

城市轨道交通光伏发电系统的应用现状及发展趋势*

陈霞¹ 韩春白雪² 张晔¹ 邓文丽² 王蓝² 张丽² 戴朝华²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都 // 第一作者, 高级工程师)

摘要 将光伏发电技术与城市轨道交通供电系统相结合, 不仅节能减排, 也是降低城市轨道交通线路运营成本的需要。介绍了目前国内城市轨道交通光伏发电系统的应用现状, 对城市轨道交通光伏并网方案及拓扑结构进行了分析, 指出并网后面临的技术难题。对今后该系统的发展趋势和研究重点进行了构想并提出建议。

关键词 城市轨道交通; 光伏发电系统; 工程应用

中图分类号 U231.8; TM615

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.037

Application Status and Development Trend of Photovoltaic Power Generation System in Urban Rail Transit

CHEN Xia, HAN Chunbaixue, ZHANG Ye, DENG Wenli, WANG Lan, ZHANG Li, DAI Chaohua

Abstract Integrating photovoltaic power generation technology into urban rail transit power supply system can not only save energy and reduce emission, but also reduce the operation cost of urban rail transit lines. The application status of domestic urban rail transit photovoltaic power generation system is introduced. Urban rail transit photovoltaic grid-connected scheme and topology structure are analyzed, and the technical problems faced after grid connection are pointed out. Future research trends and key focuses are conceived and suggestions are put forward.

Key words urban rail transit; photovoltaic power generation system; engineering application

First-author's address Guangzhou Metro Design and Research Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

太阳能光伏发电系统(以下简为“光伏发电系统”)是利用太阳能电池直接将太阳能转换成电能的发电系统。将光伏发电系统产生的电能供给城市轨道交通车辆及其辅助设备, 不仅能促进当地可再生能源的消纳, 更能缓解城市轨道交通系统的供

电压力, 并在降低运营成本的同时促进“绿色交通”的构建, 符合建立低碳交通模式的基本国策^[1]。目前, 光伏发电系统在整个城市轨道交通供电网络的应用研究相对较少, 因此, 有必要对该系统的应用现状进行总结, 分析将光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统的方案及其技术问题。

1 城市轨道交通光伏发电系统的工程应用

光伏发电系统通常以光导照明、车载光伏、光伏电站等形式接入城市轨道交通供电系统。其中, 以光伏电站接入城市轨道交通系统为主流, 且光伏电站通常以独立光伏发电系统、并网光伏发电系统、独立/并网光伏发电系统等 3 种形式接入城市轨道交通系统。

1.1 各种工程应用形式的特点

光导照明是一种无电照明系统, 具有节能安全、采光面积小等特点, 但受天气和位置影响较大, 适用于顶层建筑、地铁上盖建筑等场所^[2]。

车载光伏发电系统通常是将光伏组件铺设于车体上方, 其适用于在郊区地面运行的市郊轨道交通。车载光伏发电系统可供车内照明用电或作为辅助系统的电源, 但其发电面积受到车体限制。

光伏电站的 3 种形式中, 独立光伏发电系统所发电能直接给负载供电, 负载与供电系统完全断开, 且通常配置储能。此种形式控制策略简单, 但供电可靠性较差。独立光伏发电系统适用于负载容量较低, 且供电可靠性要求较低的站内三级负荷、一般照明负荷等, 其安装位置可选在城市轨道交通出入口及车辆段外需要照明的路段。

并网光伏发电系统分为无逆流型和逆流型两种。前者为自发自用, 即只向负载供电; 后者为自发自用、余电上网, 即向负载供电后剩余电能馈入电网。无逆流并网模式需添加限流器, 以限制电流

* 国家重点研发计划项目(2017YFB1201003)

反向流入电网。该模式控制较简单,但对负荷匹配要求高,一般配置储能,在光伏发电容量与负荷规模相当的场所使用,如高架车站及部分规模较大的车辆段。逆流并网模式可实现富裕电能上网,适用于光伏容量大、剩余电能较多的场所^[3],如大型车辆基地。并网光伏发电系统与城市轨道交通供电系统共同为负载供电,其可靠性较高。

