

# 光伏发电在地铁牵引供电系统中的应用研究

郭晓宇

( 库尔勒铁路供电段 新疆 乌鲁木齐 841001)

**摘要:** 地铁作为城市轨道交通的重要组成部分,在乌鲁木齐市未来的城市发展道路上不可或缺,蓬勃发展的地铁建设事业必将增大城市电力供应需求,为城市供电带来巨大挑战。乌鲁木齐市太阳能资源丰富,若能将光伏发电应用于地铁牵引供电系统,可以有效减少城市供电压力,降低地铁运营成本。因此,提出将光伏电站接入地铁牵引供电系统中,由光伏发电提供部分地铁牵引电能。为验证设想的有效性,基于 MATLAB/Simulink 构建了 1 MW 光伏电站接入地铁牵引供电系统的仿真模型,通过观察光伏电站经过逆变器后的输出电能的谐波大小判断光伏电站是否满足并网条件。仿真结果表明,经过逆变器后的光伏电站输出的电能谐波满足并网要求,验证了光伏电站接入地铁牵引供电系统这一方法的可行性。

**关键词:** 光伏电站; 地铁牵引供电系统; MATLAB/Simulink

中图分类号: TM922.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)03-0048-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.03.010

## Research on Application of Photovoltaic Power Generation to Metro Traction Power Supply System

Guo Xiaoyu

( Railway Power Supply Section of Korla, Korla 841001, Xinjiang, China)

**Abstract:** As an important part of urban mass transit, the metro in Urumqi is indispensable to the future development the city, and the booming metro construction will be bound to increase the demand of urban power supply. Urumqi has abundant solar energy resources. If photovoltaic power generation can be applied to metro traction power supply system, it can effectively reduce the pressure of urban power supply as well as the operation cost of subway. Therefore, it is proposed to connect the photovoltaic power station to the metro traction power supply system. To verify the validity of this idea, based on MATLAB/Simulink, a 1 MW photovoltaic power station is constructed to be connected to the simulation model of metro traction power supply system, which judges whether photovoltaic power station meets the requirements of grid connection by analyzing the harmonic of the output power through the inverter. The simulation results in MATLAB/Simulink show that it is feasible to connect the photovoltaic power station to the metro traction power supply system.

**Key words:** photovoltaic power stations; metro traction power supply system; MATLAB/Simulink

## 0 引言

随着“一带一路”国家战略的提出,乌鲁木齐市紧紧把握难得的历史机遇,正在努力“打造丝绸之路上的综合交通枢纽”。为完成此目标,乌鲁木齐市拟规划修建线路总长为 211.9 km 的 7 条地铁线路,届时地铁必将成为城市的耗能大户,为城市供电系统带来巨大挑战。与此同时,新疆四周远离海洋,且具有“三山夹两盆”的地形特点,气候干燥,云量、

雨量少,大气透明度高且昼夜温差大,光热资源极其丰富。数据显示,其太阳能辐射总量为 1450 ~ 1720 kWh/m<sup>2</sup>,居全国第 2 位,年日照时数为 2550 ~ 3500 h,日照百分率为 60% ~ 80%<sup>[1-2]</sup>。因此,若能充分运用地铁站地面建筑优势,引入光伏电站提供牵引供电系统部分电能,就可以充分利用新疆的丰富资源,为“节约能源,绿色出行”贡献一份具有新疆特色的力量。

目前国内关于光伏电站接入地铁供电系统的研究较少,文献[3]提出了通过逆变和整流技术实现

光伏发电向 3000 V 直流牵引供电系统供电的方案。文献 [4] 介绍了德国铁路牵引供电系统中将光伏发电直接接入牵引供电系统的两种应用形式,运用单相逆变技术,可实现光伏发电在牵引供电系统沿线的任意位置接入系统。

