

基于 GO 法的广州某地铁同相牵引供电系统可靠性分析

赵云云¹ 李海燕² 靳守杰³ 马坚生³

(1. 广州地铁设计院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都;

3. 广州地铁集团有限公司, 510330, 广州 // 第一作者, 高级工程师)

摘要 以广州某地铁线路采用的交流供电制式技术为例, 采用 GO 法(一种以成功为导向的系统概率分析方法)对比分析了该线路同相牵引供电方案和传统牵引供电方案的系统可靠性。结果表明, 同相牵引供电方案的系统可靠性优于传统牵引供电方案。

关键词 地铁; 同相牵引供电系统; 可靠性分析; GO 法

中图分类号 U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.06.036

Reliability Analysis of Cophase Traction Power Supply System of Guangzhou Metro Based on GO Method

ZHAO Yunyun, LI Haiyan, JIN Shoujie, MA Jian-sheng

Abstract Taking a line of Guangzhou Metro that adopts AC power supply format technology as an example, GO method (a success-oriented system probability analysis method) is used to compare and analyze the system reliability of the cophase traction power supply scheme and conventional traction power supply scheme. The analysis results show that the system reliability of the cophase traction power supply scheme is better than that of the conventional one.

Key words metro; cophase traction power supply system; reliability analysis; GO method

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

针对城市轨道交通普遍采用的直流供电系统存在杂散电流的问题^[1], 采用传统铁路的交流供电系统即可解决, 但是存在过分相时影响列车速度和负序电流等电能质量问题^[2], 该问题可通过同相牵引供电技术解决^[3-4]。因此, 城市轨道交通可以采用无电分相的同相交流供电系统。

广州某地铁线路是国内城市轨道交通领域采用同相牵引供电技术的第一条线路, 由于该线路为客运线, 因此, 对供电系统可靠性的要求更高。本

文将运用 GO 法(一种以成功为导向的系统概率分析方法), 结合理论与实际线路运营数据, 评估同相牵引供电系统的可靠性。

1 GO 法的基本原理与特点

GO 法通过将系统图或工程图翻译成 GO 图来进行计算, 从而获得系统的最终概率^[5]。与其他几种常用的可靠性分析方法相比, GO 法中的 GO 模型与系统实际元器件一一对应, 具有结构简洁、思路清晰、算法简单、对系统复杂度不敏感等优点, 更加适用于复杂可维修系统的可靠性研究^[6]。

城市轨道交通牵引供电系统是典型的复杂可维修系统, 因此, 本文选择 GO 法进行城市轨道交通同相牵引供电系统的可靠性评估。

2 广州某地铁线路概况

广州某地铁线路的原牵引供电系统设计方案示意如图 1 所示。全线共设置 4 个传统牵引变电所(SS), 相邻牵引变电所之间设置 1 个分区所(SP), 采用交流供电系统。这种设计方案存在过分相影响列车速度与安全的问题。

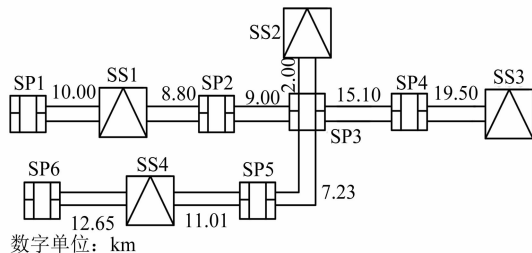
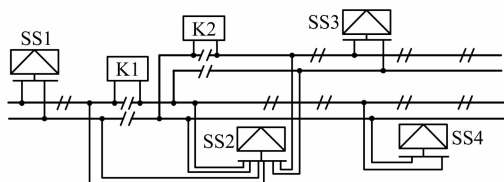


图 1 广州某地铁线路原牵引供电系统示意图

在调研国内外交流牵引供电系统应用的基础上, 结合城市轨道交通线路运行的特殊性要求, 以及综合考虑技术指标和经济指标, 采用如图 2 所示无电分相的同相牵引供电系统新方案^[7]。全线设

置4个SS,采用交流供电系统。牵引变电所采用组合式同相牵引供电,分区所采用新型双边供电,彻底取消电分相,采用电力电子过分相技术,降低电分相对列车运行的影响。牵引网采用分段供电与测控技术可实现故障测距^[2]。