根据不同工况,独立/并网光伏发电系统可运行在独立和并网两种模式下。该发电系统将城市轨道交通供电系统作为光伏电源的备用,在负载进线处设置电源切换装置。在保证供电可靠性的前提下,由光伏发电系统给负载供电;当光伏发电系统电能不足时,即投入使用城市轨道交通供电系统。独立/并网光伏发电系统适用于光、储容量较小和负荷较低的场所,如高架区间、高架车站等。

表 1 光伏电站工程应用现状^[10-18]

工程名称	安装位置	装机容量/kW	并网电压/kV	完成年份
上海申通地铁光伏发电项目	车辆基地	10 000	35	2015
广州地铁鱼珠车辆段光伏项目	车辆基地	5 000	35	2018
石家庄地铁西北通综合维修基地光伏项目	车辆基地	1 000	35	2016
北京燕房线停车场光伏发电项目	车辆基地	600	0.4	2016
济南地铁 R1 线范村车辆基地光伏发电项目	车辆基地	430	0.4	2017
苏州高新有轨电车 1 号线车辆段屋顶光伏电站项目	车辆基地	1 740	10	2018
深圳地铁 6 号线高架站光伏项目	高架车站	2 300	0.4	2018
济南地铁 R1 线高架站光伏项目	高架车站	670	0.4	2017
广州地铁 14 号线新和站光伏项目	地面出入口	200	0.4	建设中
北京地铁 14 号线张郭庄站光伏项目	安装位置	60	0.4	2013
重庆轻轨 3 号线四公里站和金渝站光伏项目	车辆基地	43.2	0.4	2014
宁波地铁 2 号线光伏玻璃项目	车辆基地	2.936	0.4	2014

2 城市轨道交通光伏并网发电系统

城市轨道交通光伏交流并网发电系统如图 1 所示。

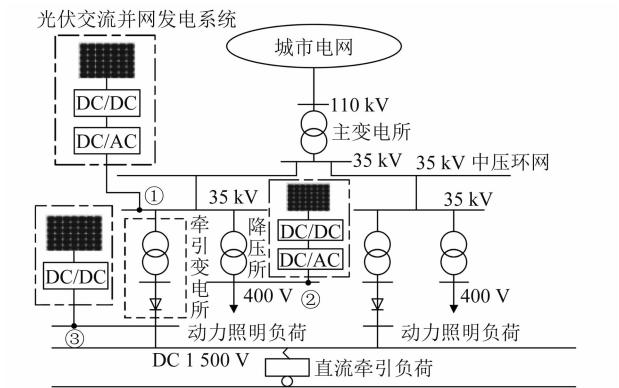


图 1 城市轨道交通光伏交流并网发电系统示意图

2.1 光伏交流并网发电系统的结构及特点

光伏交流并网发电方案如图 1 中的并网点①、

1.2 工程应用现状

光导照明和车载光伏在城市轨道交通中的应用相对较少。广州地铁 21 号线在水西停车场和运营指挥中心的地铁上盖,安装了光导照明系统,为运用库、地下室等场所提供照明^[4]。中车唐山机车车辆有限公司正在开发搭载光伏发电系统的城市轨道交通新能源车辆^[5],该车辆以光伏发电系统为主动力源为其提供辅助电源。文献[6]介绍了一种针对直流电源车辆的光伏发电系统,采用该光伏发电系统,每辆客车可在 30 年内节电 31.5 万 kWh。

受城市建筑拥挤而空间受限的影响,地铁工程建设方通常利用郊外大面积的停车场、车辆段,以及沿线的高架车站等场所铺设光伏组件,为不同等级负荷供电^[7]。根据安装位置不同,将光伏电站工程进行分类,如表 1 所示。

并网点②所示。当光伏发电系统的装机容量大于 1 MW 时,选择高压侧(35 kV)并网;当光伏发电系统的装机容量小于 1 MW,应接入低压侧(400 V)^[8]。两种方式下的光伏交流并网发电系统的结构^[9],如图 2 所示。其中,低压侧并网系统构成简单,初始投资低,对光伏交流发电系统的容量要求低,但由于电压等级低且仅适用于近距离输电,多见于高架车站和地铁入口;高压侧并网电压等级较高,能够降低远距离输电带来的线路损耗,因此,所需光伏交流发电系统的容量也较高,适用于大面积车辆基地。

