

地铁无功功率补偿优化策略

李立颖¹ 王洪杰¹ 何治新¹ 邹大云² 解 凯² 金海奇² 曾佳欣³ 张 戩³

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 211102, 南京;

3. 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 目的:为了解决因系统功率因数降低导致的无功返送问题,需研究地铁无功功率补偿优化策略,重点研究地铁牵引供电系统在集中式无功补偿背景下的 SVG(静止无功发生器)容量设计问题。方法:以广州某地铁线路为例,在该地铁线路运营初期,对某牵引降压混合所(以下简称“牵混所”)整流机组高峰时段和低谷时段的负荷过程进行实测分析。基于城市轨道交通直流牵引供电仿真平台及列车实绩运行图,通过交直流交替迭代潮流计算,将该牵混所整流机组负荷过程的仿真结果与实测结果进行对比,验证了所提算法的有效性。在满足 PCC(公共连接点)处功率因数要求的前提下,提出 SVG 无功补偿容量设计方法。综合考虑测试线路初期、近期、远期行车计划,对该线路每个时期的高峰、低谷及非运营时段进行供电仿真,并计算所需补偿的无功功率。根据无功补偿优化策略,给出 SVG 的安装容量。结果及结论:算例线路中主变电所 MSUB2 左变压器 35 kV 侧 SVG 所需补偿的无功功率最大值为 7.19 Mvar,其右变压器 35 kV 侧 SVG 所需补偿的无功功率最大值为 2.81 Mvar。考虑 10% 左右的裕度,对 SVG 进行设备选型,则 MSUB2 的左、右变压器 35 kV 侧 SVG 的安装容量分别为 8 Mvar 和 3 Mvar。该无功功率补偿优化策略适用于集中式补偿方案下地铁线路的 SVG 容量设计。

关键词 地铁; 无功功率; 补偿方案

中图分类号 U224.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.036

Optimization Strategy for Metro Reactive Power Compensation

LI Liying, WANG Hongjie, HE Zhixin, ZOU Dayun, XIE Kai, JIN Haiqi, ZENG Jiaxin, ZHANG Jian

Abstract Objective: To address the issue of reactive power backflow caused by a decrease in system power factor, it is necessary to study the optimization strategy for metro reactive power compensation. The capacity design of SVG (static var generator) in metro traction power supply system under centralized reactive power compensation is emphatically studied. Method: Taking a line of Guangzhou Metro as example, at in-

ital operation stage of the metro line, the load processes during peak and off-peak periods at a THS (traction voltage reduction hybrid substation) are field-measured and analyzed. Based on the urban rail transit DC traction power supply simulation platform and train operation diagram of an actual trajectory, the AC/DC alternating iterative power flow calculation is performed to compare the simulated and field-measured results of THS rectifier unit load process, thus validating the effectiveness of the proposed algorithm. Under the premise of meeting the power factor requirements at the PCC (point of common coupling), a design method of SVG reactive power compensation capacity is proposed. Considering the initial, near and long-term train schedules of the test line comprehensively, power supply simulation is carried out for peak, off-peak, and non-operating periods, and the required reactive power compensation is calculated. Based on its optimization strategy, the SVG installation capacity is determined. Result & Conclusion: In the case study, the maximum reactive power compensation required for the 35 kV side SVG connected to the left transformer of the main substation MSUB2 is 7.19 MVar, it is 2.81 MVar for the right transformer 35 kV side SVG. Considering a margin of approximately 10%, equipment selection is performed for SVG, and installation capacities for the left and right transformers 35 kV side SVGs are 8 MVar and 3 MVar respectively. This reactive power compensation optimization strategy is applicable for SVG capacity design of metro lines under centralized compensation scheme.

