

市域轨道交通牵引变电所负载率低 对其经济运行的影响

曹建设

(轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//高级工程师)

摘要 对市域轨道交通开通初期两座牵引变电所的负荷进行了现场测试,分析了负载率低对牵引变电所经济运行的影响。对负载率过低的牵引变电所设置无功补偿装置,根据牵引供电仿真或实测数据,并分析牵引变电所平均无功功率后确定牵引变压器的容量。准确预测轨道交通开通初期的运量,合理确定牵引变压器安装容量,按最大需量法缴纳固定电费可大大降低运营成本。

关键词 市域轨道交通;牵引变电所;负载率;经济运行

中图分类号 U224.1:U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.018

Influence of Low Load Rate on Economic Operation of Traction Substation in Suburban Rail Transit

CAO Jianshe

Abstract Through field test of load of two traction substations in the initial stage of suburban rail transit, the impact of low load rate on the economic operation of traction substations is analyzed. Reactive power compensation device is set for traction substation with low load rate, and the capacity can be determined after analyzing the average reactive power value of traction substation according to traction power supply simulation or measured data. Accurately predicting the traffic volume at the initial stage of rail transit, reasonably determining the installation capacity of traction transformer, and paying fixed electricity charge according to the maximum demand method can greatly reduce the operation cost.

Key words suburban rail transit; traction substation; load rate; economic operation

Author's address State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), 710043, Xi'an, China

我国市域轨道交通发展迅速,对于发挥中心城市辐射带动作用及推进新型城镇化发展起到了巨大作用。但由于初期轨道交通线网还不完善,与其他交通方式的接驳情况尚不理想,部分轨道交通线

路开通初期客流量较小,行车密度远低于设计的近、远期的行车密度,导致部分线路开通初期牵引变电所负载率过低,功率因数远远达不到电力部门要求的0.9,地铁运营部门因此被电力公司罚款严重。

本文以某市域轨道交通线路的两座牵引变电所为例,以现场测试数据为基础,研究轨道交通负载率低对牵引变电所经济运行的影响。

1 某市域轨道交通牵引变电所现场测试

1.1 工程概况

某市域轨道交通线路采用单相工频27.5 kV供电制式,两座牵引变电所的牵引变压器均采用一主一备,单台运行,安装容量均为 $2 \times (20 + 20)$ MVA。为节省工程投资,1座牵引变电所解列时,按加大追踪间隔考虑,主变电所未按照完全备用考虑。同时,为降低报装容量和固定电费,牵引变压器容量按近期需要确定。该线路近、远期的设计列车对数为:近期55对/d,远期81对/d。

