

# 济南轨道交通 1 号线供电系统主变压器开关保护动作跳闸故障原因分析及改进措施

赵玉明<sup>1</sup> 马 磊<sup>2,3</sup>

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 250001, 济南; 2. 西南交通大学国际教育学院, 610031, 成都;  
3. 西南交通大学国际合作与交流处(港澳台办公室), 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 目的: 济南城市轨道交通供电系统是在主变电所支撑供电方式下运行的。其供电电缆较长, 电缆接地电容和主变压器漏感可能匹配谐波参数, 会放大供电系统内的背景谐波而引发谐振。因此, 需分析供电系统的谐波污染原因及改进措施。**方法:** 以济南轨道交通 1 号线供电系统主变压器开关保护动作跳闸故障为例, 对谐波谐振的原理与特性进行了阐述。**结果及结论:** 分析得到主变压器开关保护动作跳闸故障的改进措施有差动保护技术、加强变压器控制、加强设备巡视等。

**关键词** 城市轨道交通; 供电系统; 谐波谐振; 诱发原因; 治理措施

**中图分类号** U231+.8

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.07.041

## Causes for Switch Protection Action Tripping Fault of Jinan Rail Transit Line 1 Power Supply System Main Transformer and Improvement Measures

ZHAO Yuming, MA Lei

**Abstract** Objective: Jinan urban rail transit power supply system operates by main substation power supply. The power cables in the system are relatively long, cable grounding capacitance and main transformer leakage inductance may match harmonic parameters, and amplify background harmonics within the power supply system and cause resonance. Therefore, it is necessary to analyze the causes of harmonic pollution in the power supply system and propose improvement measures. **Method:** Taking the case of main transformer switch protection action tripping fault in Jinan Metro Line 1 power supply system, the principles and characteristics of harmonic resonance are expounded. **Result & Conclusion:** The improvement measures obtained from analyzing the main transformer switch protection action tripping fault include differential protection technology, transformer control reinforcement, and equipment inspection enhancement.

**Key words** urban rail transit; power supply system; harmonic resonance; causal factors; treatment measures

**First-author's address** Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., 250001, Ji'nan, China

城市轨道交通具有与其他交通方式不同的特征和优点, 是我国城市交通网络的重要组成部分。电力供应系统是城市轨道交通的一个主要系统, 其作用是通过减压整流将高压交流电转换为低压直流电, 从而为列车提供牵引能量<sup>[1]</sup>。随着我国城市轨道交通事业的迅速发展, 为人们日常生活带来极大便利的同时, 也带来了电力系统的谐波污染。基于此, 本文以济南轨道交通 1 号线供电系统调试期间发生的一起谐波谐振事故为例, 深入剖析城市轨道交通供电系统谐波谐振产生的原因, 并提出有效的改进措施。

## 1 事故概况

2018 年 5 月 10 日, 济南轨道交通 1 号线运行过程中, 列车的动车变压器一次侧绕组电感与变电站馈线接地等效电容产生并联谐振, 引起谐振过电压, 使主变压器产生异响。35 kV 母线支撑绝缘子有明显放电烧痕, 导致开关保护动作短路, 最终导致交通中断。事故当天, 由于变电站一段 35 kV 线路进气柜带电显示设备发生故障, 需要维修, 采取了一系列的开关动作。倒闸操作及事故记录如表 1 所示。

## 2 事故原因分析

### 2.1 事故前后的电压波形

事故分为上午和下午 2 个阶段。上午 10:39 至 10:50, 接地变压器与主变之间发生异响。其中, 2 个工位之间发生差动保护跳闸。保护装置记录跳

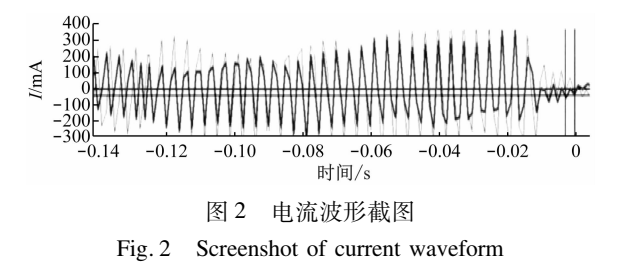
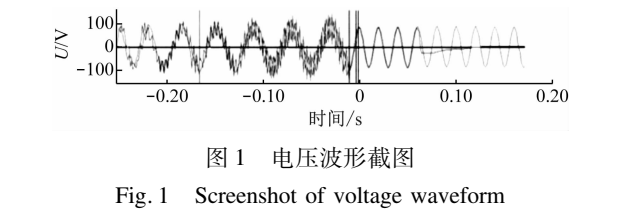
闸前故障电压  $U$  和电流  $I$  波形,分别如图 1 和图 2 所示。

