制光伏等可再生能源发电的随机性具有积极的作用,但考虑到其投资经济性,光伏和储能的配置增加了原本就已居高不下的充电站初始投资成本,这使得光储充一体化系统在市场环境下更不经济。所以在实际建设及应用中,需要切实考虑当地的电动汽车充电负荷的分布情况,据此合理配置光伏系统和储能系统的装机容量,降低成本,提高一体化系统的综合效益。

首先,掌握区域内的电动汽车充电负荷的分布情况,对于研究光储充一体化系统的容量配置问题至关重要,要全方面考虑电动汽车充电负荷的影响因素,对区域内电动汽车充电负荷进行模拟预测。其次,对于光储充一体化系统容量优化配置问题,较多考虑光储充一体化充电站所带来的经济效益,很少考虑其环境效益和社会效益。当从多角度出发研究光储充一体化系统容量配置时,需要建立多目标函数,此时是一个多目标优化问题,所以在求解时需采用多目标智能优化算法。每种算法都有自己的优劣势与最佳适用场景,可根据实际情况与需求,选择合适的多目标智能优化算法,必要时可选取多种算法进行对比,获得更加合理可靠的装机容量数据。

1 光储充一体化系统概述

1.1 光储充一体化系统结构

光储充一体化系统通常是由供配电系统、充

电系统、监控系统、光伏系统和储能系统组成的微电网系统。供配电系统主要为一次设备和二次设备提供电源;充电系统主要为电动汽车负荷充电;监控系统可实时监测、读取和备份数据;光伏系统将太阳能转化为电能,供充电站内负荷充电;储能系统存储能量,在夜间电价低谷时将低价电能存入储能电池,在白天用电高峰时刻将其送入充电站给电动汽车负荷充电。光储充一体化典型系统结构示意图如图1所示。

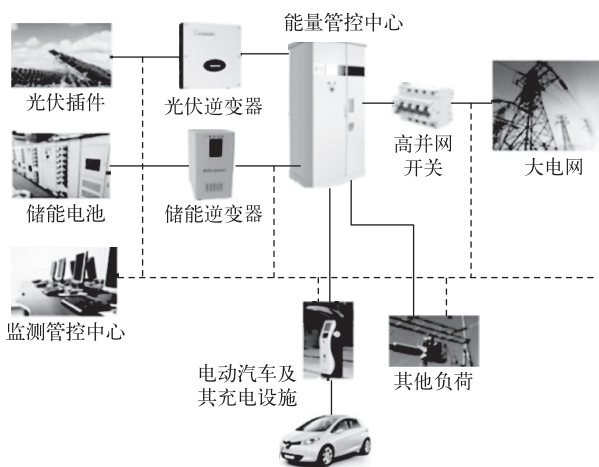


图1 光储充一体化典型系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical system structure of optical storage and charging integration

1.2 光储充一体化充电站发展现状

光储充一体化充电站既可以实现清洁能源的就地消纳,也能够实现削峰填谷等辅助功能,有效提高电网运行时的可靠性与安全性^[3]。随着光伏产业发展日益成熟,充电站能量管理策略愈加完善,储能技术和电动汽车产业不断进步,进一步解决了光储充一体化充电站的理论和和技术问题。目前,许多国家和地区都开始积极建设光储充一体化系统工程,并且取得了较好的成果。

文献[4]列举了国内多项光储充一体化系统试点项目,并且随着储能技术的发展,试点项目的能量管理策略和用户侧服务项目愈加全面与丰富;文献[5]重点阐述了现有示范工程的规模及组成、多组态运行模式及不同模式间的切换条件;文献[6]从实践和理论两个方面证明了我国风光储输联合发电模式的可行性。我国光储充一

体化系统典型示范工程分布情况见表1。

表1 光储充一体化系统典型示范工程分布情况

Tab. 1 Distribution of typical demonstration projects of integrated optical storage and charging system

时间	地点	光伏容量 /kW	储能容量 /kW·h	充电桩数量 / 个
2019	安徽	800	13 000	70
2020	北京	340	100	13
2021	广西	350	1 000	100
2022	河南	1 749	未发布	30

由此可见,光储充一体化充电站无论是在理论上还是实践中都取得了一定的进展。并且,由于电动汽车充电负荷的分布对于光储充一体化系统配置的光伏装机容量和储能装机容量的大小以及电网调度问题都有直接的影响^[7],故要想准确地求解充电站的最佳光伏装机容量和储能装机容量,需要对区域内的电动汽车充电需求及其分布进行模拟与预测。