该轨道交通线路开通初期,牵引变电所A和牵引变电所B供电区段每天实际运行列车对数不及设计列车对数的一半。

1.2 牵引变电所现场测试分析

1.2.1 牵引变电所A测试分析

对牵引变电所A的原边电流进行了实时测量。图1显示了牵引变电所A的原边A相电流。

由图1可见,牵引变电所A的原边A相电流大部分时间接近于0。这表明该轨道交通线路开通初期列车开行对数较少,且测试期间牵引变电所A大部分时间处于空载状态。

图2为牵引变电所A的次边a相电流。由图2可见,牵引变电所A的次边a相电流值在0附近的居多,表明该线路开通初期列车开行对数过少,且

接触网供电臂长时间处于空载状态。

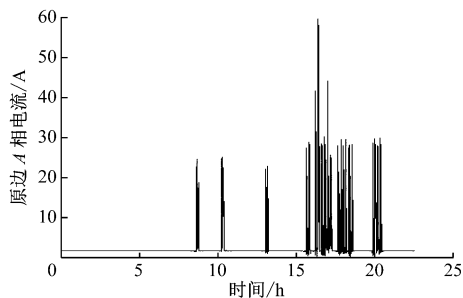


图1 牵引变电所A的原边A相电流

Fig. 1 Primary side A-phase current of traction substation A

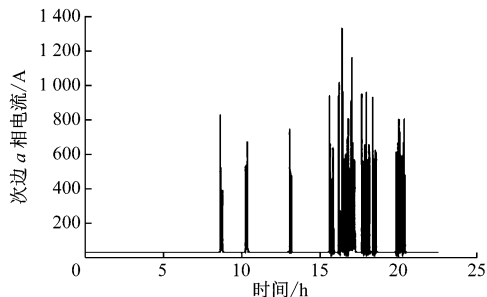


图2 牵引变电所A的次边a相绕组电流

Fig. 2 Secondary side a-phase current of traction substation A

1.2.2 牵引变电所B测试分析

对牵引变电所B的原边电流进行了实时测量。图3显示了牵引变电所B的原边A相电流。

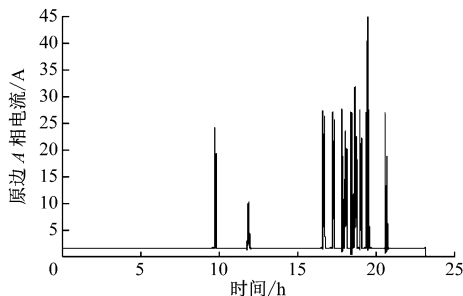


图3 牵引变电所B的原边A相电流

Fig. 3 Primary side A-phase current of traction substation B

由图3可见,牵引变电所B的原边A相电流大部分时间接近于0,这表明测试期间牵引变电所B大部分时间处于空载状态。

同理,经测试分析,牵引变电所B的次边a相绕组电流值在0附近的居多,这表明该轨道交通线路开通初期列车开行对数过少。

2 牵引变电所负载率低对经济运行的影响

负载率低对牵引变电所的影响主要体现在两个方面:一方面,由于接触网分布电容等因素,负载

率低使得牵引变电所的功率因数过低,导致电能质量不达标而被罚款严重;另一方面,牵引变压器容量利用率低,采用两部制电价计费方式时,每年需要交巨额固定电费^[1-2]。

2.1 负载率低对牵引变电所功率因数的影响

通过对牵引变电所A的两个供电臂的测试数据分析,得到牵引变电所A次边a相绕组功率因数随时间变化曲线,见图4。

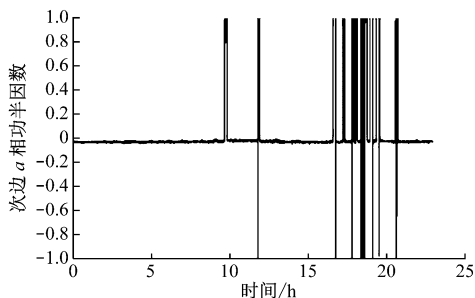


图4 牵引变电所A的次边a相功率因数随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of secondary side a-phase power factor of traction substation A changing over time

由图4可见,牵引变电所A的次边a相功率因数变化范围很大:接触网有动车组运行时,牵引变电所A的次边a相功率因数可接近于1;接触网供电臂空载时,牵引变电所A的次边a相功率因数非常低;再生制动工况下,牵引变电所A的次边a相功率因数接近-1。

经测试分析,牵引变电所A 1d内的平均功率因数为0.66,牵引变电所B 1d内的平均功率因数为0.57。这将导致电力公司对地铁运营部门罚款,从而影响轨道交通运营的经济效益。

2.2 负载率低对牵引变压器容量利用的影响

考察牵引变压器容量的利用情况,一般需要考虑过负荷系数、绕组最热点温度两个重要指标。

2.2.1 牵引变电所的负载率

基于负载率为视在功率与安装容量的比值,根据测试数据先求得视在功率,然后得到牵引变电所的负载率变化曲线。牵引变电所A的次边a相负载率变化曲线,见图5。

牵引变压器设计中一般要求其负载率不能超过3倍过负荷,并持续2 min^[3]。由图5可见,牵引变电所A的次边a相负载率较低,远未达到其3倍限值。经统计分析,牵引变电所A的次边a相空载率为95.11%,b相空载率为89.38%;牵引变电所B的次边a相空载率为93.16%,b相空载率为

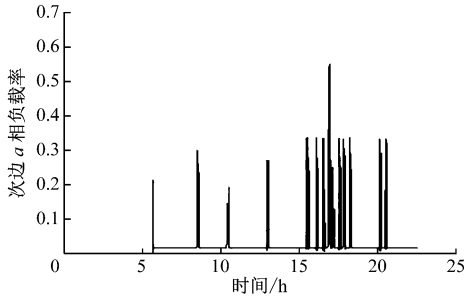


图5 牵引变电所 A 的次边 a 相负载率随时间变化曲线
Fig. 5 Curve of a -phase load rate of traction substation A changing over time

96.30%。

2.2.2 牵引变电所稳态和暂态温升计算^[4]