Key words metro; reactive power; compensation scheme

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

在地铁线路运营的高峰时段,列车的整流机组等装置会产生大量的感性无功功率,供电系统的功率因数可以超过 0.9,而在非高峰时段或夜间休车时段,由电缆产生的容性无功功率占比将会提高,导致系统功率因数有所降低,进而出现无功返送的现象,影响电能质量。根据《功率因数调整电费办

法》的规定,功率因数低于 0.9 的用户将会面临处罚。因此,对于地铁无功补偿的研究是非常必要的。

地铁牵引供电系统的无功补偿方案分为集中式补偿、分区集中式补偿及分布式补偿。集中式补偿常在主变电站附近安装无功补偿装置,从而对整个系统进行无功补偿。由于集中式补偿的设备投入和占地面积均较少,其投资金额在 3 种补偿方案中最小,因此本文以集中式补偿方案为例进行研究。

无功补偿装置主要包括固定电容、SVG(静止无功发生器)、磁控电抗器、逆变回馈装置和有源滤波装置等。SVG 技术具有感性容性双补偿、连续调节、谐波含量低、占地面积小和功耗低等优点,是目前主流的无功补偿技术。在地铁供电系统中,SVG 连接在主变电所 35 kV 或 33 kV 的中压母线上。

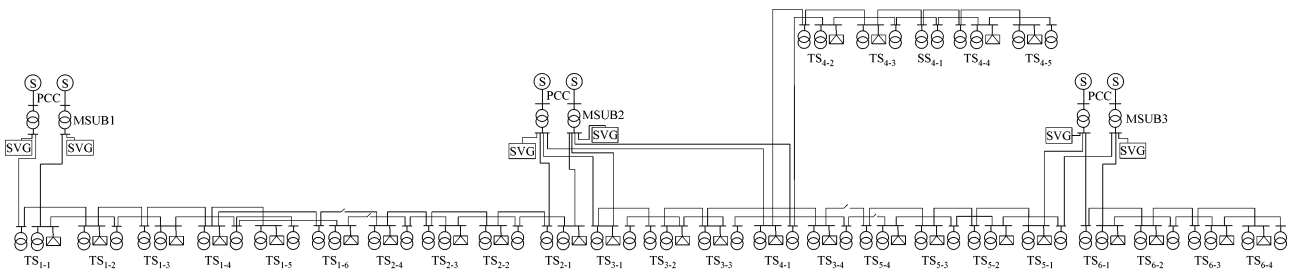
文献[1]根据主所进线处的实测数据计算了 PCC(公共连接点)处的功率因数,并评估了 SVG 安装容量。文献[2]研究了 SVG 控制策略,并通过试验加以验证。文献[3]研究了双向变流器分布式补偿策略,并计算了工程实例中无功补偿所需容量。文献[4]研究了基于逆变回馈装置的城市轨道交通无功补偿策略,利用逆变回馈装置在城市轨道交通非运营时段进行分布式无功补偿,以减少集中式无

功补偿装置的安装容量,节省系统投资成本。上述研究对地铁当前运营阶段的无功补偿定容研究较多,但并未综合考虑地铁在不同运行时段及运营时期的无功补偿容量设计。

本文以广州地铁某运营线路为例,分别对其运营初期高峰和低谷时段的某牵引降压混合变电所(以下简称“牵混所”)运行实测数据进行分析,掌握其负荷分布情况。然后,基于城市轨道交通直流牵引供电仿真平台,结合列车实际运行计划对实测数据进行还原。最后,基于该线路的近期、远期行车计划,提出无功补偿优化策略,对其中一座主变电所的 SVG 容量配置方案进行设计。本研究可为集中式补偿方案下地铁线路的 SVG 容量设计提供技术指导。

1 广州地铁负荷分布实测分析

测试线路全长 26 km,共设置 3 座主变电所,27 个牵混所,采用直流 1 500 V 架空接触网授流,钢轨回流。该线路全天采用的发车间隔为 525 s,其简化供电系统结构图如图 1 所示。其中,主变电所 MSUB2 通过牵混所 TS₄₋₁ 分别引出两条电缆对支路运营线路进行供电。