光伏交流并网发电系统应用普遍,控制策略相对成熟,并网点处于变电所处,方便光伏发电系统接入,但运行过程中占用牵引变电所容量。在能量管理方面,若采用无逆流并网模式,需加装储能装置以避免大规模弃光。采用逆流并网模式可省掉储能装置,此时光伏发电系统优先为负荷供电,多余电量上网为降压变电所和临近牵引变电所负荷

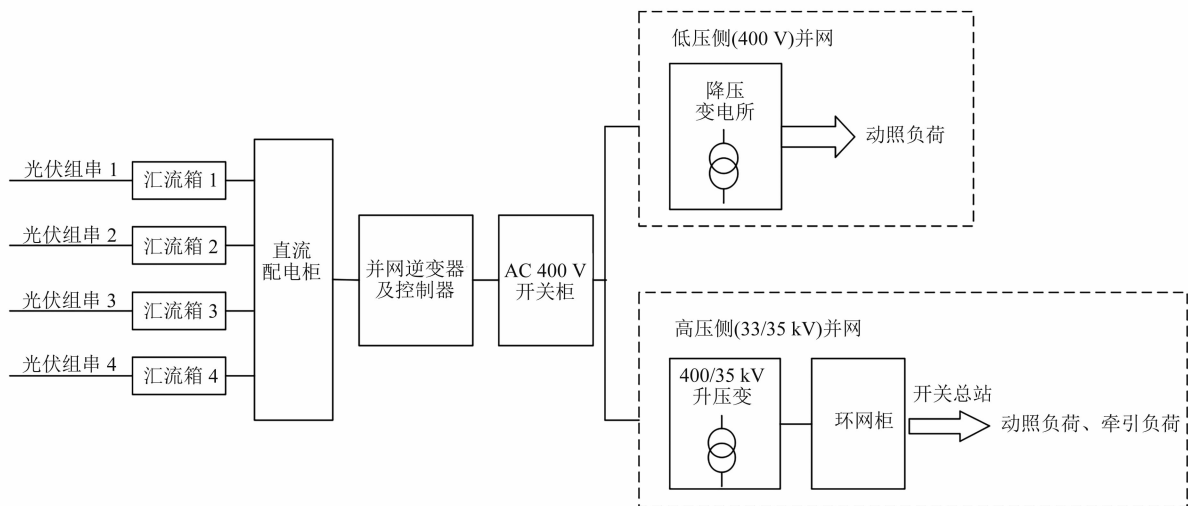


图2 光伏交流并网发电系统的结构图

供电。在电能质量方面,文献[10]对1 MW 光伏接入 AC 35 kV 进行仿真分析,结果表明,输出电能谐波含量满足并网要求。为避免光伏交流并网发电系统接入导致系统功率因数下降,文献[11]提出采用一种无功功率输出的方法以提升电能质量。

2.2 光伏直流并网发电系统的结构及特点

光伏直流并网发电系统如图1中的并网点③所示。将光伏发电系统直接接入城市轨道交通供电直流侧,减少了交流到直流的转换损耗^[12]。该模式具有电能质量高、谐波污染较小、不占用牵引变电站整流装置容量等优点。东日本铁路公司对比分析了将光伏接入 AC 6.6 kV 与 DC 1 500 V 的功率损耗,结果显示,将光伏发电系统接入 DC 1 500 V 效果更好^[13]。文献[14]给出了上海轨道交通两种并网模式下的供电节能情况,结果证实,光伏直流并网模式下节能倍率更高。

光伏直流并网发电系统需安装储能装置,对光伏进行削峰填谷,并回收再生制动能量。城市轨道交通牵引电机由于频繁启动、制动,而导致网侧电压波动大^[15],控制策略也相对复杂。另外,由于初期需投入储能装置,造成投资成本较高。

2.3 技术难题

光伏交流并网发电系统可参考将光伏发电系统接入配电网系统及铁路交流牵引系统的情况。文献[16]综述了将光伏并网后对配电网产生的诸如电能质量、孤岛效益等的影响。文献[17]通过理论及仿真分析,说明了将光伏发电系统接入铁路 AC 27.5 kV 变电站后对电能质量的影响。目前,国

