



城市轨道交通光伏发电系统的总体设计方案 与并网模式分析

宋 昕¹, 何治新², 韩春白雪³, 郭凯永¹, 戴朝华^{3*}

(1. 北方国际合作股份有限公司, 北京 100040; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广州 510010;
3. 西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

摘 要: 城市轨道交通已逐渐成为人们日常出行的重要交通工具, 将光伏发电系统接入城市轨道交通直流牵引供电系统, 不仅可以节能降耗, 推动能源供应结构的转型, 还能促进当地太阳能资源的利用和开发。首先概述了城市轨道交通光伏发电系统的总体设计方案, 然后对光伏发电系统几种并网模式展开了讨论, 最后对其今后的应用前景及发展方向进行了分析, 以供该领域相关人员参考。

关键词: 城市轨道交通; 光伏发电; 设计方案; 并网模式

中图分类号: TK513.5

文献标志码: A

0 引言

城市大气污染等环境问题日益严重, 各地雾霾现象频发, 人们的环保意识也逐渐增强。近年来, 我国加大了对可再生能源的开发和利用, 其中太阳能作为最理想和最清洁的可再生能源受到了广泛关注^[1], 光伏发电技术在电力系统中的应用已成为目前乃至未来的重要发展趋势^[2]。随着城市化进程的加快, 城市轨道交通已在国内大、中型城市有普遍发展, 并将在未来几年内迎来建设高峰。预计到2020年, 我国将有50余座城市开通轨道交通运营, 运营线路长度超过6000 km^[3]。

在此背景下, 实现光伏发电技术与城市轨道交通的结合意义重大, 既有利于城市轨道交通系统的节能减排, 满足公众对轨道交通绿色环保的期待, 也响应了国家低碳环保的号召^[4], 同时还可促进当地可再生能源的就近消纳。另一方面, 城市轨道交通配置有大面积停车场、车辆段、地面车站及高架车站等, 具有应用光伏发电系统的广阔空间。目前广州、石家庄等城市的地铁光伏

供电项目均已投入使用且运行状况良好^[5-6]。

本文对光伏发电系统应用在城市轨道交通中的总体设计方案进行了概述, 并对光伏发电系统的几种并网模式进行了讨论。

1 总体方案概述

1.1 设计思路

光伏发电系统是指利用太阳电池的光生伏特效应, 将太阳辐射能直接转换成电能的发电系统^[7]。应用于城市轨道交通中的光伏发电系统总体设计方案的思路为: 首先, 评估当地的太阳能资源情况, 估算光伏发电系统可设计的最大容量; 然后, 进行光伏组件、逆变器的选型, 以及储能方式和容量的确定; 最后, 确定光伏发电系统的并网类型和并网点。

1) 评估当地的太阳能资源情况。分析轨道交通所在地的气象条件和地理条件, 判断是否适合安装光伏发电系统。该地区的自然地理资料包括海拔、经纬度、周围山川河流情况等^[8]; 该地区

收稿日期: 2019-09-08

通信作者: 戴朝华(1973—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力系统规划与运行优化、新能源技术方面的研究。daichaohua@swjtu.cn

的气象资料包括年均太阳辐射量、月均太阳辐射量、全年平均温度、年均降雨量、各月平均温度、各月相对湿度、各月平均风速等。

2) 估算光伏发电系统可设计的最大容量。首先对具体实施光伏发电项目的可供安装光伏组件的建筑物的屋顶面积进行测量，同时对建筑结构和电气结构进行安全复核，通过场地面积确定可安装光伏组件的最大数量；然后根据建筑环境确定光伏组件的朝向、安装倾角，以及阴影遮挡状况，并确定是否需要采取防雷措施等^[9]。综合考察光伏阵列的安装面积和安装方式，对光伏发电系统最大设计容量和发电量进行预估。

3) 进行光伏组件、逆变器的选型，以及储能方式和容量的确定。根据初始投资确定光伏组件的类型（单晶硅、多晶硅或非晶硅等）；然后根据组件型号、规格与安装方式确定光伏发电系统的标准面积，并计算组串的串联、并联数量，根据装机容量估算系统发电量；合理选择光伏逆变器型号，与光伏组件参数进行匹配等；根据光伏发电上网模式、用电负荷功率与波动特点，以及