注:TS_{i,j}表示该线路中第*i*个供电分区的第*j*个牵混所;MSUB*x*表示该线路中第*x*座主变电所。

图 1 广州地铁某线路简化供电系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of simplified power supply system for a line of Guangzhou Metro

对牵混所 TS₄₋₁进行现场测试,在整流机组整流变压器 33 kV 侧安装电流传感器,在 33 kV 交流母线侧安装电压传感器,同步监测整流机组负荷过程。牵混所 TS₄₋₁监测点位置如图 2 所示。牵混所 TS₄₋₁处高峰及低谷时段的整流变压器负荷过程如图 3 所示。由图 3 可知:牵混所 TS₄₋₁高峰及低谷时段的负荷波动均具有一定的周期性;其无功负荷在低谷时段波动更为剧烈,这是因为低谷时段的感性牵引负荷较小,电缆发出的容性无功功率占比较大。

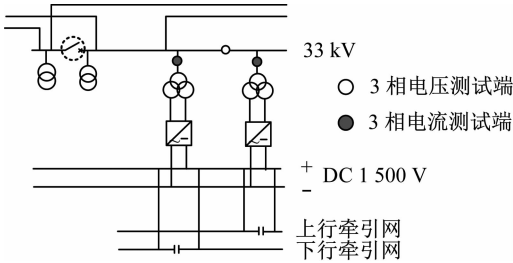
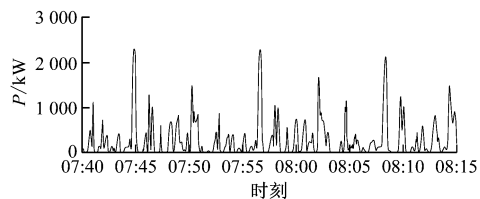
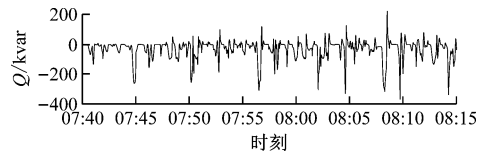


图 2 牵混所 TS₄₋₁监测点位置

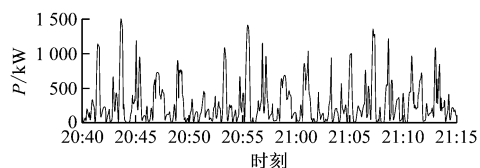
Fig. 2 Monitoring point location of THS TS₄₋₁



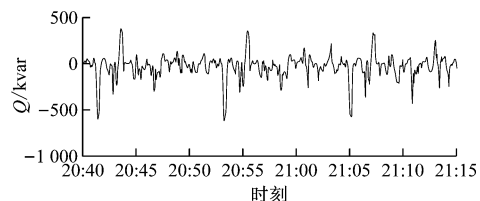
a) 高峰时段有功功率负荷过程



b) 高峰时段无功功率负荷过程



c) 低谷时段有功功率负荷过程



d) 低谷时段无功功率负荷过程

注: P 为有功功率; Q 为无功功率。

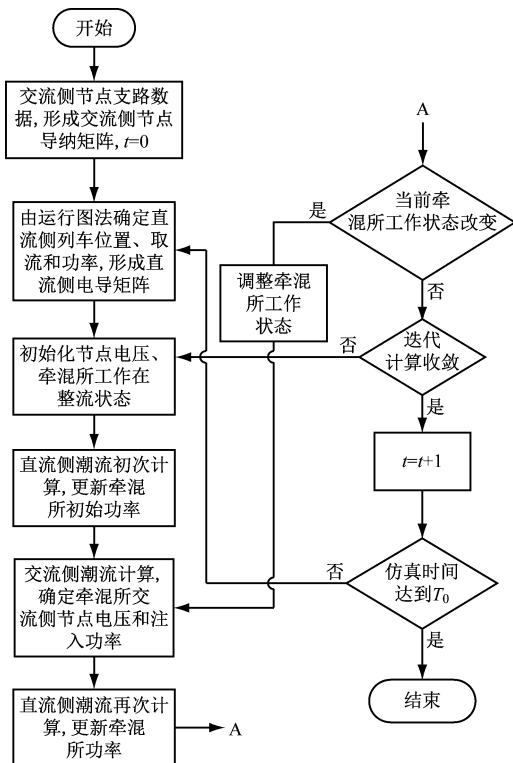
图3 牵混所 TS_{4-1} 处高峰及低谷时段实测整流变压器负荷过程

Fig. 3 Field-measured load process of THS TS_{4-1} rectifier transformer during peak and off-peak periods