表 1    2018 年 5 月 10 日倒闸操作及事故记录

Tab.1    Switchover operation and accident record of  
May 10, 2018

序号	时刻	开关动作	现象描述
1	10:02:22	闭合 300 开关	短时环供
2	10:03:24	断开 301 开关	31D 开关联动跳开
3	10:39:18	断开 32D 开关	接地变发生异响, 主变异响
4	10:50:05	站区之间 I 段差动 保护动作	
5	10:55:22	①闭合 301 开关, 断开 302; ②断开 101 开关, 闭合 31D 开关	切除主变 主变投运
6	15:41:40	SVG 同时跳闸	SVG 过电压 保护动作

注:SVG—静止型无功发生器。



事故发生当天的上午 07:38,主变电站 SVG(电力电子设备)采集到主变电站 35 kV 母线的电压波形如图 3 所示。电压波形谐波分析如图 4 所示。

当日下午 15:41 左右,SVG 采集得到的电压波形和谐波如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可知,SVG 跳闸前,主变电站 35 kV 母线电压波形失真严重。

根据上述保护装置和 SVG 采集波形分析可知,事故当天系统中始终存在 11 次谐波放大。谐波源可能来自整流器或列车上的电力电子元件。谐波频率与基频有关。在分频共振基础上叠加的谐波数仍为 11,这与 SVG 在同一时段获得的主母线电压谐波数一致。虽然上午系统通过开关变压器继

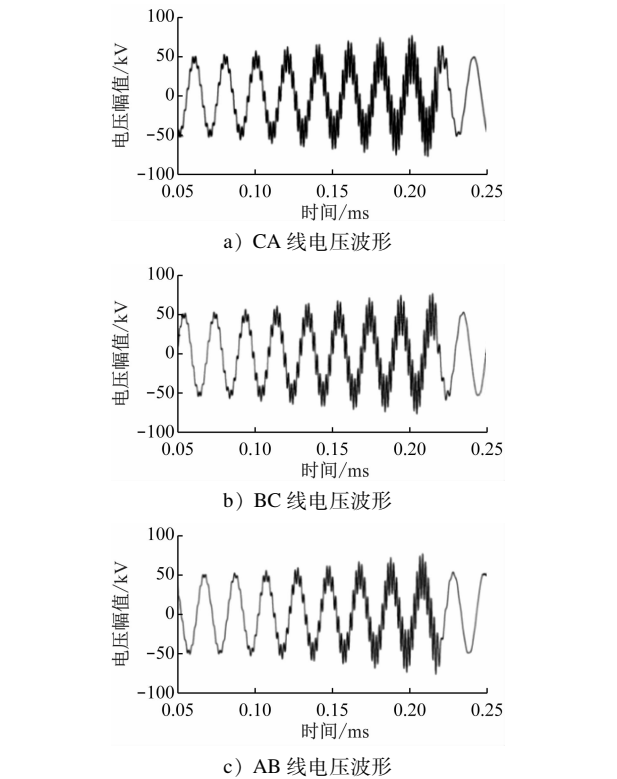


图 3    2018 年 5 月 10 日 07:38 SVG 采集主变电站 35 kV 母线电压波形

Fig.3    2018-05-10 07:38 SVG collecting main substation 35 kV bus voltage waveform

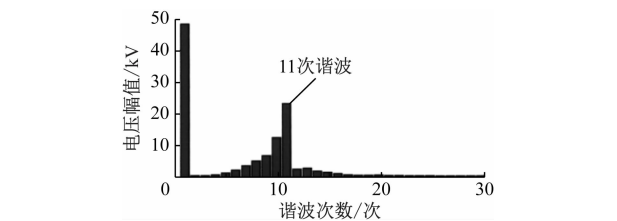


图 4    2018 年 5 月 10 日 07:38 主变电站 35 kV 母线电压谐波分析

Fig.4    2018-05-10 7:38 main substation 35 kV bus voltage harmonic wave analysis