削峰填谷和节能目标，综合考虑系统的技术经济指标，进行经济效益评估，确定储能设备的类型与容量。

4) 确定光伏发电系统的并网类型和并网点。收集光伏发电系统接入点的电气主接线资料，以及各变电所和用电负荷功率、性质、电压等级、电能质量、日常运行的用电时间等资料，进行用电需求分析。同时考虑光伏发电系统的最大设计容量，在满足上网电能质量约束的情况下，合理选用光伏发电系统的并网模式（独立型、并网型、独立/并网型光伏发电系统），从经济效益和技术指标两方面进行对比选择，从而确定光伏发电系统并网方案（并网电压等级和位置）。在设计过程中，需兼顾光伏发电系统的稳定性和高效性。

1.2 光伏发电系统的设计

城市轨道交通光伏发电系统主要由光伏组件、光伏直流防雷汇流箱、直流防雷配电柜、光伏并网逆变器、并网开关柜、数据采集器、监控系统等部分组成，如图 1 所示。

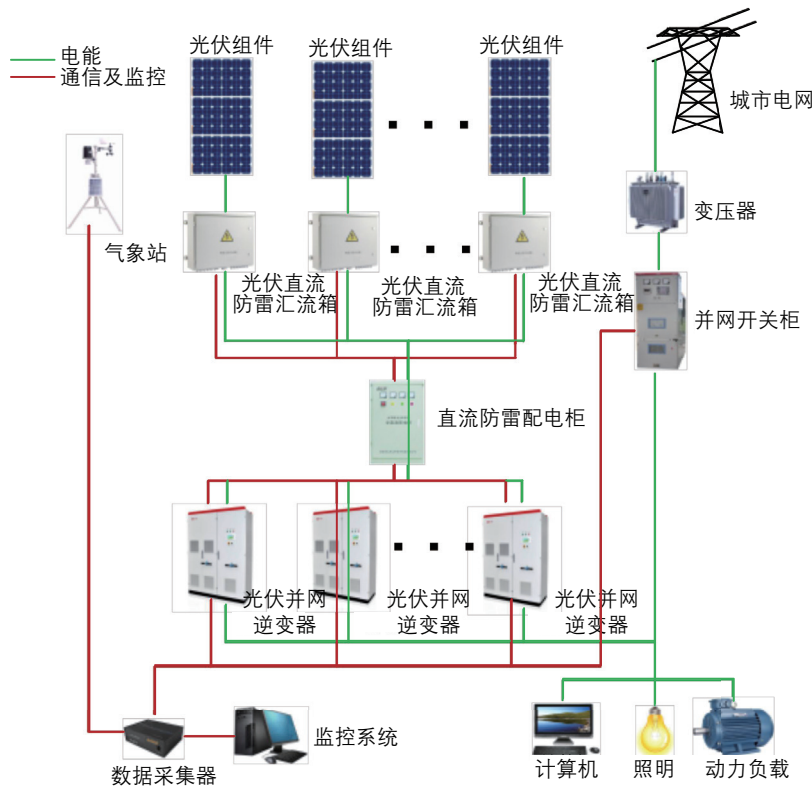
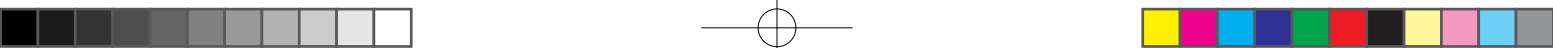


图 1 城市轨道交通光伏发电系统的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of urban rail transit PV power generation system



1.2.1 光伏组件的选择

光伏组件是光伏发电系统的核心构成部分，主要由太阳电池构成。太阳电池主要分为晶体硅太阳电池和薄膜太阳电池；晶体硅太阳电池又分为单晶硅太阳电池、多晶硅太阳电池 2 种；薄膜太阳电池主要包括硅基薄膜太阳电池、铜铟镓硒太阳电池和碲化镉太阳电池^[10]。单晶硅太阳电

