

光伏发电在城市轨道交通的应用研究

通过对光伏发电系统在城市轨道交通中的实践运用，系统地介绍了光伏发电系统的结构组成、并网方式及监控模式。以车辆基地和高架地铁站的实施方案为例，论述了光伏发电系统在城市轨道交通中运用的可行性和能效成果，以期改变城市轨道交通供能模式，提供一种新的思路。

何进 黄鑫/中铁二院华东勘察设计有限责任公司

1 概述

1.1 背景介绍

能源是国民经济和社会发展的物质基础，近几年，随着我国经济的迅速发展，煤炭和化石能源的大量消耗，不可再生能源正面临着资源枯竭和环境恶化的双重压力，因此我国在“十三五”规划纲要对节能减排提出约束性指标要求。

开发利用可再生能源是增加能源持续供给能力、改善能源结构、保障能源安全和逐步恢复自然环境的重要措施。在新型可再生能源中，太阳能以其资源丰富、没有地域界线和获取便捷等优点，成为21世纪人们关注的热点。由于光伏发电是以电能为最终形式，具有传输极其方便的特点，在通用性等方面具有煤炭和化石能源这两者无法替代的优势，因此它是各国竞相发展的重点。

而城市轨道交通作为城市发展公共交通的首选，其消耗主要为电能损耗，是城市能耗重点关注的对象之一，因此各城市轨道交通公司也在积极寻找轨道交通建设突破，以期实现轨道交通可持续发展。笔者对国内几个城市轨道交通年电能消耗情况进行了调研，如表1所示。

表1 轨道交通年电能消耗

线路名称	线路长度/kW	耗电量/万kW·h
上海9号线	19.2	7 362.83
杭州2号线	12.8	6 103
杭州5号线	48.6	23 019
杭州6号线	26.4	12 654
深圳11号线	23.4	27 263.85

1.2 光伏发电发展趋势

当今世界各国（特别是发达国家）对光伏发电十分重视，针对其制定了相应的规范和政策，增加建设投入，大力发展太阳能光伏系统。光伏发电现主要集中在日本、德国、法国和美国等发达国家，而我国光伏发电产业也在蓬勃发展。截至2012年底，世界光伏电力装机容量累计超过100 GW，2012年新增装机容量8 GW，其中我国新增装机容量为4.5 GW，位居世界第二。同时，我国是世界上最大的光伏组件生产国，占世界总量的62.6%。根据国家能源局所提供的数据可知，至2050年，中国光伏装机容量目标为100 GW，所占全国电力比例为25.71%，煤电占全国电力比例由现在的72.5%调整为31.5%，实现电力结构转型。

2 光伏发电系统组成

光伏发电系统将太阳能通过光伏组件转化为直流电力，通过将一定数量光伏组件串联组成若干个光伏组件串以满足所需的输出电压要求，然后将若干光伏组件串接入直流防雷汇流箱，汇流后的直流电通过直流配电柜接至光伏并网逆变器，并网逆变器将直流电转化为与