注: K1、K2 表示电力电子过分相设备。

图2 广州某地铁线路同相牵引供电系统示意图

该地铁线路的同相牵引供电方案分为3种。方案1中,全线设置4个牵引变电所,分别为SS1、SS2、SS3、SS4。正常运行情况下,SS2为全线供电,SS1、SS3、SS4 3个牵引变电所作为备用;当SS2处于检修或故障情况下,SS1、SS3、SS4 3个牵引变电所作为全线供电。牵引变电所取消变电所处电分相,采用组合式同相牵引供电技术,在SS2到3个备用牵引所之间设置3处分区所。正常运行情况下,分区所按新型双边供电方式运行;在SS2处于检修或故障情况下,3处分区所按照双边供电方式运行。

方案2中,正常运行情况下SS2给全线供电,SS1、SS3和SS4作为备用。牵引变电所取消变电所处电分相,采用组合式同相牵引供电技术,在SS2所在位置设置分区所,分区所按照单边供电方式运行。由于分区所处于3个牵引变电所交汇之处,需要在3个供电臂之间设置K1和K2两组电力电子过分相设备。在SS2处于检修或故障情况下,SS1、SS3和SS4为全线供电。分区所按照单边供电方式运行。电力电子过分相设备在正常和非正常情况下均需投入运行。此外,在正线和SS2(停车场)之间另需设置1组电力电子过分相装置。此方案可以取消分区所处电分相。

方案3中,列车正常运行情况下,SS1、SS3和SS4运行;SS2作为备用,且SS2只作为1个牵引变电所的备用。当3个牵引变电所中的2个或2个以上发生故障或检修时,SS2无法满足正常供电要求。在SS2所在位置设置分区所,分区所按照单边供电方式运行,由于分区所为3个牵引变电所交汇之处,需要在3个供电臂之间设置K1和K2两组电力电子过分相设备,电力电子过分相设备在正常和非正常情况下均需投入运行。此方案中,SS2的容量等于SS1、

SS3和SS4 3个牵引所中的最大容量,方案1、2中SS2的容量为SS1、SS3和SS4 3个牵引所容量之和。

在牵引供电系统中,牵引变电所和接触网在可靠性逻辑关系上是串联的,因此,可以认为所有的牵引变电所组合成的牵引变电所层与接触网层串联。对于同一条线路,不同方案对应的架空刚性接触网的长度是相同的。同相牵引供电方案中方案1、2和方案3是两个不同的系统,因此,需对同相牵引供电方案进行两次可靠性分析。

3 广州某地铁线路原牵引供电方案的系统可靠性分析

广州某地铁线路原供电方案采用传统牵引变电所。传统牵引变电所常见的电气主接线图及其可靠性参数可以由文献[8]获得。传统牵引供电方案系统结构如图1所示,当供电系统正常工作时,这4个牵引变电所同时投入工作,相邻2个牵引变电所的供电臂之间用分区所隔开。牵引供电系统具备一定的故障供电,即越区供电能力。当某个牵引变电所发生故障或需停电检修时,此变电所所供电的供电臂,通过闭合分区所的开关,由两侧相邻的牵引变电所负责供电,这种供电方式称为“越区供电”。当出现越区供电时,传统牵引供电系统正常工作时最多只允许1个牵引变电所出现故障而越区供电,则4个牵引变电所构成1个4取3门。通过4取3门的算法可计算得到传统牵引供电系统中牵引变电所正常工作的部分可靠性参数:故障率为0.000 657 24次/年,平均维修时间为3.000 2 h,正常工作概率为99.999 977 49%。

在原牵引供电方案和同相牵引供电方案中,接触网均采用架空刚性接触网。刚性接触网在电气化铁路中运用较少,且关于其可靠性参数的文献较少,因此本文采用文献[9]中地铁刚性接触网的参数来进行计算。由文献[9]得到锚段长度为243 m的地铁刚性接触网GZ20锚段的供电可靠性指标:失效概率为 6.507×10^{-5} ,年平均停电时间为0.57 h,年可用度为99.993 4%,故障频率为0.236 67次/年。由文献[10]可得到分区所的可靠性参数。

根据图1各区段接触网距离参数以及分区所数量,可以计算得到原牵引供电方案接触网的可靠性参数:故障率为109.787 79次/年,平均维修时间为2.118 4 h,正常工作概率为97.413 75%。

将牵引变电所与接触网串联,计算得到原牵引供电方案的系统可靠性,如表 1 所示。

4 同相牵引供电方案的系统可靠性分析

类似于 SS1—SS4 4 个组合式牵引变电所结构,同相牵引供电系统只在馈线部分存在差别,因此,可参考文献[8]进行变电所模块计算。参考文献[11],结合各牵引变电所的馈线结构,通过计算得到同相牵引供电系统主要电气设备的可靠性参数,