续运行,但下午 SVG 跳闸前采集的主母线电压波形显示,系统中仍有 11 次谐波放大。

## 2.2 差动保护及 SVG 跳闸

根据差动原理,当线路两端电流满足起动条件且同相时,差动保护起作用。启动条件包括(关闭)突然量启动和稳态启动。其中,突变阈值为当前采样值与两个周期预采样值之差(40 ms)。差动保护设计的工作频率范围为 45 ~ 55 Hz。

从图 2 中差动保护记录的故障电流波形可以看出,在跳闸发生前约 127 ms,差动保护装置的相位由倒相变为同相,满足差动保护装置运行的条件。

当电流差满足起动条件时,保护出水口使断路器跳闸。由图 5 可知,当日下午 15:41 的主变电站 35 kV 母线电压出现 11 次严重谐波,产生谐振过电压。当过电压超过设定值时,SVG 跳闸。

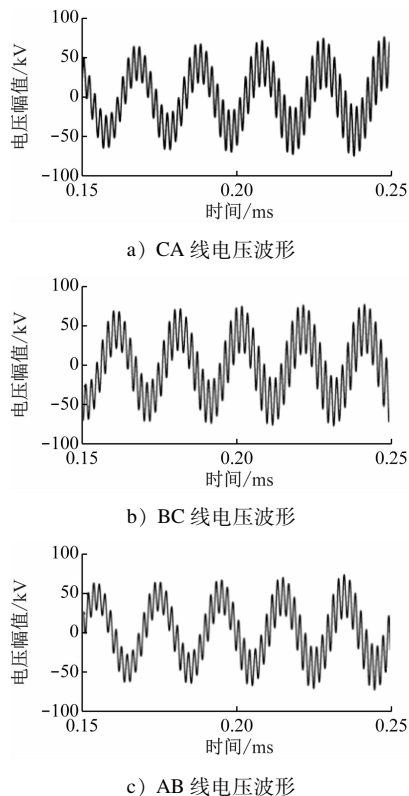


图 5 2018 年 5 月 10 日 15:41 SVG 采集主变电站 35 kV 母线电压波形

Fig. 5 2018-05-10 15:41 SVG collecting main substation 35 kV bus voltage waveform

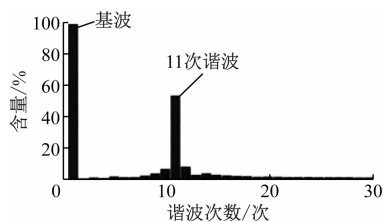


图 6 2018 年 5 月 10 日 15:41 主变电站 35 kV 母线电压谐波分析

Fig. 6 2018-05-10 15:41 main substation 35 kV bus voltage harmonic wave analysis

## 2.3 原因分析

110 kV 2<sup>#</sup>变电站的 PCS-9671DT 型主变(容量 16 MVA)差动保护装置比率差动 A、B 相动作,跳开主变高低压侧,同时接地变保护 PCS-9611DT 整组启动。后查明,是二母 PT(电压互感器)一次侧 C

相接地故障。

综合实际情况来看,济南轨道交通 1 号线供电系统主变压器开关保护动作跳闸故障的原因包括:①差动保护电流互感器出现短路或开路,或差动保护的二次侧线路发生故障;②主变压器的内部故障,主要变压器和引出线路的短路;③供电系统所连接的相应电流互感器在操作过程中出现故障;④电力供应系统的绝缘部件失效;⑤出线电流互感器的绝缘部位发生开路等故障;⑥在变压器工作过程中,由于励磁涌流的出现,造成了保护的误动作。

## 3 主变压器开关保护动作跳闸故障改进措施

### 3.1 改进措施

#### 3.1.1 差动保护技术

采用二次谐波制动的差动保护技术。它采用基尔霍夫电流理论,在变压器正常运行或区外故障时,将其视为一个理想的变压器,使输入的电流与输出电流(换算后的电流)相等,而差动继电器不工作;在变压器内部发生故障时,则由两侧(或三侧)将短路电流供给到故障部位,差动保护感应到的二次电流之和与故障点电流成比例,并使其工作。但是,在电网运行时,由于励磁涌流及其他原因所引起的高阶谐波,往往会造成变压器的进、出电流不相等,从而造成差动保护的误动作,故应增设二次谐波制动。在系统谐波成分较大的情况下,不会出现误动作。