何进/高级工程师

关键词/Keywords

光伏发电 ·
光伏并网 ·
轨道交通 ·
车辆基地 ·
高架车站 ·

电网同步的正弦交流电汇入电网。光伏发电系统组成示意图如图1所示。

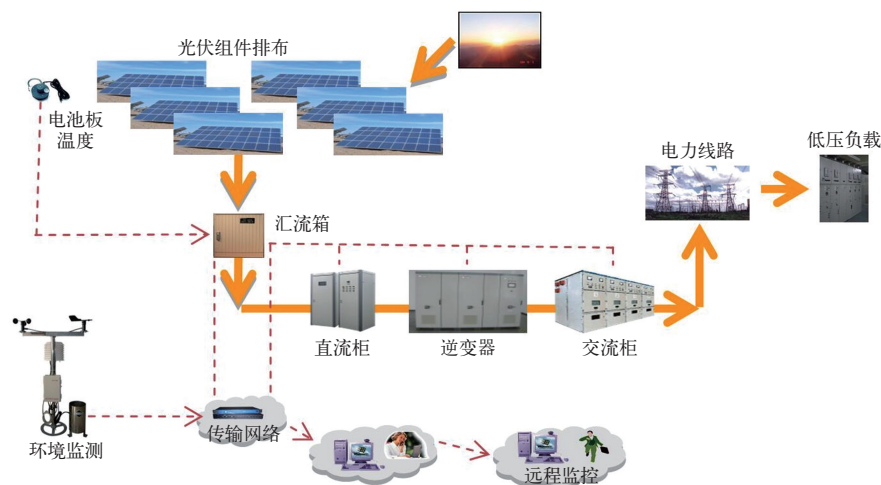


图1 光伏发电系统组成示意图

2.1 光伏发电逆变系统

光伏发电逆变系统一般由光伏组件、直流防雷汇流箱、直流防雷配电柜、交流配电柜和逆变器等组成。

(1) 直流防雷汇流箱

对于大型光伏并网发电系统，为减少太阳能电池组件与逆变器之间连接线，方便维护，提高可靠性，一般在太阳能电池组件与逆变器之间增加直流汇流装置。通过太阳能电池组件串联组成若干个太阳能电池组件串列，接入光伏阵列防雷汇流箱，通过防雷器与断路器后输出，方便后级逆变器的接入。

(2) 交、直流配电柜

直流配电柜由直流输入断路器、防反二极管和光伏防雷器等装置组成，将汇流箱输出的直流电缆接入后进行汇流，再接至并网逆变器。

交流配电柜由网侧断路器、防雷器、配置发电计量表、逆变器并网接口及交流电压电流表等装置组成，通过配电给逆变器提供并网接口。

(3) 逆变器

逆变器是将光伏组件所产生的直流电能转化为交流电能的转换装置，它使转换的交流电的电压、相位和频率等电气特性满足各种交流用电装置、设备供电及并网需求。在运行过程中，并网逆变器实时采集交流电网的电压信号，通过闭环

控制，使得逆变器的交流输出电流与电网电压的相位保持一致，所以功率因数一般能保持在1.0附近。

2.2 光伏发电并网系统

并网发电技术是当今世界光伏发电的发展趋势，并网光伏发电技术是光伏技术步入大规模发电阶段而成为电力工业组成部分的重大技术步骤。与独立运行的太阳能光伏电站相比，并网不必考虑供电负载的稳定性；光伏组件可以始终运行在最大功率点，大电网可以接纳太阳能所发的全部电能，提高了太阳能发电的效率；省略了蓄电池作为储能的环节，大大降低了光伏电站的建设和运营成本。

根据光伏并网系统构成原理的不同，同时结合城市轨道交通负载电力特性，可以将光伏并网方式分为以下两种。

(1) 低压0.4 kV侧并网

通过光伏发电逆变系统将光伏组件所发的电通过逆变器转化为与负载侧同步的正弦交流电并入低压配电系统。低压侧并网还可分为两种并网方式：一是就地负载侧并网；二是将多个光伏发电逆变系统所发的电能集中汇流后，在降压变电所低压侧并网。

系统优点：系统构成简单，设备数量少，投资低。

系统缺点：受电源电压等级影响，远距离供电时电压损失严重。

(2) 高压侧并网

系统由升压变压器、高压环网柜以及负载侧高压并网开关柜等组成。通过光伏发电逆变系统将光伏组件所发的电通过逆变器转化为与负载侧同步的正弦交流电后，经升压变压器升压并入城市轨道交通供电系统。