在负载工况下,绕组最热点温度的计算公式为:

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{or} \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + H_{gr} K^y \quad (1)$$

式中:

θ_h ——绕组最热点温度,℃;

θ_a ——环境温度,℃;

$\Delta\theta_{or}$ ——绕组顶部油温升,K;

R ——损耗比;

K ——负载系数,为负载电流与额定电流的比值;

x ——油的指数;

H_{gr} ——热点和顶部油温的差值,K;

y ——绕组指数。

顶层油的暂态温升 $\Delta\theta_{bt}$ 的计算如下:

$$\Delta\theta_{bt} = \Delta\theta_{bi} + (\Delta\theta_{bu} - \Delta\theta_{bi})(1 - e^{-t/\tau_0}) \quad (2)$$

式中:

$\Delta\theta_{bi}$ ——底层油的起始温升;

$\Delta\theta_{bu}$ ——时间 t 内所加负载的稳态底部油温升,K;

τ_0 ——油时间常数。

同样,随着负载的增加,绕组和油的温差将上升到一个新的数值。

绕组对油的暂态平均温升 $\Delta\theta_{wt}$ 计算如下:

$$\Delta\theta_{wt} = \Delta\theta_{ws} + (\Delta\theta_{wf} - \Delta\theta_{ws})(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

$$\Delta\theta_{wf} = \Delta\theta_{w0} K^y \quad (4)$$

式中:

$\Delta\theta_{ws}$ ——绕组对油的起始温升,K;

$\Delta\theta_{wf}$ ——时间 t 内所加负载的稳态绕组对油温升,K;

τ ——绕组时间常数;

$\Delta\theta_{w0}$ ——额定负载状态下,绕组对油温升,K。

2.2.3 牵引变电所 a 相绕组温升计算

牵引变电所 A 的 a 相绕组温升曲线见图 6。

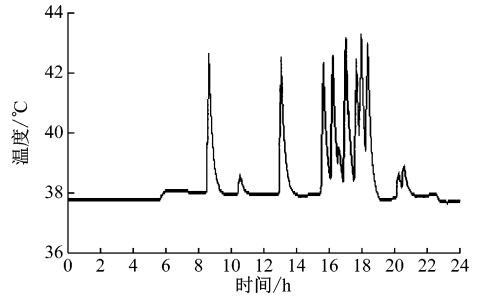


图6 牵引变电所 A 的 a 相绕组温升曲线

Fig. 6 Temperature rise curve of a -phase of traction substation A

由图 6 可见,牵引变电所 A 的 a 相绕组最热点温度低于 50℃。同理,可分析出牵引变电所 A 的 b 相绕组最热点温度 133℃,基本接近了 140℃的限值,但牵引变压器大部分时间处于空载状态。

经测试分析,牵引变电所 B 的两个供电臂绕组最热点温度分别为 82℃、45℃。由此可见,两座牵引变电所的牵引变压器容量均远未得到充分利用。

3 牵引变电所的优化设计

3.1 对负载率过低的牵引变电所设置无功补偿

目前,轨道交通普遍采用交直交型电力机车。电力机车满负荷运行时,功率因数接近于 1。因此,牵引变电所设计时一般不考虑设置无功补偿装置。例如,广佛环线城际铁路、郑登洛城际铁路、西韩城际铁路、温州市域铁路 S1 线均未设置无功补偿装置。但对于开通初期负载率过低的轨道交通项目,为避免电力公司的电能质量巨额罚款,设置无功补偿装置是非常必要的。

无功补偿的容量可根据牵引供电仿真或实测数据,分析牵引变电所平均无功功率后确定。

根据测试数据分析,牵引变电所 A 的次边 a 相绕组无功功率随时间变化曲线见图 7。

同理,可得出牵引变电所 A 的次边 b 相绕组无功功率随时间变化曲线。牵引变电所 A 全天的无功功率平均值为 91.5 kVar。同理,牵引变电所 B 全天的无功功率平均值为 110.4 kVar。