池的光电转换效率高，但较高的制造成本限制了其发展；薄膜太阳电池的造价低，但其光电转换效率也较低，且缺乏成熟的研发技术，市场占有率低。相比之下，多晶硅太阳电池的光电转换效率虽然不是最高，但因其制作成本较低、技术成熟的特点得到了广泛应用。

表 1 太阳电池的性能对比

Table 1 Performance comparison of solar cells

太阳电池类型		最高光电转换效率 /%	制造成本	使用寿命	市场占有率
晶体硅太阳电池	单晶硅太阳电池	22.0	高	长	较低
	多晶硅太阳电池	18.5	较低	较长	高
薄膜太阳电池 (以碲化镉太阳电池为例)		14.0	低	短	低

1.2.2 逆变器的选择

逆变器的容量选择需考虑光伏组件与逆变器在使用过程中的容配比，这是由于光伏组件在使用过程中存在功率衰减，其功率会与安装前不同，使光伏组件的实际安装容量与逆变器的容量会存在不一致。因此，应结合具体工程情况进行综合考虑。逆变器的类型通常根据光伏电站的规模、地理位置、光照条件等，选用集中式逆变器或组串式逆变器^[11]。

总体来看，集中式逆变器的性价比高，最大功率跟踪 (MPPT) 数量较少，可调度性好，逆变器容量大但需占用一定空间，常应用于大规模地面光伏电站；组串式逆变器容量较小，具备良好的防水性能，由于具有较多的 MPPT 数量，易于安放，但同时整体成本较高，常应用于小型分布式光伏电站。集中式逆变器与组串式逆变器的对比如表 2 所示。

表 2 集中式逆变器与组串式逆变器的对比

Table 2 Comparison of centralized inverter and string inverter

逆变器类型	优点	缺点	适用场所
集中式逆变器	集成度高、成本低廉； 转换效率高、系统损耗小； 寿命长、可靠性高； 输出稳定、电能质量较高	故障维修时间长，造成的损失较大； 易产生 MPPT 的局部寻优，影响发电量； 占地面积较大	大规模地面光伏电站
组串式逆变器	MPPT 数量多，光伏发电系统工作在最大功率点的可能性更大； 结构简单、易于安装； 防水等级较高，维修便捷	运维成本较高； 双级逆变器，工作效率低； 关键设备多，可靠性较差； 电气安全性较低	小型分布式光伏电站

并网逆变器通常设置有效的孤岛保护，在逆变器检测到电网侧失压时，会退出光伏发电系统的接入，停止运行；当电网电压恢复时，逆变器将在检测到电网信号一段时间之后，再次投入运行^[12]。同时，集中式逆变器需配置隔离变压器，

在并网前进行电气隔离，从而保证其直流输入和交流输出之间没有电流流过。

1.2.3 辅助系统

光伏发电系统设备的实时运行信息，可通过数据采集器接入车站的车辆数据采集与监视

控制 (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) 系统, 且接受火灾报警系统联动。该集中式监控系统采用开放式分层分布系统结构, 由站控层、网络层和间隔层 3 部分组成。

为使光伏组件更好的采光, 其多铺设于露天的户外场所, 因此光伏发电系统采取适当的防雷措施必不可少。直击雷的防护主要是通过通过在光伏直流汇流箱、直流配电柜及逆变器输出端的交流配电柜上装设避雷针 (器) 等方式, 从而将直击雷引向避雷针放电, 并最终安全泄流入地。感应雷的防护主要是通过安装电涌保护器, 将雷电流引入大地, 或将进入电线的雷电瞬时过电压限制

在安全范围内, 使设备免受损坏。

除此之外, 光伏发电系统还应配置相应的保护装置, 包括低 (零) 电压穿越保护 (即当电网发生暂时性电压跌落时, 逆变器可不脱网连续运行)、逆变器直流侧接地保护、电网过欠压保护、电网过欠频保护、直流输入极性反接保护、直流输入过压保护、防浪涌保护, 以及过热保护等。