内各城市已有多条线路投入使用光伏交流并网技术,但由该技术带来的具体电气问题,以及这些问题是否影响供电系统的稳定运行,尚缺乏系统分析。

光伏直流并网发电系统需考虑的问题相对复杂。文献[18]总结了将光伏电站接入城市轨道交通牵引供电系统本身存在的诸如谐波、电压偏差等问题,为光-储并网带来了挑战。此外,车辆频繁制动产生大量再生制动能量,若不利用储能装置进行回收,将使母线电压抬升甚至保护失效。

目前,将光伏发电系统接入城市轨道交通直流牵引供电系统后,主要面临以下2大技术难题。

2.3.1 电能质量

牵引网电压在车辆频繁起停下承受着极大冲击,将光伏发电系统并入后可能造成电压、频率越限;加上光伏发电系统因不具有调压、调频能力而引起电压波动,这将加大对牵引网的控制和调度的难度。

光伏逆变器本就是一个谐波源。文献[19]通过仿真分析说明了小容量光伏发电系统与交流供电系统间的谐波交互影响很小。但直流供电系统采用24脉波整流机组,会产生一系列谐波,其与光伏谐波将引发交互的问题。

光伏发电系统仅输出有功功率,将其接入后无疑会对系统功率因数造成影响^[20]。若不对无功功率进行补偿,将引起功率因数下降,从而增加额外的功率因数调整电费。

2.3.2 可靠性与稳定性

光伏发电系统与城市轨道交通供电负荷均具

有时变性和非线性^[21]。供电系统并网后运行在双重不确定性与双重非线性状态下,加上光伏波动对牵引网暂态的影响,致使供电系统的可靠性和稳定性面临巨大挑战,因此,相关控制策略和负荷预测研究也更加复杂。

城市轨道交通负荷的剧烈波动及其引发的电能质量问题,均可能导致光伏发电系统中相关设备不正常运行甚至发生脱网事故,这对光伏发电系统的高低电压穿越能力、设备过载能力要求也更加严格。

3 光伏发电系统并网的拓扑结构

按光伏发电系统接入的城市轨道交通母线类型,将拓扑结构分为交流并网拓扑与直流并网拓扑。

3.1 光伏交流并网拓扑结构

图3为光伏发电系统并入城市轨道交通供电交流侧的典型拓扑结构^[24]。该拓扑结构不加储能装置,光伏发电系统经DC/DC、DC/AC接入交流母线,并通过控制器进行控制。

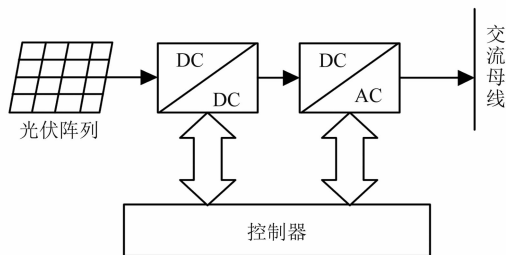
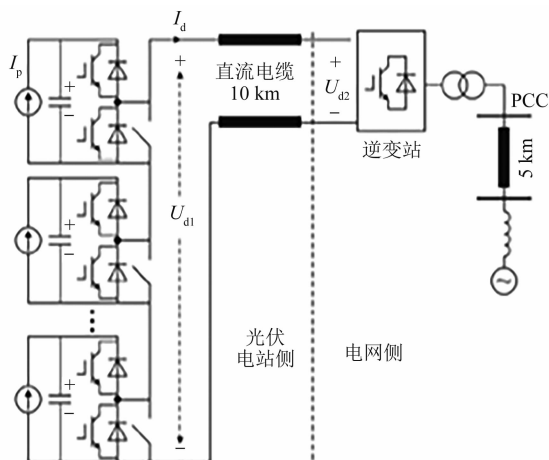