为进一步研究光伏电站接入地铁供电系统的可行性,基于 MATLAB/Simulink 构建了 1 MW 光伏电站接入地铁牵引供电系统的仿真模型。模型中地铁负荷采用 24 脉波整流器接电阻负载形式模拟,光伏电站 MPPT 控制方法采用扰动观察法,光伏逆变器输出采用电压电流双闭环控制策略。模型通过观察光伏电站经过逆变器后的输出电能的谐波大小,判断光伏电站是否符合并入地铁供电系统要求,为光伏电站接入地铁供电系统的可行性提供仿真参考。仿真结果表明,经过逆变器后的光伏电站输出的电能谐波满足并网要求,说明了光伏电站接入地铁牵引供电系统在理论上的可行性。

### 1 地铁牵引供电系统

城市轨道交通多修建在中大型城市,用地资源紧张,因此城市轨道交通沿线所建的停车场、车辆段以及高架线路都可以作为光伏电站的架设地点,这为光伏发电系统在城轨中的应用提供了广阔的前景。地铁牵引供电系统拓扑结构如图 1 所示。牵引变电站从 110 kV 电网取电,经过变压器降压和整流,变为 DC 1500 V 供给接触网。

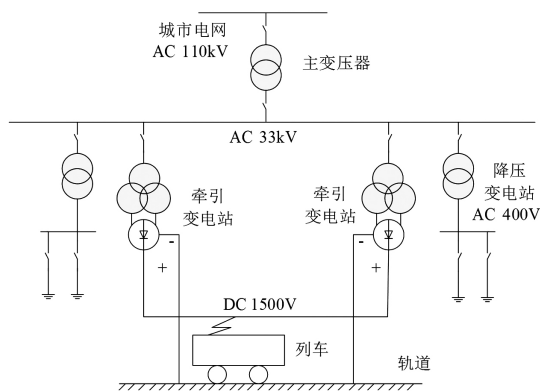


图 1 地铁牵引供电系统结构<sup>[5]</sup>

由于牵引供电系统中采用 24 脉波整流技术,故将地铁列车负载部分采用 24 脉波牵引移相整流器接电阻负载进行模拟,基本结构如图 2 所示<sup>[6]</sup>。24 脉波整流机组包括两台变压器,均为双低压输出变

压器。每台整流机组单独工作时均可输出 12 脉波的直流电,组成各自独立的 12 脉波整流系统。为了实现 24 脉波整流,在高压侧采用延边三角形移相方法,分别移相 7.5°,实现并联运行时移相 15°且输出 24 脉波。

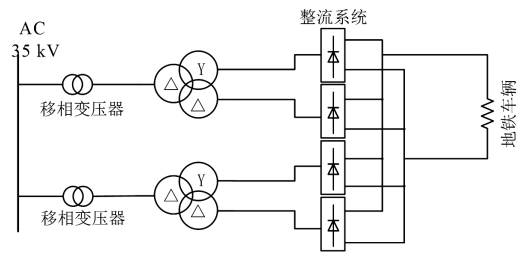


图 2 地铁负载结构

用电阻等效的地铁车辆不会产生无功功率,但由于变压器短路阻抗的存在,使系统出现无功功率。

### 2 光伏电站

#### 2.1 光伏电站 MPPT 方法

光伏电站采用扰动观察法作为最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 方法。扰动观察法的原理是扰动光伏电池的端口输出电压,在原输出电压上增加一个小干扰电压  $dU$  分量,并比较干扰周期前后光伏电池的输出功率。若输出功率  $P$  增加,则此扰动能够提高输出功率,下一次往相同方向扰动。反之,若扰动后输出功率  $P$  减小,则该扰动不利于提高输出功率,下一次往相反方向扰动,扰动观察法流程图 3 所示<sup>[7]</sup>。