2 光伏发电系统并网模式

根据城市轨道交通直流牵引供电系统的结构特点, 光伏发电系统接入城市轨道交通直流牵引供电系统可能的并网模式有 4 种, 如图 2 所示。

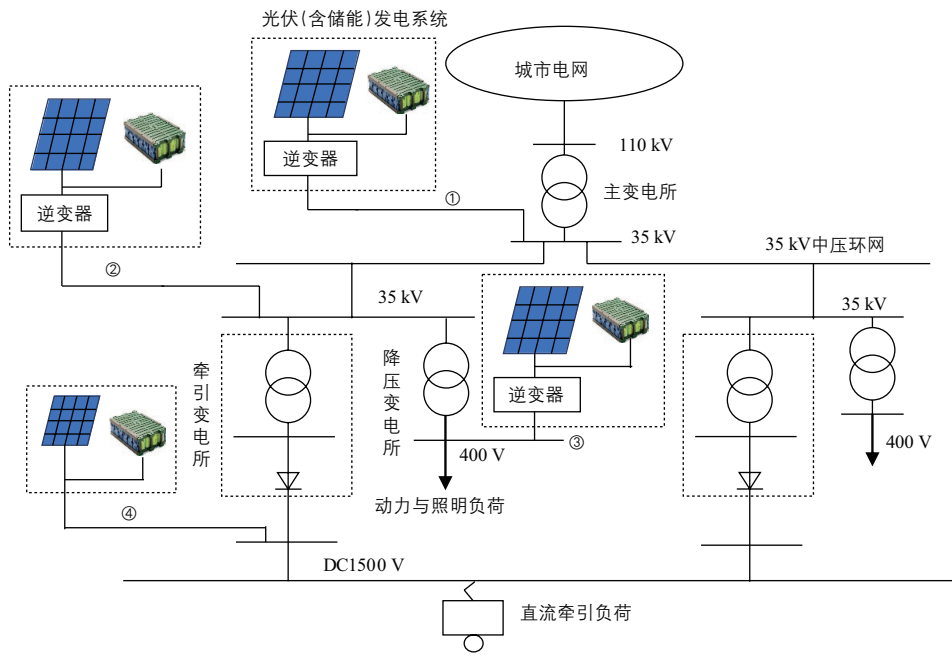


图 2 光伏发电系统接入城市轨道交通直流牵引供电系统的并网模式

Fig. 2 Grid-connected modes of PV power generation system to DC traction power supply of urban rail transit

如图 2 所示, 4 种可能的并网模式分别为:

- 1) 并网模式①: 主变电所 35 kV;
- 2) 并网模式②: 牵引变电所 + 降压变电所 35 kV;
- 3) 并网模式③: 降压变电所 400 V;
- 4) 并网模式④: 牵引变电所牵引侧 DC1500 V。

并网模式①和并网模式②均是在 35 kV 交流高压侧并网, 系统由并网逆变器、升压变压器、高压环网柜及负载侧高压并网开关柜等组成。通

过逆变系统将光伏组件输出的直流电逆变成交流电后, 经升压变压器并入 35 kV 母线。相对并网模式②而言, 并网模式①要求光伏发电系统具有更大的容量, 以满足远距离供电要求, 供电范围大, 但输电距离远, 由此带来的电压损耗和功率损耗更大。上海轨道交通川杨河车辆基地 (7.6 MW_p) 和金桥基地 (1.9 MW_p) 光伏发电项目即采用此种并网模式, 目前 2 个项目的光伏发电系统运行良好, 经济效益可观^[13]。



并网模式③是将光伏发电输出的直流电经逆变后直接接入站段的低压动力照明系统。相较于并网模式①和并网模式②的高压侧并网方式,并网模式③的低压侧并网设备简单方便,对光伏发电系统的装机容量要求较低;不需要二次设备及远程控制系统,投资更低,也具有更好的经济收益率。目前并网模式③的应用最为广泛,包括车站屋顶、地铁入口顶棚的光伏发电系统及站段的光伏路灯系统。采用该并网模式的工程应用以深圳地铁 6 号线光伏发电系统最为典型,该项目总装机容量约 2.3 MW_p 。以其中 1 座高架车站光伏发电系统为例(共 12 座车站安装了光伏发电系统),其 25 年内年均发电量可达 23.49 万 kWh,可满足车站动力照明用电的 30%^[14]。