如表 2 所示。

表 1 原牵引供电方案的系统可靠性计算结果

可靠性特征量	评估结果
平均工作概率/%	97.413 70
平均停工概率/%	2.586 30
平均维修时间/h	2.118 40
故障率/(次/年)	109.788 45
维修率/(次/h)	0.472 06
平均工作时间/h	79.789 80
平均寿命周期/h	81.908 20

表 2 同相牵引供电方案的系统可靠性计算结果

可靠性特征量	SS1 变电所	SS2 变电所	SS3 变电所	SS4 变电所
平均工作概率/%	99.996 528 00	99.996 526 55	99.996 526 52	99.996 526 52
平均停工概率/%	0.003 471 90	0.003 473 45	0.003 473 48	0.003 473 48
平均维修时间/h	3.007 070 00	3.009 000 00	3.006 000 00	3.006 000 00
维修率/(次/h)	0.332 549 50	0.332 329 00	0.332 670 00	0.332 670 00
故障率/(次/年)	0.101 147 50	0.101 122 65	0.101 235 23	0.101 235 23
平均工作时间/h	86 606.193 920 00	86 627.476 600 00	86 531.141 400 00	86 531.141 400 00
平均寿命周期/h	86 609.200 990 00	86 630.485 600 00	86 534.147 100 00	86 534.147 100 00

4.1 同相牵引供电方案 1 的系统可靠性

同相牵引供电方案 1 中,牵引变电所给接触网正常供电,因此,方案 1 和方案 2 中的牵引变电所层正常工作的可靠性,即为 SS2 正常工作或者 3 个备用牵引变电所同时正常工作的可靠性。同相牵引供电方案 1 中牵引变电所层的可靠性计算结果:故障率为 0.000 000 004 8 次/年,平均维修时间为 0.751 76 h,正常工作概率为 99.999 999 64%。

方案 1 中,5 组分段装置和 3 个分区所与接触网串联,其中,每组分段装置均由 2 个断路器、2 个隔离开关、1 个电流互感器和 1 个电压互感器所组成。接触网的可靠性参数计算结果:故障率为 98.686 9 次/年,平均维修时间为 2.353 8 h,正常工作概率为 97.416 75%。

通过上述计算结果可知,由于分区所的可靠性较低,虽贯通供电方案中的接触网相较于原牵引供电方案多 5 组电分段,但是少 3 个分区所,所以贯通供电系统的接触网的可靠性仍然高于原牵引供电方案接触网的可靠性。将方案 1 中牵引变电所层的可靠性计算结果与接触网的可靠性计算结果串联,可得到方案 1 的系统可靠性参数,如表 3 所示。

4.2 同相牵引供电方案 2 的系统可靠性

方案 2 与方案 1 的牵引变电所层可靠性计算结果相同。方案 2 中 5 组电分段、2 套电力电子过分相装置及 1 个分区所与接触网串联。单个 IGBT (绝缘栅双极型晶体管)的失效率为 187/(10⁹ h),

可靠度为 0.999 987 02。通过计算得到方案 2 接触网的可靠性:故障率为 92.388 3 次/年,平均维修时间为 2.465 9 h,正常工作概率为 97.465 26%。

方案 2 同相牵引供电系统的可靠性,如表 3 所示。

4.3 同相牵引供电方案 3 的系统可靠性

方案 3 中,当同相牵引供电系统中任意两个牵引变电所出现故障时,无论是两个主变电所同时出现故障,还是 1 个主变电所和 1 个备用变电所同时出现故障,其供电能力都不能满足系统的要求而认为系统故障。因此,同相牵引供电系统正常工作的条件是 4 个牵引变电所中至少有 3 个正常工作。

表 4 为牵引变电所的可靠性特征量。由表 4 可知,4 个牵引变电所的可靠性差值非常小,可以近似认为 4 个牵引变电所可靠性相同,因此,方案 3 中 4 个牵引变电所组成一个 4 取 3 门。根据 GO 法,可计算得到至少 3 个牵引变电所正常工作的可靠性:故障率为 0.000 033 825 次/年,平均维修时间为 3.055 96 h,正常工作概率为 99.999 998 82%。

方案 3 中接触网的可靠性与方案 2 相同。通过计算得到方案 3 的系统可靠性,如表 3 所示。由表 3 可知,方案 2 和方案 3 中,由于接触网的可靠性在牵引供电系统的可靠性中占主导地位,两供电方案的牵引变电所层的可靠性差别不能在牵引供电系统整体可靠性中体现,因此,表 3 中方案 2 与方案 3 的可靠性基本相同。