#### 2.2 光伏电站逆变器控制方法

目前的光伏发电系统逆变器控制中,多采用双闭环控制其单位功率因数输出。三相光伏逆变器采用前馈解耦控制策略,控制策略由电压外环、电流内环组成,且均采用比例-积分 (PI) 调节器。PI 控制器用于控制稳态误差,即缩小输入值与参考值之间的误差。控制框图如图 4 所示。

直流电压外环的作用是稳定直流母线电压,同时可以为电流内环提供参考值  $i_d^*$ 。无功电流内环主要进行精细调节。无功电流内环是根据需向电网馈入的无功功率参考值得,当  $q$  轴电流为 0 时,即仅向电网馈送有功功率。

这种模式下光伏电站直接接入地铁牵引供电系

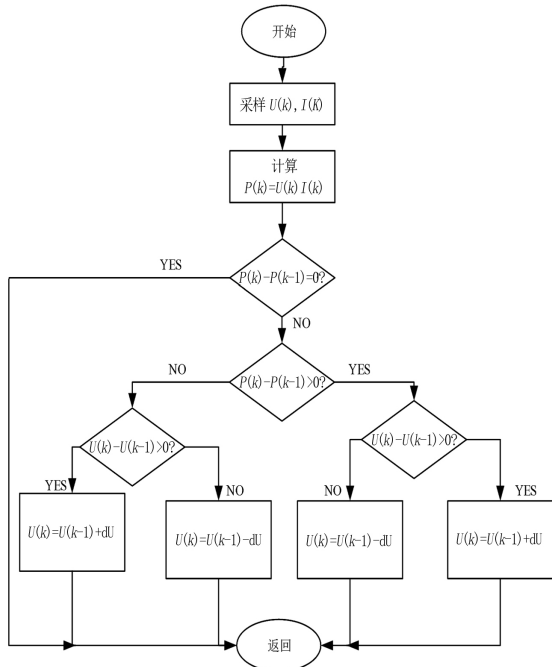


图 3 扰动观察法流程

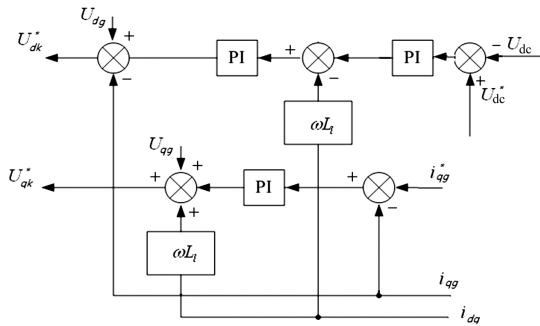


图 4 逆变器控制策略

统时, 电网侧功率因数可以表示为

$$\lambda = \frac{P_{\text{load}} - P_{\text{PV}}}{\sqrt{(P_{\text{load}} - P_{\text{PV}})^2 + Q_{\text{load}}^2}} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{load}}$  为地铁负荷的有功功率;  $Q_{\text{load}}$  为地铁负荷的无功功率;  $P_{\text{PV}}$  为光伏电站发出的有功功率。

由式(1)可知, 当光伏电站以单位功率因数运行, 即仅输出有功功率, 会影响电网侧电能质量, 降低网侧功率因数。因此需要充分利用光伏逆变器的冗余容量, 在保证有功功率输出的情况下尽可能多地进行无功补偿。

### 3 光伏电站接入地铁牵引供电系统的仿真模型

因为对于采用集中供电式的地铁牵引供电系统, 不论接入点如何选择, 光伏电站产生的电能均未

直接接入城市电网, 光伏电站电能与电网之间互不影响, 加之光伏电站产生的电能是直流电, 所以理论上通过 DC/DC 变换器升压后, 光伏电站所发出的电能可以直接接入地铁直流接触网, 直流牵引供电系统中不存在无功、负序等电能质量问题。这种光伏电站直接接入直流牵引供电网的并入方式, 具有电能质量高、谐波污染问题不突出、运行中不占用牵引变电站整流装置的容量等优点。