2 电动汽车负荷预测对容量配置的影响及其分析

2.1 电动汽车充电负荷影响因素分析

由于电动汽车具有一定的无序性与随机性^[8-9],故电动汽车充电负荷的分布情况会直接影响到光储充一体化充电站中容量配置的规模大小。电动汽车充电负荷的影响因素包括车辆电池容量、充电功率、起始充电时间、终止充电时间、车辆行驶规律和区域内电动汽车规模等。首先,不同电动汽车的电池容量和充电功率曲线差异较大,直接影响到用户对充电类型的选择;其次,起始充电时间、终止充电时间很大程度上影响着电动汽车用户行为;最后区域内电动汽车的规模大小直接关系到模型预测的准确性。这些因素互相联系又互相制约,增加了对一个区域内的电动汽车充电负荷预测的难度。

2.2 电动汽车充电负荷预测

目前已有很多学者对电动汽车充电负荷预测进行了深入研究。文献[10]在随机影响因素的概率分布基础上,使用蒙特卡罗法计算一天中单台

电动汽车的功率需求期望和标准差,进而延伸到多台电动汽车的功率需求计算方法,但考虑范围与因素较为单一,具有一定的局限性。文献[11]建立了电动汽车出行的时空模型,通过蒙特卡罗法预测一天内的电动汽车充电负荷曲线。文献[12]增加了在交通路网约束下,构建不同程度的出行链模型,对电动汽车负荷进行预测。由于目前对电动汽车充电负荷预测多集中在短期且单一的时间段内,很少考虑在较长时间尺度下、不同季节时的电动汽车充电负荷模型进行预测,故为了提高预测的准确性与全面性,文献[13]提出一种考虑季节特性的多时间尺度负荷预测模型。文献[14]综合考虑温度和交通环境对电动汽车充电负荷的影响,建立了基于蒙特卡罗法的充电负荷预测模型。文献[15]考虑了多源信息实时交互及用户的充电决策行为两大因素,建立基于后悔理论的电动汽车用户充电站选择模型,使用蒙特卡罗法对两种典型出行特性的电动汽车的时空分布进行了预测。综上所述可以看出,对电动汽车充电负荷的预测模型和方法考虑的因素逐渐多元化,并且综合分析客观因素与主观因素,可构建更加精确的负荷预测模型。

每个电动汽车的充电时间、充电时长、日均行驶里程数和用户习惯等数据都是相互孤立的,并且存在一定的无序性与不确定性,所以想要建立准确度较高的电动汽车充电负荷预测模型难度较大。但蒙特卡罗法利用计算机对电动汽车数据进行大量的随机抽查,并且对抽查样本测验结果进行统计,获得更加准确、全方面的相关数据,可以克服上述困难,更好地模拟电动汽车充电负荷。蒙特卡罗法核心思想就是:首先使用蒙特卡罗法抽取大量电动汽车的初始荷电状态作为样本,得到电动汽车的起始充电时间、终止充电时间和充电时长等数据;然后对抽样区间进行压缩,进而得到电动汽车初始充电时间数据并且进行计算;最后将所测取的电动汽车负荷数据累加,得到该区域内总的电动汽车充电负荷。图2为蒙特卡罗法模拟充电负荷流程图。