表 3 3 种同相牵引供电方案的系统可靠性计算结果

可靠性特征量	方案 1	方案 2	方案 3
平均工作概率/%	97.416 750	97.465 260	97.465 259
平均停工概率/%	2.583 250	2.534 740	2.534 741
平均维修时间/h	2.353 800	2.465 900	2.465 870
维修率/(次/h)	0.424 800	0.405 500	0.405 500
故障率/(次/年)	98.686 900	92.388 300	92.388 300
平均工作时间/h	88.765 600	94.817 200	94.817 200
平均寿命周期/h	91.119 400	97.283 100	97.283 100

通过上述计算结果可知,由于原牵引供电方案的牵引变电所层的正常工作概率比同相牵引供电方案低两个数量级,因此,同相牵引供电的系统可靠性比原供电方案的系统可靠性高。

5 结语

相较于传统牵引供电系统,同相牵引供电系统的可靠性更高。该系统取消了电分相,采用交流供电,同时解决了过分相问题和杂散电流问题。接触网采用的分段供电和检测技术,可以缩短故障维修时间,进一步提高牵引网的供电可靠性。因此,采用同相牵引供电技术方案,在解决既有问题的同时,供电系统的可靠性也有所提升。

(上接第 157 页)

条件,通过实际放样,充分考虑安装后可能出现的问题,在设计阶段进行规避。施工过程中也应对接触网刚柔过渡处予以重视,应减少施工误差,以保证刚柔过渡处良好的弓网关系。

参考文献

[1] 陈佳佳. 地铁接触网关节式刚柔过渡施工技术运用分析[J]. 科技风,2020(7): 125.

[2] 艾晓宇. 困难条件下的接触网刚柔过渡方案的探讨[J]. 科技创新与应用,2017(17): 206.

[3] 陈玮. 上海轨道交通 9 号线一期接触网刚柔过渡方案[J]. 铁

(上接第 161 页)

参考文献

[1] 王洪林. 设计时速 120 km 线路架空刚性悬挂接触网跨距选择[J]. 城市轨道交通研究,2017(10): 79.

[2] 杨理兵. II 型架空刚性接触网技术研究[J]. 城市轨道交通研究,2006(11): 50.

[3] 李夫忠. 接触网波动特性及提高波速利用率途径的研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.

[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 轨道交通地面装置电力牵引架空接触网:GB/T 32578—2016[S]. 北京:中

参考文献

[1] 于松伟. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008.

[2] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报,2010(4): 119.

[3] 李群湛,贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J]. 电力系统自动化,1996(4): 9.

[4] 解绍锋,李群湛,贺建闽,等. 同相供电系统对称补偿装置控制策略研究[J]. 铁道学报,2002(2): 109.

[5] 陈民武. 基于 GO 法的高速铁路牵引变电所可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2011(18): 56.

[6] 赵文龙. 同相供电系统可靠性研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.

[7] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报,2014(4): 559.

[8] 李海燕,解绍锋,孙镜堤,等. 统一牵引供电系统可靠性研究[J]. 电气铁道,2018(6): 9.

[9] 郑吉. 地铁牵引供电系统可靠性分析[D]. 成都:西南交通大学,2009.

[10] 赵健. 基于 GO 法的交流牵引供电系统可靠性研究[D]. 西安:西安理工大学,2010.

[11] 林飞. 牵引供电系统可靠性指标体系与可靠性分析[D]. 成都:西南交通大学,2006.

(收稿日期:2019-05-27)

道工程学报,2010(6): 83.

[4] 李丁丁. 关节式刚柔过渡始触点高差研究[J]. 机电信息,2017(24): 151.

[5] 赵海军. 刚柔过渡方式的研究[J]. 电气化铁道,2008(1): 25.

[6] 杨艺,周宁,李瑞平,等. 基于有限元法的弓网过渡段处动态性能仿真分析[J]. 振动与冲击,2016(18): 71.

[7] FURRER B. Process and Apparatus for Coupling Elastic And Rigid Contact Line Systems:US,5957254 A[P]. 1999-09-08.

[8] 关金发,田志军,吴积钦. 基于弓网动力仿真的 160 km/h 刚柔过渡系统方案研究[J]. 铁道学报,2018(9): 48.

(收稿日期:2020-06-18)

国标准出版社,2016:16.

[5] 韩柱先,王国梁. 刚性接触网的不平顺分析[J]. 铁道工程学报,2007(4): 61.

[6] 尹魁元. 接触网刚性悬挂跨距的选择[J]. 都市轨道交通,2013(8): 105.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通架空接触网技术标准:CJJT 288—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019: 15.

(收稿日期:2019-05-31)