选择 35 kV 交流母线作为光伏的并网点, 拓扑图如图 5 所示。一般而言, 地铁负荷远大于光伏电站所产生的能量, 所以光伏电站起到了节约市电的作用。

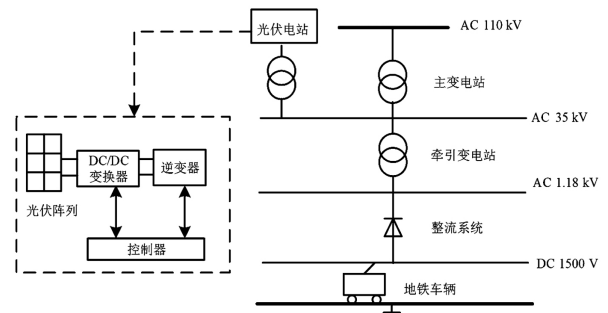


图 5 光伏电站接入地铁牵引供电系统拓扑图

### 4 仿真分析

为了验证所提方法的有效性, 基于图 5 在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型。光伏发电模块采用扰动观察法产生控制信号控制 DC/DC 变换器实现最大功率点跟踪, 逆变器采用前面所述带无功补偿功能的双闭环控制策略。仿真所用主要参数见表 1。

表 1 仿真主要参数

参数	数值
直流侧电压/V	1000
光伏电站容量/MW	1
直流侧电容/ $\mu\text{F}$	5000
滤波电感/mH	0.1
变压器变比	500 V/35 kV
逆变器容量/MVA	1.1
电压环 PI 参数	5200
电流环 PI 参数	10 100

设定地铁车辆在正常运行时需要功率为 3 MW, 设置仿真条件如下: 1 MW 光伏电站接入上述地铁牵引供电系统, 光照强度  $1000 \text{ W/s}^2$ , 温度