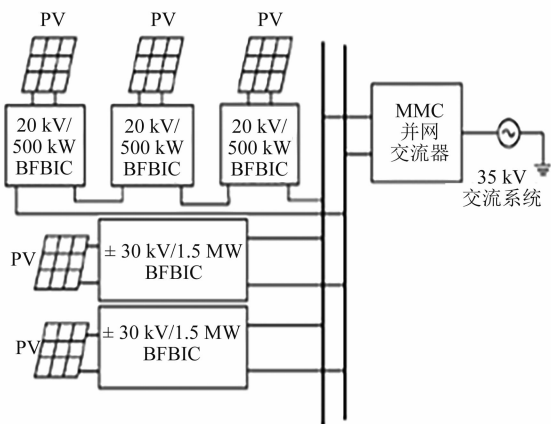
图3 光伏交流并网拓扑

光伏发电系统除经升压逆变接入交流系统外,还能以直流汇集的方式并入。由于光伏直流并网拓扑结构中的并网电压与城市轨道交通供电系统相一致,因此,可为光伏发电系统接入AC 35 kV提供借鉴。与图3中的拓扑结构相比,光伏直流并网拓扑具有损耗小、光伏利用率高的优点,典型结构如图4 a)所示^[22]。为实现模块间的电压均衡,文献[23]采用一种串并联结构(见图4 b)),光伏发电系统以集中式和集散式2种方式,汇集接入直流电网,再经电缆、MMC(模块化多电平变流器)接入35 kV交流系统。



a) 基于模块级联换流器的拓扑结构

注: PCC表示公共连接点; BFBIC表示基于boost的全桥隔离式变换器; PV表示光伏; U_{d1} 表示光伏模块级联输出直流电压; U_{d2} 表示直流输电线路末端逆变器输入直流电压; I_d 表示光伏模块级联输出直流电流; I_p 表示光伏模块输出电流。



b) 光伏经BFBIC汇集接入的拓扑结构

图4 光伏直流并网拓扑结构

3.2 直流并网拓扑结构

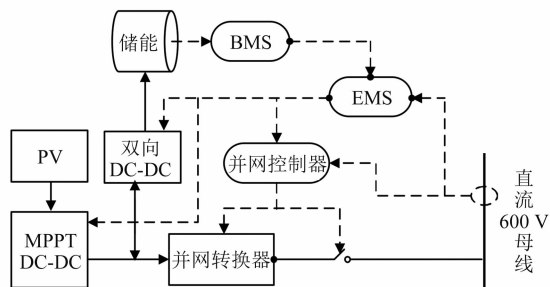
文献[24]设计了一种新型列车辅助供电系统——光伏-储能发电系统(见图5)。该系统中接入的电压等级为DC 600 V,其与有轨电车供电系统采用的DC 750 V相近,具有参考意义。

光伏-储能发电系统接入城市轨道交通直流牵引网^[25]的拓扑结构如图6所示。文献[14]在此拓扑结构上,提出基于早晚高峰的能量管理策略。

4 未来构想

目前,将光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统的研究多集中在1个牵引变电所下,对单个新能源发电系统进行控制。未来将立足于整条线路的多变电所下,将多个分布式光伏-储能接入供电系统,形成多电源环网供电结构。

城市轨道交通线路两端通常具有占地面积较大的车辆段或停车场,考虑在此接入光伏发电系统并配



注：BMS表示电池管理系统；EMS表示能量管理系统；MPPT表示最大功率点跟踪太阳能控制器。

图5 光伏-储能发电系统接入DC 600 V的拓扑结构

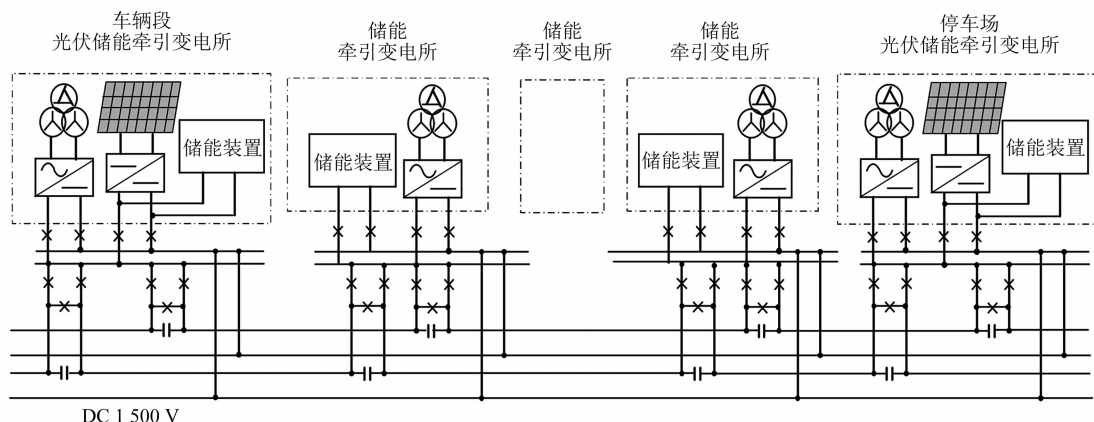


图7 光伏-储能发电系统接入城市轨道交通供电系统的拓扑结构

文献[26]以意大利那不勒斯某条实际运行的有轨电车线路为研究对象,提出在该线路上安装若干光伏发电装置为有轨电车供电,并于线路末端加装超级电容,实现对终到站再生制动能量的回收。