2 基于交直流交替迭代方法的无功补偿仿真模型

测试线路列车为6节编组,4动2拖,B型车。列车质量为219.44 t,列车长度为100 m,最高运行速度为120 km/h。根据列车的取流特性曲线可在城市轨道交通直流牵引供电仿真平台中构建出相应的地铁列车仿真模型。

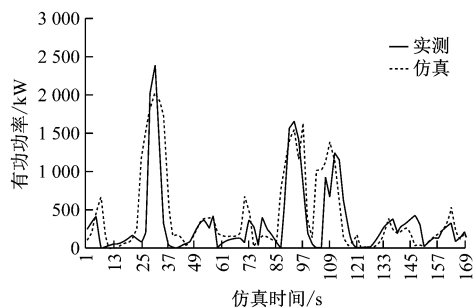
地铁交直流潮流交替迭代流程图如图4所示。若牵混所中装有逆变回馈装置,在调整牵混所工作状态时,为提高计算收敛性,可以采用基于滞环比较的牵引变电所状态确定方法^[5]。基于以上计算流程,根据该地铁线路运营初期高峰时段(07:30—08:30)及低谷时段(20:30—21:30)多列车运行图,对测试线路进行供电仿真,牵混所 TS_{4-1} 处高峰及低谷时段整流变压器仿真结果如图5所示。由图5可



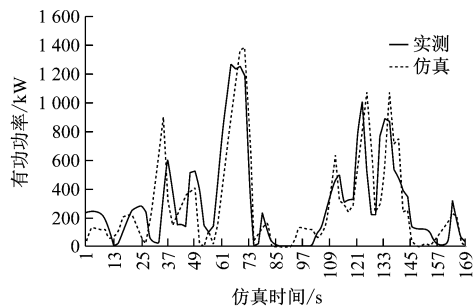
注: t 为仿真时间; T_0 为仿真时长。

图4 地铁交直流潮流交替迭代流程图

Fig. 4 Flow chart of metro AC/DC power flow alternating iterative process



a) 高峰时段



b) 低谷时段

图5 牵混所 TS_{4-1} 处高峰及低谷时段整流变压器仿真结果
Fig. 5 Simulation results of THS TS_{4-1} rectifier transformer during peak and off-peak periods

表 2 运营近期高峰和低谷时段 PCC 处的功率及功率因数估算值

Tab. 2 Power and power factor estimates at PCC during peak and off-peak periods at the operation near-term stage						
时段	P_L/kW	Q_L/kvar	λ_L	P_R/kW	Q_R/kvar	λ_R
高峰	9 800.121	-5 431.1	0.874 7	7 512.715	-2 648.0	0.943 1
低谷	6 152.490	-6 395.7	0.693 3	5 366.100	-3 447.6	0.841 3

表 3 运营远期高峰和低谷时段 PCC 处的功率及功率因数估算值

Tab. 3 Power and power factor estimates at PCC during peak and off-peak periods at the operation long-term stage						
时段	P_L/kW	Q_L/kvar	λ_L	P_R/kW	Q_R/kvar	λ_R
高峰时段	9 800.121	-5 431.1	0.874 7	7 512.715	-2 648.0	0.943 1
低谷时段	6 939.415	-6 351.0	0.737 7	5 416.898	-3 435.7	0.844 5