系统优点：满足远距离供电要求，供电范围大。

系统缺点：系统构成较为复杂，投资较高。

(3) 不同并网方式优缺点比较

通过上述对两个并网方案进行分析比较，两种方案的优缺点如表2所示。

表2 两种并网方案比较

名称 项目	低压侧并网	高压侧并网
投资规模	小	大
供电可靠性	高	高
系统构成	简单	复杂
占地面积	少	大
供电范围	小	大
适用场所	小型房屋	大型建筑

2.3 光伏发电监控系统

为方便对光伏系统设备工作状态进行实时监控，每个光伏发电子系统均配置监控装置。监控系统主要包括：监控用工业控制机、网络版监控软件和液晶显示装置。采用独立系统监测并网电站运行状况，利用工业控制机采集数据，可以24 h不间断对所有逆变器进行运行数据监测，实现发电管理、数据管理、安全管理以及远程设备管理。光伏监控系统构架示意图如图2所示。

3 在城市轨道交通的工程应用探讨

3.1 可行性分析

近年来，光伏建筑集成及并网发电得到了快速发展。建筑光伏集成具有建筑的功能，同时又用来发电，是光伏系统与建筑的完美结合，是电力工业可持续发展的理想范例，受到国际社会的重视。城市轨道交通中的车辆基地以及高架车站（地面站）有条件采用与建筑物屋面有机结合的方式设置光伏发电系统。