并网模式①~③均接入城市轨道交通直流牵引供电系统交流侧,考虑到光伏发电系统的波动性和间歇性较大,建议配置一定容量的储能系统

对光伏发电系统进行“削峰填谷”,有利于能量的合理分配和利用;另一方面,由于储能系统价格昂贵,在初始成本较低的情况下也可不使用。

并网模式④是直接将光伏发电系统接入牵引侧,直流牵引负荷波动剧烈,必须与储能结合应用于城市轨道交通直流牵引供电系统的牵引网,光伏所发电能供给牵引负荷,也可通过储能或交流逆变将剩余光伏电能储存或返送回电网。并网模式④针对直流牵引供电系统,接入光伏发电系统后能提升直流牵引供电系统的电能质量,电能损失更小,同时储能装置也可吸收再生制动能量,但需结合牵引网电压波动大且早晚高峰负荷量大的运行特点,控制策略复杂,再加上对储能的研究也还需深入,因此有待工作进一步的开展。

4 种城市轨道交通光伏发电系统并网模式的比较如表 3 所示。

表 3 城市轨道交通光伏发电系统并网模式的比较

Table 3 Comparison of grid-connected modes of Urban rail transit PV power generation system

并网类型	交流并网			直流并网
并网模式	并网模式①	并网模式②	并网模式③	并网模式④
接入电压等级	AC35 kV	AC35 kV	AC400 V	DC1500 V
并网方式	逆变-升压	逆变-升压	逆变	DC-DC 升压
特点	光伏发电系统装机容量大,输电距离远,线路损耗大	与并网模式①相比,供电范围较小,线路损耗小;牵引降压混合变电所内具备交流开关柜,方便光伏发电系统接入;初始投资较高	电压等级低,适用于近距离输电;光伏发电系统结构简单,初始投资成本低	电能质量高,线路损耗小;加储能后可回收再生制动能量;控制策略复杂,技术不成熟,投资成本高
接入位置	牵引供电系统主变电所	牵引降压混合变电所	降压变电所	牵引变电所直流侧

3 应用展望

目前已有光伏发电系统接入城市轨道交通的相关工程落成,均取得了预期效益,且运行状况良好。但总体来看,这些项目的光伏装机规模不大,同时“5.31”新政实施后,光伏补贴和上网电价均有较大幅度的下调,使得原本依赖国家补贴的光伏投资企业面临新的挑战^[15]。光伏发电

接入直流供电系统具有节能效益高、损耗小等优点,在日本、阿联酋等国已经开展了相关研究和应用^[16-17];但由于列车启停频繁,牵引负荷波动较大^[18],本身存在一系列谐波问题,频率偏差、电压偏差^[19]等电气问题亟待解决。另外,储能应用技术尚不成熟,限制了光伏发电在牵引供电系统中的应用。目前国内还未有光伏发电直接接



入城市轨道交通直流侧的相关工程报道。

光伏发电系统接入城市轨道交通直流牵引供电系统后，二者之间如何相互影响尚缺乏深入的探讨和研究。未来，光伏发电系统在城市轨道交通中的应用可在以下方面展开：

1) 研究“光伏+储能”发电系统接入城市轨道交通直流牵引供电系统的协调控制策略，充分利用城市轨道交通负荷的运行特点，研究不同工况下的能量管理策略；根据光伏功率与负荷功率的实际差额，以及相关运行策略，研究储能功率、容量在整体系统中的优化配置。

2) 研究光伏发电系统接入后与城市轨道交通系统电能质量、稳定性及控制保护系统的相互影响；研究光伏发电系统整体的经济效益和环保效益，基于光伏发电系统经济性与电能质量约束进行容量优化配置。