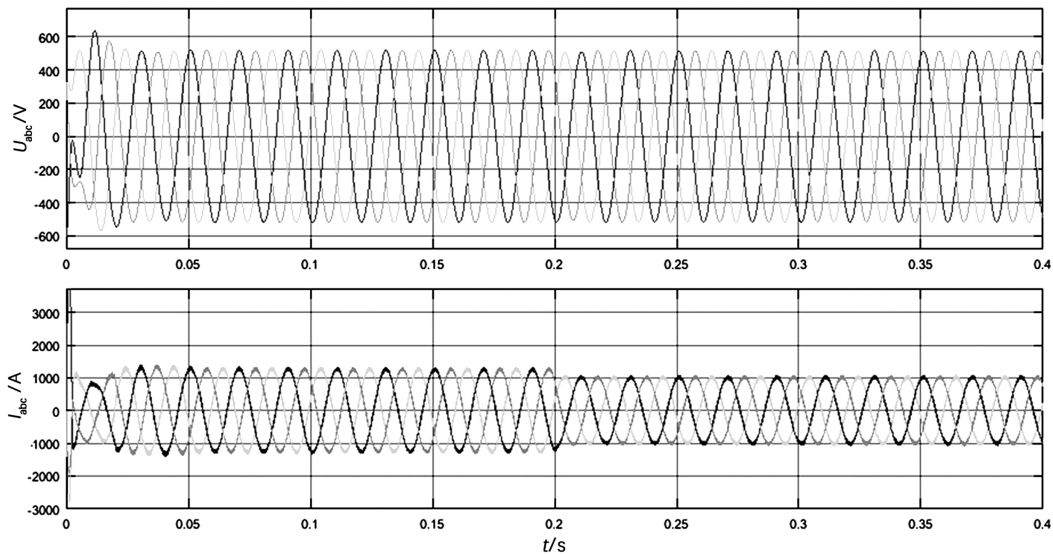


图6 光伏电站输出电压电流

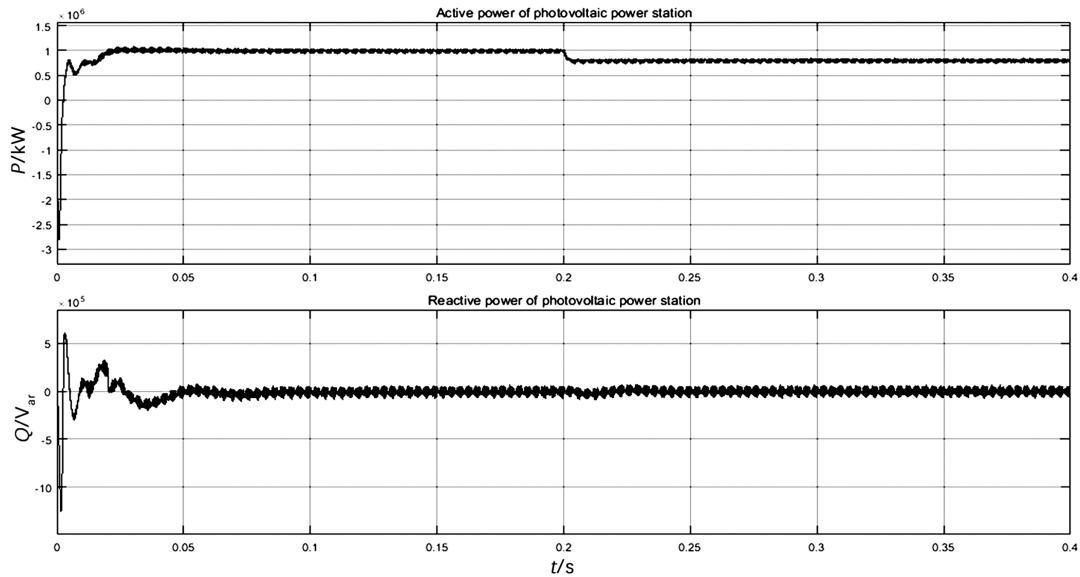


图7 光伏电站输出功率

25℃; 0.2 s时光伏电站受到的光照由  $1000 \text{ W/s}^2$  突变为  $800 \text{ W/s}^2$ , 温度不变, 仿真结果见图6、图7。

从图6、图7可以看出, 在  $0 \sim 0.2 \text{ s}$  内, 光伏电站工作在额定工作状况下, 输出有功功率为  $1 \text{ MW}$ ; 当  $0.2 \text{ s}$  光照发生突变时, 光伏电站输出有功功率下降, 电流变小, 此时经过逆变器后的光伏电站输出的电能谐波较小, 符合并网要求。

## 5 结 语

随着乌鲁木齐市轨道交通行业的迅猛发展, 城市的供电系统将会受到一定挑战, 为避免可能到来

的能源短缺问题, 同时也为了充分利用新疆地区的太阳能资源, 对光伏电站接入地铁牵引供电系统的可行性进行了一定研究。基于 MATLAB/Simulink 搭建了光伏电站接入地铁牵引供电系统的仿真模型, 将  $1 \text{ MW}$  光伏电站接入  $35 \text{ kV}$  地铁牵引供电网络, 以实现光伏电能的就近消纳。仿真结果表明, 经过逆变器后的光伏电站输出的电能谐波满足并网要求, 说明光伏电站接入地铁牵引供电系统在理论上是可行的。

若能将其应用于实际中, 将起到节能减排、获得更大经济效益的作用。目前国内外对于光伏发电系  
(下转第67页)

[D]. 济南: 山东大学, 2014.

[4] 张恒旭, 靳宗帅, 刘玉田. 轻型广域测量系统及其在中国的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 85-90.

[5] 谢潇磊, 刘亚东, 孙鹏, 等. 新型配电网线路 PMU 装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 15-20.

[6] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, et. al. Design Aspects for Wide-area Monitoring and Control Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 980-996.