(1) 车辆基地

车辆基地是地铁全线铺轨工程、设备仓储、列

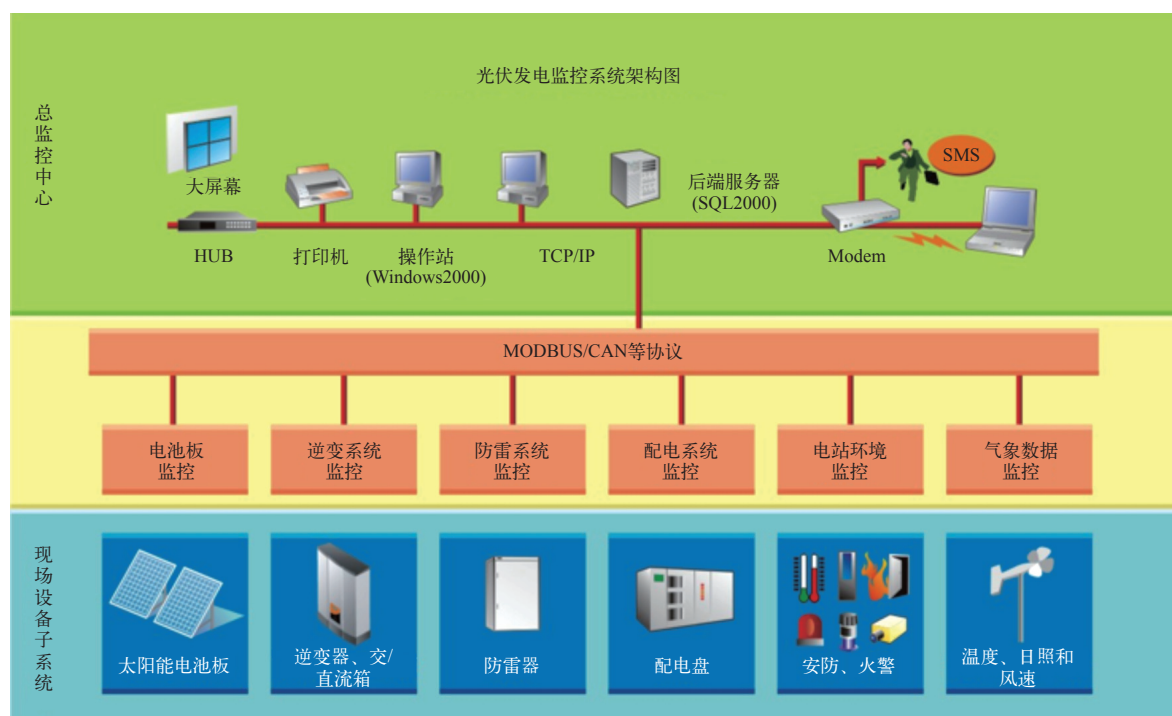


图2 光伏监控系统构架示意图

车调试和运营准备的核心,是全线车辆、土建、各系统及机电设备的维修基地,运营指挥的备用控制中心,是地铁建设项目中重要的组成部分。根据车辆基地的功能、规模大小可以分为甲、乙和丙三种车辆基地,分别为车辆段、停车场与辅助停车场。车辆段一般由厂架修段(或定修段)、综合维修中心、物资总库以及生活办公设施等组成;停车场由停车场、维修工区、物资分库(或材料分库)以及生活办公设施等组成;辅助停车场由辅助停车场、部分维修工区(必要时设置)、材料分库以及生活办公设施等组成。根据实际工程设计经验,一般运用库屋顶面积约为 $20\,000\sim 40\,000\text{ m}^2$ 、检修库屋顶面积约为 $10\,000\text{ m}^2$,综合楼、物资总库等单体屋顶面积也超过 $1\,000\text{ m}^2$,而其余单体建筑,如调机库、试车机具间公寓和工程车库等单体屋顶面积基本也不小于 400 m^2 。因此一般车辆基地都具有投资规模大、占地面积大以及建设影响大等特点。随着城市发展,城市用地越来越紧张,一般设置在城市郊区轨道交通两头,基地周围基本无遮挡物。因此,光伏组件能方便捕捉太阳光,具备将太阳能转化成电能的先天条件。

光伏系统发电量主要跟光伏组件数量、安装角度和逆变器转换效率等有关,按每 2 m^2 即可安装一块 245 W 功率的晶体硅组件来验算,仅在运用库及检修库等大型单体屋顶采用光伏发电系统,装机容量即可达到约 $3.6\sim 4.6\text{ MW}$ 。由此可以看出在车辆基地设置光伏发电系统是非常适宜的。

(2) 高架车站(地面站)

高架车站是城市轨道交通的重要节点,与地下车站相比投资成本低,实施技术难度低,有利于穿越情况复杂的地段。一般高架站沿道路路中或路侧布置,若车站周围无遮挡、空间较大,则此种高架车站较适宜设置光伏发电系统。

3.2 系统并网方式的研究

(1) 车辆基地

结合车辆基地既有设计及运营经验可知,车辆基地生产用电如运用库及检修库等大型单体用电量很大,但由于受制于城市轨道交通为便于城

市居民出行的特殊性,车辆基地内生产用电集中在 $24:00$ 地铁停运后,在白天用电量仅为一些生活用电,如空调器、水泵和食堂等,用电较少,而光伏系统发电原理仅在白天工作发电,光伏系统白天所产生的电能大大超过了车辆基地本身所需的用电。因此,将光伏所发的电能并入地铁既有供电网络,由整个供电网络消化利用。

根据上文介绍,并网方式一般有两种方式,低压并网方式由于压降损失无法满足远距离的要求,因此一般采用高压侧并网方式。结合城市轨道交通电压等级要求,一般采用 35 kV 侧并网,具体并网点可根据轨道线路实际用电量以及供电距离研究确定。

同时车辆基地还兼用地铁运营人员的生活场所,在车辆基地内会设置宿舍、食堂以及门卫等单体,一般离变电所或其他生产单体较远,用电负荷为一般生活用电,可在屋顶采用光伏系统且采用低压侧直接并网自发自用的方式。

(2) 高架车站

一般一座标准高架车站站台顶棚面积约为 $3\,100\text{ m}^2$,敷设光伏组件面积有限,车站光伏发电系统装机容量约为 230.55 kWp ,可满足车站约 30% 低压负荷的用电,仅靠光伏发电并不能完全满足本车站所有用电要求。同时结合上文介绍可知,在高架车站采用高压并网并不经济,同时考虑到每座地铁车站均为在负载中心设置一座降压变电所,而低压负荷系统一般采用放射式的配电方式,因此宜采用在降压变电所 0.4 kV 侧集中并网的方式。

3.3 案例分析

(1) 车辆基地

2012年,由上海申通集团主持建设,中铁二院、天津电化院负责设计率先在上海12号线、11号线以及16号线三条轨道交通的车辆基地内尝试采用光伏发电系统及配套设施的工程,工程情况如表3所示。