城市轨道交通车辆和电动汽车将成为未来城市电网的重要组成部分,为实现二者结合,文献[27]提出将直流微电网应用于城市轨道交通供电系统和电动汽车充电站,并引入新能源,以构建城市综合交通供电系统。

在能源互联网快速发展的背景下,文献[28]阐述了交通能源互联网的体系架构及关键技术,倡导构建中压直流牵引供电系统(见图8)。采用多级协调式能量管理技术^[29],通过主网级、区域级和设备级3级能量管理系统协同配合,完成整个供电系统的动态协调运行。

从1条城市轨道交通线路分布式光伏-储能发电系统到1个城市的综合交通供电系统,再到整个国家由于干线铁路与城市轨道交通构成的交通能源互联网,体现了绿色能源与轨道交通结合发展的进程。

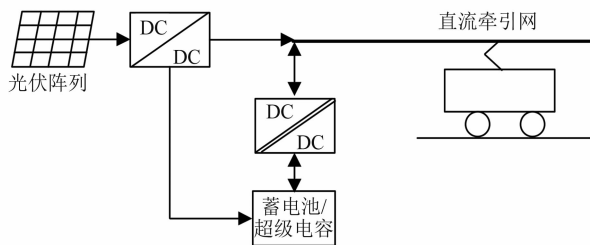


图6 光伏-储能发电系统接入城市轨道交通直流牵引网的拓扑结构

备储能装置;其余中间变电站均安装储能装置,用以吸收再生制动能量、平抑网压。其拓扑结构如图7所示。

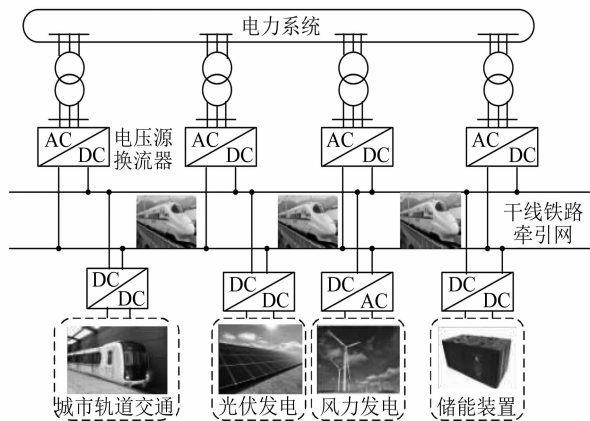


图8 中压直流牵引供电系统

当前城市轨道交通供电系统是一个高度成熟的自动化系统,但与多种形式的新能源及其他交通系统相联后存在诸多问题,如信息采集的开放性和实时性不足^[30]、系统间协同控制问题、多变换器环流问题等。若能实现技术攻关,将构想投入应用,对现有城市轨道交通供电系统的结构和运行模式将带来巨大变革。