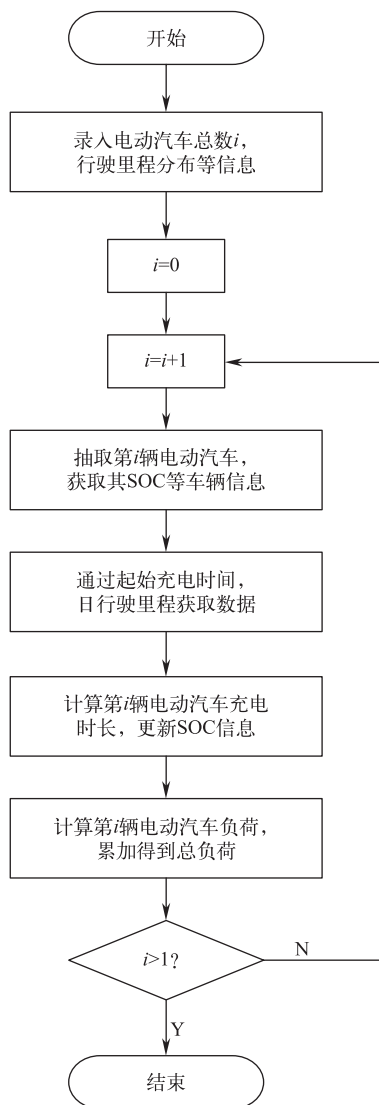


图2 蒙特卡罗法模拟充电负荷流程

Fig. 2 Simulation of charging load process by Monte Carlo Method

3 光储充一体化系统容量优化配置

3.1 多目标优化算法

光储充一体化系统的建设成本、光伏和储能系统的更换成本、充电服务费收益以及光伏供给负荷占比等因素直接关系到光伏和储能系统初期容量配置的大小，这是一个多目标优化问题。如何科学计算容量大小，使光储充一体化系统在满足充电负荷需求的同时，可以获得更大的经济效益、社会效益和环境效益，使其可持续发展是至关重要的。

在研究光储充一体化系统容量配置及其容量

优化问题时，目前大部分学者会采用多目标优化算法进行求解。常用的多目标优化算法有粒子群算法、遗传算法、NSGA算法、NSGA-II算法和分布式鲁棒优化算法^[16]。下面主要对这五种优化方法进行分析比较。

如果从算法简单且容易实现的角度出发，则应该优先选择粒子群算法，此算法在求解过程中并没有许多参数需要调整，搜索速度较快，并且算法具有记忆性，会对种群的最佳位置与速度进行持续更新，直至找到最优解，但其最大的缺点是很容易陷入局部最优解。所以在使用此方法时，参数的选取是很重要的。其次是遗传算法，在粒子群算法的基础上增加了交叉、变异和遗传三个算子，一方面扩大了种群的覆盖面；另一方面又避免了粒子群算法陷入局部最优的风险。NSGA算法是在普通遗传算法的基础上，在选择算子执行之前根据个体之间的支配关系进行分层，可以使好的个体有更大的机会遗传到下一代，但是此算法计算量较大，且缺乏精英策略。故NSGA-II算法对其进行了改进，引入了快速非支配排序算法、精英策略和个体拥挤距离算子三个步骤，不仅大大增加了种群的多样性与丰富性，而且可以保留父代中的最优解，防止最优解的丢失。但是NSGA-II算法解的分布不是很均匀，且收敛速度相较于上面两种算法来说较为缓慢。如果要考虑容量配置时的风险问题，则可以选择使用分布式鲁棒优化算法进行求解。它的思想是考虑最差环境分布下的最优解，把随机变量变成多个随机变量的集合，但是其实现过程较为复杂，结果较为保守。

由此可见，对于光储充一体化系统容量优化配置的问题，有许多优化算法可供选择，每种算法都有自己的优劣势，考虑的因素和侧重点都各不相同，所以在研究光储充一体化系统的容量配置问题时，应该根据实际情况进行具体分析。并且为确保容量配置模型的准确性，可以选择两种或两种以上的算法进行比较分析。表2列举出典型的容量配置优化算法，并简述其优缺点，可对容量配置研究方法提供一定的参考。

表 2 容量配置多目标优化算法比较
Tab. 2 Comparison of multi-objective optimization algorithms for capacity allocation

多目标优化算法	核心思想	优点	缺点
遗传算法	遗传、突变、自然选择以及杂交	①覆盖面大，利于全局择优；②减少了陷入局部最优解的风险，算法易于实现并行化	①探索能力有限；②计算量大；③稳定性差
粒子群算法	从随机解出发，通过迭代寻找最优解，通过适应度来评价解的品质	①简单容易实现，并且没有许多参数需要调整；②搜索速度较快；③具有记忆性	①容易陷入局部最优；②不能有效解决离散及组合优化问题；③参数选取困难
NSGA 算法	与简单的遗传算法相比，在选择算子执行之前根据个体支配的关系进行分层	①覆盖面大，利于全局择优；②优化目标个数任选；③非劣最优解分布均匀，并且允许存在多个不同的解等价	①计算多且杂；②缺少精英策略，优良的解容易丢失；③需要指定共享半径
NSGA-II 算法	提出快速非支配排序算法，引进精英策略，采用拥挤度和拥挤度比较算子	①计算复杂度降低；②加强全局搜索能力；③可防止早熟	①解的分布性不均匀，连续性较差；②收敛速度依旧较慢
分布式鲁棒优化算法	将原始问题以一定的近似程度转化为一个具有多项式计算复杂度的凸优化问题	①仅利用少量信息即可建立较准确的模型	①考虑因素较为全面，优化结果较为保守