分别为运营初期高峰、低谷时段的 SVG 所需补偿的无功功率; Q_{rhigh} 、 Q_{rflow} 分别为运营近期高峰、低谷时段的 SVG 所需补偿的无功功率; Q_{thigh} 、 Q_{tflow} 分别为运营远期高峰、低谷时段的 SVG 所需补偿的无功功率。非运营时段 PCC 处的功率及功率因数估算值如表 5 所示。令 λ 为 0.95,通过计算可知,非运营时段,MSUB2 左、右变压器 SVG 所需补偿的无功功率分别为 7.19 Mvar 和 2.81 Mvar。

根据步骤 8,同时结合表 4 及非运营时段

MSUB2 左、右变压器 SVG 所需补偿的无功功率可知,在算例线路运营初期、近期、远期,MSUB2 的左变压器 35 kV 侧 SVG 所需补偿的无功功率最大值为 7.19 Mvar,其右变压器 35 kV 侧 SVG 所需补偿的无功功率最大值为 2.81 Mvar。考虑 10% 左右的裕度,对 SVG 进行设备选型,则 MSUB2 的左、右变压器 35 kV 侧 SVG 的安装容量分别为 8.00 Mvar 和 3.00 Mvar。

表 4 高峰、低谷时段 MSUB2 处 SVG 无功功率补偿量

Tab. 4 Reactive power compensation of SVG at MSUB2 during peak and off-peak periods						
变压器	$Q_{\text{phigh}}/\text{kvar}$	$Q_{\text{plow}}/\text{kvar}$	$Q_{\text{rhigh}}/\text{kvar}$	$Q_{\text{rflow}}/\text{kvar}$	$Q_{\text{thigh}}/\text{kvar}$	$Q_{\text{tflow}}/\text{kvar}$
左变压器	5 269.8	5 577.7	2 210.0	4 373.5	2 210.0	4 070.1
右变压器	2 340.9	2 718.7	178.7	1 683.8	178.7	1 655.3

表 5 非运营时段 PCC 处功率及功率因数估算值

Tab. 5 Power and power factor estimates at PCC during non-operating period	
参数	估算值
P_L/kW	1 491
Q_L/kvar	-767 7
λ_L	0.188 2
P_R/kW	1 321
Q_R/kvar	-324 2
λ_R	0.377 3

4 结论

1) 以广州某地铁线路为例,对某牵混所高峰时段和低谷时段的负荷分布(初期)进行实测。基于城市轨道交通直流牵引供电仿真平台,采用交直流交替迭代的潮流计算方法获得该地铁线路初期的负荷过程,并通过实测数据验证了仿真模型的准确性。

2) 进一步对该线路近期、远期的负荷过程进行仿真分析,提出无功补偿容量设计方法。综合考虑线路运营初期、近期和远期运行计划,同时根据无功功率补偿需求及 PCC 处功率因数要求,在算例线路运营初期、近期、远期,MSUB2 的左变压器 35 kV 侧 SVG 所需补偿的无功功率最大值为 7.19 Mvar,其右变压器 35 kV 侧 SVG 所需补偿的无功功率最大值为 2.81 Mvar。考虑 10% 左右的裕度,对 SVG 进行设备选型,则 MSUB2 的左、右变压器 35 kV 侧 SVG 的安装容量分别为 8.00 Mvar 和 3.00 Mvar。

参考文献

[1] 王沛沛,刘炜,廖钧,等. 城市轨道主变电所无功补偿装置容量评估[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(5):1063.
WANG Peipei, LIU Wei, LIAO Jun, et al. Capacity evaluation of reactive power compensation device in the main substation of urban rail transit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5):1063.