轨道交通运营初期,出于成本考虑,牵引变电所的无功补偿一般采用 TCR(晶闸管控制电抗器)+FC(固定电容器)型静止无功补偿器。随着

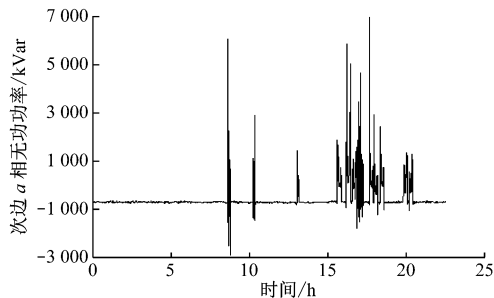


图7 牵引变电所A的次边a相绕组无功功率随时间变化曲线

Fig.7 Curve of a-phase reactive power of traction substation A changing over time

SVG(静止无功发生器)价格的大幅下降,目前城市轨道交通中 SVG 已经成为无功补偿的首选设备。其既可以快速响应供电臂列车负荷变化、解决功率因数问题,亦可降低谐波含量。

3.2 合理确定牵引变压器容量,按最大需量法缴纳电费

对于采用两部制电价计费方式的轨道交通,牵引变压器容量对其运营成本影响较大。相关专业需充分考虑轨道交通运营初期线网还不完善,以及与其他交通方式的接驳尚不理想等因素,准确预测轨道交通开通初期的运量。牵引变电所A的安装容量若由 $2 \times (20 + 20)$ MVA降低1个等级至 $2 \times (16 + 16)$ MVA,按所在省份每月的基本电价27元/kVA,则该市域轨道交通每年将节省固定电费259.2万元。

电气化铁路按照大工业用电两部制电价计费,其中固定电费和牵引变压器安装容量相关,亦取决于所在省份电气化铁路的基本电价。为适合牵引负荷波动大的特点,本文采用滑差法计算最大需量^[5]。经分析,牵引变电所A的实际最大需量为6840 kVA,牵引变电所B的实际最大需量为4500 kVA。由此可见,两座牵引变电所的实际最大需量均小于其安装容量的40%。因此,按照电力部门规定,基本电费按牵引变压器安装容量的40%计算。该市域轨道交通所在省份的基本电价,按变压器容量计费时,每月为27元/kVA;按最大需量法计费时,每月为38元/kVA。根据计算,按最大需量法缴纳基本电费,牵引变电所A和牵引变电所B每年均可节省基本电费566.4万元。

4 结论

1) 轨道交通线路开通初期,由于线网不完善,

以及与其他交通方式的接驳情况不理想等因素,部分牵引变电所负载率过低,空载率达到90%以上。

2) 负载率过低会导致牵引变电所的功率因数过低,甚至会低于0.6,轨道交通运营公司因电能质量不达标而被严重罚款。

3) 通过对两座牵引变电所牵引变压器的过负荷系数及绕组最热点温度计算分析,负载率过低条件下两座牵引变压器容量远未得到充分利用。

4) 对负载率过低的牵引变电所需设置无功补偿装置。该装置的补偿容量可根据牵引供电仿真或实测数据,分析牵引变电所的平均无功功率后确定。

5) 在准确预测轨道交通开通初期运量的基础上,合理确定牵引变压器容量,按最大需量法缴纳电费以降低运营费用。经计算,本文每座牵引变电所每年可节省基本电费566.4万元。

参考文献

- [1] 汪韩. 两部制电价下的城市轨道交通主变压器容量估算与选型方法[J]. 城市轨道交通研究,2019(11):132.
WANG Han. Capacity estimation and selection of urban rail transit main transformer under two-part power price[J]. Urban Mass Transit, 2019(11):132.
- [2] 刘俊超. 两部制和分时电价下城市轨道交通牵引供电系统的储能容量最优配置[D]. 长沙:长沙理工大学,2020.
LIU Junchao. Optimal configuration of energy storage capacity of urban rail transit traction power supply system under two-part system and time-sharing electricity price[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.
- [3] 中铁电气化局集团有限公司. 电气化铁路牵引变压器技术条件:TB/T 3159—2007[S]. 北京:中国铁道出版社,2007:11.
China Railway Electrification Bureau Group Co., Ltd. Technical specification of traction transformer for AC electrified railways: TB/T 3159—2007[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007:11.
- [4] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器 第7部分 油浸式电力变压器负载导则:GB/T 1094.7—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009:8.
National Transformer Standardization Technical Committee. Power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformers: GB/T 1094.7—2008[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2009:8.
- [5] 杨凡. 电气化铁路最大需量计费方法分析[D]. 成都:西南交通大学,2011.
YANG Fan. Study on reliability of co-phase traction power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

(收稿日期:2022-02-15)