3.2 典型容量配置模型及优化算法分析

国内学者对光储充一体化系统容量优化配置方法开展了相关研究。多数研究仅从一个角度出发，如将充电站年均净收益最大或者系统运行成本最小作为目标函数，建立单目标优化模型并进行求解。文献[17]以系统经济性最好为目标，采用遗传算法，提出一种微电网容量优化配置的方法。文献[18]以储能系统净收益最大作为目标，建立储能参与协助电网调峰的容量配置模型，并且分别采用人工蜂群算法和粒子群优化算法对模型进行求解。文献[19]分别考虑光伏系统和储能系统的成本，在满足系统最低充电的约束下，构建光储充一体化系统的最小成本容量配置模型。文献[20]基于光伏发电和储能的5G基站光储系统容量优化配置方法进行研究，利用光伏发电解决5G基站用电成本大的问题，采用粒子群算法，通过配置储能对光伏出力和峰谷电价差进行合理利用，进一步降低5G基站运行成本。文献[21]在考虑风电不确定性和弃风率约束时，采用分布式鲁棒优化方法，求解风电场储能容量配置问题。但上述文献仅考虑了光储充一体化系统所带来的经济效益，或者是基于不确定性因素来建立容量配置模型并且进行求解分析，目标函数较为单一，考虑范围较为局限，这将在一定程度上限制光储充一体化系统

容量配置的准确性与合理性。

基于上述缺点，文献[22]以充电站年净收益最大和光伏供给负荷占比两个目标函数，使用粒子群算法对容量进行配置，并且分析了光储充一体化系统的综合效益。文献[23]建立系统总运行费用和储能循环电量最小两个目标函数，采用非支配排序遗传算法NSGA-II求解多目标容量优化配置模型。文献[24]构建了电动汽车在系统中的静态经济调度和动态经济调度模型，后又采用NSGA-II算法和改进的粒子群算法对目标函数间的关系进行仿真分析。

综上所述，发现大多数学者对于容量配置及容量优化问题仅考虑一体化系统所带来的经济性，没有充分考虑国家和地区对于推动光储充一体化系统发展的相关补贴政策。其次对于光储充一体化系统的光伏和储能装机容量的求解方法，一般考虑使用实现较为简单的粒子群算法进行求解。当考虑到不确定因素影响时，多采用分布式鲁棒优化算法来获取较为保守的解。当目标函数数量较多时，一般选取NSGA-II算法进行求解，首先是因为它的计算复杂度比NSGA算法的复杂度降低了很多，其次非支配排序与精英策略能够更大概率地保留优秀个体，并且其采用拥挤度的方法代替了需要指定共享半径的适应度共享策略，保证了种群中个体的多样性，有利于个体能

够在整个区域内进行交叉、变异和遗传操作。最后，因为NSGA-II算法的计算结果不是唯一的，故它可以存在多个解序列，进而可以根据目标函数的重要性和实际情况进行选择。所以NSGA-II算法无论是在运算时间还是在优化结果等方面都具有一定的优势，是一种优秀的多目标优化算法。

4 结束语

电动汽车因其环保高效的显著优点受到了人们的青睐。近年来电动汽车产业发展迅速，充电基础设施的完善也迫在眉睫，特别是光储充一体化充电站容量配置的规模大小，直接影响到光储充一体化系统的发展潜力。本文重点介绍了在光储充一体化系统容量优化配置时，区域内电动汽车负荷预测的方法以及光储充一体化系统容量的优化配置方法。

首先，对于电动汽车负荷预测的方法，一般选用蒙特卡罗法，利用计算机对电动汽车负荷的充电数据进行大量的抽查、统计与计算，可以建立准确度较高的数学模型，对光储充一体化系统的容量配置提供可靠的基础数据。其次，基于光储充一体化系统容量的优化配置问题，一般采取粒子群算法和NSGA-II算法。其中，粒子群算法实现较为简单，适合单目标函数或者双目标函数的求解。如果目标函数为两个或者两个以上时，且想要得到更加多样的解进行对比分析时，则应选取NSGA-II算法，一方面，此算法增加的三个算子很大程度上提高了最优解的质量；另一方面，求解结果不唯一，保证了解的多样性与丰富性，利于研究者根据实际情况进行选择。当然，在研究光储充一体化系统的容量配置问题时，不应该局限于一种优化方法，可采用多种优化方法进行求解，增加解的可靠性与准确性。