#### 3.1.2 加强变压器控制

在变压器的差动保护中,应考虑 CT(电流互感器)断线因素。若不考虑 CT 断路,将产生差动保护的误操作,故差动保护必须更为全面且充分地考虑 CT 断线的影响因素。同时必须增加 CT 断线闭锁的能力,在出现断线时,采用闭锁比率差动保护来解决问题。

#### 3.1.3 加强设备巡视

变压器正常运行中的检查项目包括:变压器声音是否正常;变压器温度是否正常;变压器各部无渗油、漏油现象;油枕和充油套管的油色均为透明,且油位高度不超过标准线;套管、瓷瓶应保持清洁,且无损伤、裂纹和放电现象;各部接头无过热变色现象,电缆头无漏油;防爆隔膜完好无损,外壳铁心接地应牢固;瓦斯继电器内充满油,无气体;变压器

(下转第 228 页)

表 4 成都地铁线网车辆专业深度维修技术成果统计  
(2018—2021 年)

Tab. 4 Deep maintenance technology achievement statistics  
of vehicle discipline for Chengdu Metro line net-  
work (2018—2021)

年份	工艺文件 数/个	QC(质量控制) 课程数/个	发表论文 数/篇	申请国家 专利数/个
2018	1	1	0	1
2019	4	3	2	3
2020	5	4	4	4
2021	8	8	4	4
合计	18	16	10	12

4 结语

车辆设备的深度维修,在一定程度上解决了地铁车辆检修所面临的各类问题,提高了车辆专业维修的自主性。未来如何将深度维修作用延续并放大,仍是成都地铁人需要攻克的难题。

1) 扩大深度维修的范围与深度,逐步开展对牵引、制动及辅助供电等正线运营影响较大的车辆子系统的原理研究,重点对牵引制动系统控制板卡、空调控制器、门控器,以及制动气路的各类阀体等等控制系统/设备进行研究。

(上接第 222 页)

吸湿器内干燥剂颜色正常,呼吸器及导管无堵塞;气温突然变化时,应检查变压器的油位、油温无异常变化。

当发现变压器出现异常时,及时采取措施。

4 结语

随着我国城市轨道交通行业的飞速发展,在为市民提供便捷的公交服务的同时,也给城市带来了供电系统的谐波污染。城市轨道交通在运行过程中,其供电系统极易产生谐振现象,影响其正常工作,因此,根据谐波谐振的发生原理和特性,探讨谐波抑制措施对保证城市轨道交通的安全、稳定运行具有重要意义。

参考文献

[1] 陶琨. 城市轨道交通牵引供电系统的继电保护配置[J]. 中国

2) 利用深度维修已掌握的设备原理和设备状态,对既有修程修制进行优化,使车辆设备“检、养、修”制度更加合理,维修成本更优。

3) 加强源头治理,将深度维修掌握的技术反哺到车辆架大修及新车设计制造中,从源头上提升车辆设备的可靠性和稳定性。

4) 基于深度维修对 PIDS 等系统原理及功能的掌握程度,结合设备全寿命周期管理,在设备寿命到期前研究车辆设备系统的升级改造方案,让既有列车设备系统的改造更具有针对性,找到更优的技术解决方案。

参考文献

[1] 饶咏,张耘. 城市轨道交通大规模线网运营环境下物资精准采购体系[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12):189.  
RAO Yong, ZHANG Yun. Material precise procurement system in urban rail transit large-scale network operational environment[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12):189.  
[2] 潘文海. 广州地铁 3 号线列车车门控制器离线检测装置的设计与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(3):127.  
PAN Wenhai. Design and application of off-line detection device for train door controller of Guangzhou Metro Line 3[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(3):127.

(收稿日期:2022-06-21)

科技投资, 2020(15):306.  
TAO Kun. Relay protection configuration of traction power supply system in urban rail transit[J]. China Venture Capital, 2020(15):306.  
[2] 马九洋,李天石. 城市轨道交通钢轨对地过渡电阻的检测分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(8):86.  
MA Jiuyang, LI Tianshi. Inspection analysis of transitional resistance of rail to track in urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(8):86.  
[3] 朱瑛. 配电网无功补偿及谐波治理技术研究及应用[J]. 科技风, 2020(12):196.  
ZHU Ying. Research and application of reactive power compensation and harmonic control technology in distribution networks[J]. Technology Wind, 2020(12):196.

(收稿日期:2023-01-12)