[7] 许勇, 王慧铮, 李倩, 等. 智能变电站同步相量测量装置研制[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 1-5.

[8] 毕天姝, 刘灏, 杨奇逊. PMU 算法动态性能及其测试系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 62-67.

[9] 张晓莉, 周泽昕, 张道农, 等. 同步相量测量装置的测试与评估[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 31-36.

[10] 张道龙, 刘灏, 毕天姝, 等. 中外 PMU 静态标准及评估方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 140-145.

[11] 包伟, 裘愉涛, 潘武略, 等. 一种基于 IEC 61850 的

(上接第 47 页)

[8] Glenn A D, Thomas E D. Short-time Thermal Ratings for Bare Overhead Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(3): 194-199.

[9] Chen Shelly L, Black William Z. High-temperature Sag Model for Overhead Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 183-188.

[10] 徐青松, 韩芳, 王孟龙. 架空导线载流量的等效风速系数算法[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2200-2204.

[11] 马国栋. 电线电缆载流量(2版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 41-111.

[12] 配网运行规程: Q/GDW 519-2010 [S] 2010.

(上接第 51 页)

统接入地铁牵引供电系统的研究较少, 上述所建立的模型和光伏并网方法可以起到借鉴作用。

### 参考文献

[1] 何颖, 赵争鸣. 新疆光伏发电现状及发展对策[J]. 能源工程, 2004(4): 35-37.

[2] 胡仁祥, 王晓斌, 常喜强. 并网光伏发电系统对吐鲁番地区配电网影响的研究[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 27-29.

[3] MB Caracciolo, R Faranda, S Leva. Photovoltaic Applications in Railway Stations [C]. International Conference on Electricity Distribution 2007.

[4] Mayer O, Lynass M, Gómez M, et al. Design Aspects for

PMU 测试仪的研制[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 125-129.

[12] Communication Networks and Systems for Power Utility Automation: Part 7-4 Basic Communication Structure—Compatible Logical Node Classes and Data Object Classes: IEC 61850-7-4 [S] 2010.

[13] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems: IEEE Standard C37.118.1: 2011 [S], 2011.

[14] 智能变电站自动化设备检测规范 第 6 部分: 同步相量测量装置: Q/GDW 11202.6-2014 [S] 2015.

[15] 电力系统实时动态监测系统 第 2 部分: 数据传输协议: GB/T 26865.2-2011 [S] 2011.

作者简介:

何 笠(1985), 工程师、硕士, 主要研究方向为智能电网技术、继电保护及自动化、电力系统稳定与控制等;

滕予非(1984), 博士, 主要研究方向为智能电网技术、电力系统稳定与控制、高压直流输电等。

(收稿日期: 2018-01-06)

[13] 张尧, 周鑫, 牛海清, 等. 单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2081-2086.

[14] 苏瑞波, 王鹏, 康守亚, 等. 空气敷设下 10 kV 三芯电缆应急时间计算[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 78-83.

[15] 阮班义, 王金生, 汪光煌, 等. 基于热路模型的架空导线暂态载流量研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(8): 73-77.

作者简介:

张 禹(1988), 硕士、工程师, 主要从事电力设备在线监测、负荷管理和绝缘方面的研究工作。

(收稿日期: 2018-01-16)

High Voltage MW PV Systems for Railway Power Supply [C]. European PV Solar Energy Conference 2014.

[5] 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, 17(11): 78-81.

[6] Li Qiang. Analysis on the Application of Photovoltaic Power Generation Project in a Metro Section [J]. Electric Railway, 2016(4): 32-35.

[7] 张国梁, 李虹, 刘立群, 等. 基于改进扰动观察法的光伏 MPPT 研究[J]. 电源技术, 2017(1): 111-114.

作者简介:

郭晓宇(1970), 本科, 高级工程师, 主要从事铁道供电相关研究工作。

(收稿日期: 2018-01-29)