同时也不应仅局限于研究光储充一体化系统的经济效益，还应该充分考虑一体化系统所带来的环境效益和社会效益，以期对容量配置提供更加全面科学的指导。

参考文献

- [1] 李建林, 姜冶蓉, 方知进. “双碳”战略下储能利好政策解析[J]. 电气时代, 2021(9): 8-10.
- [2] 何蛟, 张谦然. “双碳”背景下电动汽车充电基础设施软硬件发展趋势研究[J]. 科技与创新, 2021(18): 92-93, 96.
- [3] 曹希桓. 光储充一体化充电站配置优化方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [4] 江晓蓓. “光储充”一体化微电网将迎来大发展[J]. 新能源科技, 2021(2): 33-34, 36.
- [5] 高明杰, 惠东, 高宗和, 等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013(1): 59-64.
- [6] 刘新竹, 赵燕良. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 信息与电脑(理论版), 2016(4): 148-149.
- [7] 王少林, 王刚, 王晓磊, 等. 基于改进蜂群算法的电动汽车微电网优化调度[J]. 电气应用, 2022(4): 63-70, 83-84.
- [8] LIN D Y, KUO J K. The vehicle deployment and relocation problem for electric vehicle sharing systems considering demand and parking space stochasticity[J]. Transportation Research Part E, 2021(12): 1-18.
- [9] RASOULI B, SALEHPOUR M J, WANG J, et al. Optimal day-ahead scheduling of a smart micro-grid via a probabilistic model for considering the uncertainty of electric vehicles' load[J]. Applied Sciences, 2019(22): 4872.
- [10] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010(11): 126-130.
- [11] 何若太, 刘澄, 王颖, 等. 基于出行链的电动汽车无序充电对配电网影响的时空特性分析[J]. 电气应用, 2018(21): 29-35.
- [12] 李含玉, 杜兆斌, 陈丽丹, 等. 基于出行模拟的电动汽车充电负荷预测模型及V2G评估[J]. 电力系统自动化, 2019(21): 88-96.

- [13] 牛牧童, 廖凯, 杨健维, 等. 考虑季节特性的多时间尺度电动汽车负荷预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022(5): 74-85.
- [14] 熊小萍, 林光阳, 郝邵磊, 等. 计及温度与交通影响的电动汽车充电负荷预测[J]. 电工技术, 2021(14): 73-76.
- [15] 张美霞, 孙铨杰, 杨秀. 考虑多源信息实时交互和用户后悔心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 632-645.
- [16] 瞿丹. 多目标优化进化算法的研究及其应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [17] 牛涛, 钱康, 孙纯军, 等. 基于遗传算法的微电网容量配置方法及软件开发[J]. 中国电力, 2016(9): 160-164.
- [18] 李宇星, 鲁宇, 李昊, 等. 基于最小运行成本的储能参与电网辅助调峰容量配置及优化运行方法[J]. 电器与能效管理技术, 2021(11): 22-29.
- [19] 崔杨, 潘宇, 王泽洋, 等. 计及功率损耗的分布式光伏-储能系统出力优化及容量配置方法[J]. 可再生能源, 2017, 35(2): 245-251.
- [20] 韩子颜, 王守相, 赵倩宇, 等. 计及分时电价的5G基站光储系统容量优化配置方法[J/OL]. 中国电力: 1-8[2022-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20220221.1445.010.html>.
- [21] 杨立滨, 曹阳, 魏韡, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2020(16): 45-52.
- [22] 杨猛. 光储充一体化电动汽车充电站容量配置及综合效益研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [23] 禹威威, 刘世林, 陈其工, 等. 考虑需求侧管理的光伏微电网多目标优化调度方法[J]. 太阳能学报, 2017(11): 2972-2981.
- [24] 庄怀东. 含电动汽车的微网系统经济调度和优化配置研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.

作者简介

李建林 (1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 大规模储能技术。

许璐 (1998—), 女, 本科, 研究方向: 大规模储能技术。

马凌怡 (1999—), 女, 本科, 研究方向: 储能运行与控制技术。

(收稿日期: 2022-06-12)