(下转第 208 页)

度为 22.0℃时,车内强代谢率乘客的舒适率达到最高值,此时车内舒适率为 41%。随着回风口温度的升高,强代谢率乘客的车内舒适率开始下降。②当回风口温度为 23.0~24.3℃时,弱代谢率乘客的车内舒适率较高;当回风口温度为 24.3℃时,车内弱代谢率乘客的舒适率达到最高值,此时车内舒适率为 42%。

4 结语

本文基于实车测试获得了地铁强冷和弱冷车厢的温度分布规律。强冷车厢内的温度约为 23℃,弱冷车厢内的温度约为 26℃,强冷和弱冷车厢的温度相差约为 3℃,且同一节车厢内的温度也有 2~3℃的上下浮动。通过数值模拟设定不同空调送风温度,分析地铁列车在夏季 AW2 工况下乘客的舒适率情况。模拟结果表明,强代谢率乘客在 20.7~22.0℃温度范围内的舒适率较高,在 22.0℃时的舒适率达到最高,车内舒适率为 41%。随着车内温度的升高,强代谢率乘客的舒适率开始下降。弱代谢率乘客在 23.0~24.3℃温度范围内的舒适率较高,在 24.3℃的舒适率达到最高,车内舒适率为 42%。本文针对不同新陈代谢率的乘客,分别研究了其在强冷和弱冷车厢内的舒适率情况,弥补了强冷和弱冷车厢空调温度设定经验的不足,可为强冷和弱冷车厢的空调温度设定提供借鉴与参考。

参考文献

- [1] 张倩,臧建彬,王颖,等. 地铁列车热环境实测分析与舒适度评价[J]. 制冷技术, 2016, 36(4): 52.
ZHANG Qian, ZANG Jianbin, WANG Ying, et al. Measurement analysis and comfort assessment of metro thermal environment[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2016, 36(4): 52.
- [2] 王东屏,张泽云,韩璐,等. A 型地铁空调系统及客室内流场数值分析[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(6): 22.
WANG Dongping, ZHANG Zeyun, HAN Lu, et al. Numerical simulation on air conditioning system and flow field of passenger compartment of type-A subway[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(6): 22.
- [3] 柳禹羿. 城市 B 型地铁车辆气流模拟与舒适性评价[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(7): 138.
LIU Yuyi. Airflow simulation and comfort evaluation of subway vehicle of city B-type[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(7): 138.
- [4] 莫志姣,杨易,邓峰. 车用空调风口布置 CFD 数值仿真研究[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(1): 63.
MO Zhijiao, YANG Yi, DENG Feng. Research on numerical simulation of outlet position arrangement of air-condition saloon car[J]. Building Energy & Environment, 2008, 27(1): 63.
- [5] 王芳,臧建彬,于佳,等. 高速列车客室内部流场计算流体力学数值模拟[J]. 制冷空调与电力机械, 2011, 32(1): 45.
WANG Fang, ZANG Jianbin, YU Jia, et al. Numerical simulation of inner flow for high-speed train compartment using computational fluid dynamics[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2011, 32(1): 45.

(收稿日期:2021-04-14)

(上接第 203 页)

- [2] 赵影,裴鹏鹏,杜乃成. 不平衡系统下无功补偿的策略研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(1): 30.
ZHAO Ying, PEI Pengpeng, DU Naicheng. Research of control strategy of static var generator in unbalanced system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(1): 30.
- [3] 张喜海. 利用中压能馈装置分散补偿无功的工程应用分析[J]. 电气化铁道, 2018, 29(3): 51.
ZHANG Xihai. Engineering application analysis of decentralized reactive power compensation by medium voltage energy feedback device[J]. Electric Railway, 2018, 29(3): 51.
- [4] 张戢,刘炜,谢文君,等. 基于逆变回馈装置的城市轨道交通

分布式无功补偿方案研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(8): 75.

- ZHANG Jian, LIU Wei, XIE Wenjun, et al. Research on distributed reactive power compensation scheme of urban rail based on inverter feedback device[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(8): 75.
- [5] 刘炜,张扬鑫,张戢,等. 考虑牵引所多运行状态的城轨交流供电计算[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1163.
LIU Wei, ZHANG Yangxin, ZHANG Jian, et al. Calculation of urban rail AC/DC power supply with traction substation in multi-operation modes[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(6): 1163.

(收稿日期:2021-06-29)