3) 在能源互联网蓬勃发展及泛在电力物联网概念初步提出的背景下，研究城市轨道交通光伏发电系统与铁路、电动汽车等其他交通形式互连的多源互补关键技术^[20]，研究基于“泛在数据”平台的全空间、多时间尺度的系统适应性分析、多利益主体经济性分析。

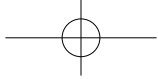
4 结论

本文概述了光伏发电系统应用在城市轨道交通时的总体设计方案，提出了常见设计思路，并对光伏发电系统进行简要介绍；针对城市轨道交通直流牵引供电系统的结构特点，归纳整理出4种光伏发电系统可能的并网模式，并对其展开了讨论；根据国内外相关研究应用，对其今后的应用前景及发展方向进行了分析，并提出有待完善的研究建议，以供该领域相关人员参考。

[参考文献]

- [1] 巩赞超, 鞠振河. 太阳能光伏发电发展及应用综述[J]. 山东工业技术, 2017(20): 61.
- [2] 谢宇翔, 张雪敏, 罗金山, 等. 新能源大规模接入下的

- 未来电力系统演化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 421 - 430, 673.
- [3] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209 - 226.
- [4] 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, 32(3): 23 - 27.
- [5] 中国最大地铁光伏电站在广州地铁鱼珠车辆段并网[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(1): 101.
- [6] 国内首个地铁光伏发电项目落地河北石家庄[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(6): 15.
- [7] 王琦, 邱威, 孙泽元, 等. 日照模拟技术在光伏能源系统设计中的应用[J]. 施工技术, 2018, 47(S3): 55 - 59.
- [8] 张拓. 我国民用建筑光伏系统电气设计的研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2014.
- [9] 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, 10(6): 17 - 20.
- [10] 本刊编辑部. 薄膜太阳能电池前景[J]. 电子工业专用设备, 2009, 38(1): 1 - 7.
- [11] 高立刚, 范宪国. 集中式与组串式逆变器方案在大型并网光伏电站中的投资成本分析[J]. 太阳能, 2015(4): 19 - 21, 40.
- [12] 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 - 44.
- [13] 胡颖. 关于轨道交通车辆基地太阳能光伏并网发电系统设计 访上海轨道交通技术研究中心技术总监王晓保[J]. 电气应用, 2014, 33(20): 6 - 8.
- [14] 周超. 地铁高架车站太阳能光伏发电系统设计[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(6): 104 - 108.
- [15] 栗阳. 光伏补贴对于光伏产业发展的影响分析[J]. 财会学习, 2019(20): 210 - 211, 213.
- [16] HAYASHIYA H, YOSHIZUMI H, SUZUKI T, et al. Necessity and possibility of smart grid technology application on railway power supply system[C]//Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 30 August-1 September, 2011, Birmingham, UK.
- [17] VISWAMBHARAN V K, KUMAR V, AMJAD K, et al. A case study—Solar powered metro in UAE[C]//2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA), February 25-28, 2018, Al Ain: 46 - 51.
- [18] 刘政. 城市轨道交通交流牵引供电系统供电技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [19] 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, 43(10): 3663 - 3670.
- [20] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5692 - 5702, 5897.



THE OVERALL DESIGN SCHEME AND GRID-CONNECTED MODE OF URBAN RAIL TRANSIT PV POWER GENERATION SYSTEM

Song Xin¹, He Zhixin², Han Chunbaixue³, Guo Kaiyong¹, Dai Chaohua³

(1. NORINCO International Cooperation Ltd., Beijing 100040, China;

2. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China;

3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Urban rail transit system has gradually become an important transportation tool of people's daily life, the urban rail transit system with PV power generation system can not only reduces energy consumption, but also promotes the transformation of urban energy supply structure. At the same time, it can promote the local solar energy resources utilization and development. In this paper, the overall design scheme of PV power generation system in urban rail transit is summarized. Several grid-connected modes of PV power generation system are discussed. Prospect and development trend are analyzed which can be used as a reference for the future.

Keywords: urban rail transit; PV power generation; design scheme; grid-connected mode