5 结论

1) 光伏交流发电系统接入城市轨道交通供电系统将带来一系列电气问题,亟需分析光伏对供电系统所造成的影响并研究对应策略,使供电系统能良好适应。

2) 对光伏-储能发电系统进行合理布局及容量配置。研究在网压剧烈波动工况下,光伏-储能多级协调控制及能量优化管理。

3) 研究极端工况下设备临界能力,以及继电保护的临界条件与光伏并网位置、容量的关系,形成一套供电安全性与可靠性的评价体系。

4) 新能源接入后的综合供电系统关键技术包括数据挖掘处理技术、调度与规划技术、协同管理及控制技术、环流抑制技术等。

参考文献

- [1] 韩中合,祁超,刘明浩.十三五规划“节能减排”目标实现路径研究[J].干旱区资源与环境,2018(3): 23.
- [2] 邓树.光导照明在车辆段等地铁上盖的应用研究[J].科技创新与应用,2017(14): 236.
- [3] 姚霞.轨道交通站场中光伏发电最佳利用模式决策方法研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2016.
- [4] 朱贺.新能源在地铁系统中的应用与研究[J].科技创新与应用,2018(16): 169.
- [5] 韩国鹏,李明,张秋敏.太阳能光伏发电在新能源城市轨道交通车辆上应用现状研究[J].新材料产业,2018(9): 50.
- [6] 侯霄,卢衍伟,朱丽媛,等.光伏发电技术在轨道交通客车中的应用[J].城市轨道交通研究,2017(6): 138.
- [7] 何进,黄鑫.光伏发电在城市轨道交通的应用研究[J].电气应用,2018(10): 31.
- [8] 郑欣,庄毅华,许维敏.上海轨道交通分布式光伏的示范应用与发展前景[J].绿色建筑,2018(6): 17.
- [9] 阮庆军.光伏发电系统在轨道交通车辆基地的应用研究[J].电气化铁道,2016(1): 42.
- [10] 郭晓宇.光伏发电在地铁牵引供电系统中的应用研究[J].四川电力技术,2018(3): 48.
- [11] Weiying W, Mingliang W, Qi L, et al. Method for improving power quality of metro traction power supply system with PV integration[C]//IEEE. 2017 Chinese Automation Congress. Jinan; IEEE, 2017: 1682.
- [12] VISWAMBHARAN V K, KUMAR V, AMJAD K, et al. A case study—Solar powered metro in UAE[C]//IEEE. 2018 5th International Conference on Renewable Energy; Generation and Ap-

plications (ICREGA), Al Ain; IEEE, 2018: 46-51.

- [13] HAYASHIYA H, YOSHIZUMI H, SUZUKI T, et al. Necessity and possibility of smart grid technology application on railway power supply system[C]//IEEE. European Conference on Power Electronics and Applications. New York; IEEE, 2011: 1-10.
- [14] 倪卫标,沈小军,赵时旻,等.光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统模式研究[J].城市轨道交通研究,2014(11): 78.
- [15] 刘政.城市轨道交通牵引供电系统供电技术研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [16] 陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013(2): 26.
- [17] 解绍锋,方曼琪,夏国华,等.光伏接入牵引供电系统对电能质量的影响[J].电力自动化设备,2018(10): 53.
- [18] 陈维荣,王璇,李奇,等.光伏电站接入轨道交通牵引供电系统发展现状综述[J].电网技术,2019(10): 1.
- [19] 邓文丽,戴朝华,郭爱,等.光伏接入牵引供电系统谐波交互影响及其适应性分析[J].电力自动化设备,2019(4): 1.
- [20] 郭明亮,戴朝华,邓文丽,等.电气化铁路背靠背光伏发电系统控制策略[J].电网技术,2018(2): 541.
- [21] 张俊潇,李桂昌,黄毅.考虑地铁接入配电网的无功优化配置策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2017(5): 142.
- [22] 管敏渊,刘强,吴国强,等.基于模块级联拓扑的光伏智能并网系统[J].高电压技术,2015(10): 3400.
- [23] 戴志辉,朱惠君,严思齐,等.光伏电站直流汇集接入系统的建模分析[J].电力自动化设备,2018(9): 99.
- [24] WEI M, WEI W, RUONAN H, et al. Auxiliary power supply system of passenger train based on photovoltaic and energy storage[C]//IEEE. 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). New York; IEEE, 2016.
- [25] SHEN X J, ZHANG Y, CHEN S, et al. Application options for grid-connected photovoltaic generation system in URT power system[C]//IET. Renewable Power Generation. Edinburgh: IET, 2012: 1.
- [26] CICCARELLI F, DI NOIA L P, RIZZO R. Integration of photovoltaic plants and supercapacitors in tramway power systems[J]. Energies, 2018, 11(2): 410.
- [27] 孟明,陈世超,张立娜,等.城市综合交通供电系统的协调控制策略[J].高电压技术,2017(6): 331.
- [28] 胡海涛,郑政,何正友,等.交通能源互联网体系架构及关键技术[J].中国电机工程学报,2018(1): 12.
- [29] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(11): 82.
- [30] 段义隆,李红波,陈涛,等.能源路由器在城市轨道交通中的应用[J].控制与信息技术,2018(1): 57.

(收稿日期:2019-06-04)