工程采用并网非逆流光伏发电系统,采用与建筑屋顶相结合的光伏建筑一体化设计方案,系统并网逆变器输出电压为三相AC 380 V , 50 Hz ,

表3 工程情况

工程名称	实施场所	单个模块 功率/W	数量/块	发电量 /MW
12号线 金桥停车场	运用库	245	7 340	1.798
11号线	北段运用库		12 800	7.58
川杨河	南段运用库		5 280	
车辆段	北段检修库		4 140	
13号线	运用库	8 720		
16号线治北停车场	检修库		2 600	0.637

根据各线路车辆基地光伏发电系统的发电量,同时结合各线路用能特点,分别采用了车站级35 kV侧并网方式,主变电所35 kV侧并网方式,以及车辆基地降压变电所低压0.4 kV侧并网方式。

系统在正常运行时,白天太阳能电池组件阵列将太阳能转换为直流电,经逆变(若为高压并网需升压)后的2回光伏发电系统电源并入变电所的两段母线,与车站既有电源并列运行,母线分段断路器分闸。此时,光伏系统设备所用电由太阳能发电系统供给;夜晚由既有供电网络对光伏系统设备(并网逆变器等)进行充电。

当并网处一回既有进线电源(检修或故障)退出运行时,母线分段断路器合闸,由另一回进线电源承担该所供电范围内的动力照明一、二级负荷;系统运行方式保持不变。而采用高压侧并网方式时,当一台升压变压器或一回光伏并网35 kV电缆发生故障时,相应35 kV并网开关柜的断路器分闸,其余回路保持原运行状态。

上海轨道交通车辆基地光伏并网项目是光伏并网发电技术在城市轨道交通项目中的首次应用,建成后年发电量877.9万kW·h,若按0.86元/kW·h的价格进行计算,约9年收回全部成本,按25年设计使用年限计算,可节约成本超过1亿元。

(2) 高架车站

深圳6号线在全线共14座满足设置条件的高架车站应用了太阳能光伏发电系统。工程采用0.4 kV侧并网方式,结合轨道交通低压供电系统采用单

母线分断的主接线方案两台变压器各带用电负荷的特点。光伏发电系统分别接入车站变电所低压侧两段母线上,通过两段母线向车站低压用电设备供电。白天车站负荷优先使用光伏发电电能,当发电量不够时,不足部分由轨道交通既有电网供电;当夜晚或阴雨天光伏系统不能发电时,车站负荷由轨道交通既有电网供电。

以一个标准高架车站为例,25年内年平均发电量可达23.49万kW·h,25年内经济效益为576.7万元。

5 结束语

在过去十几年中,光伏发电技术取得了长足的进步,并在实践中得到了检验。而光伏发电技术在城市轨道交通车辆基地以及高架车站的成功应用不仅具有良好的社会效益和经济效益,是城市轨道交通发展中的一大亮点,同时也打破了以往城市轨道交通仅能由城市电网供电的单一用能特点,丰富了轨道交通工程的供能结构。

国家能源局于2013年11月18日发布《分布式光伏发电项目管理暂行办法》,国家电网也出台多项政策性指令鼓励分布式光伏电站实行“自发自用、余电上网、就近消纳和电网调节”,以促进分布式电源加快发展。当城市轨道交通光伏发电系统在满足自有工程用电需求时,如何响应国家政策,与国家电力系统间实现余电上网,电网调节将是下阶段工程的研究课题。

参考文献

- [1] 任元会,卞铠生,等.工业与民用配电设计手册[M].3版.北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 袁晓,赵敏容,等.太阳能光伏发电并网技术的应用[J].上海电力,2006(4):342-347.
- [3] 周超.太阳能光伏发电在城市轨道交通中的应用[J].都市轨道交通,2013,26(4):77-80.

(收稿日期:2018-02-15) **EA**