

城市轨道交通贯通供电方式牵引网分段供电方案及故障辨识方法^{*}

侯峰¹ 王帅² 何治新¹ 易东² 孙忠锐²

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

摘要 [目的]城市轨道交通线路采用贯通供电方式时,因牵引网结构复杂且无备用,牵引网发生故障时可能会扩大停电范围,为此需要对牵引网的分段供电方案进行优化。[方法]提出了一种适用于贯通供电方式的牵引网分段供电方案。基于牵引网分段供电拓扑特征,结合车-网耦合特性,提出了分段故障、过渡段故障的辨识方法。对牵引网分段短路和过渡区短路2个故障场景的控制方案进行了分析,描述了这2个故障场景下牵引网的自愈流程,并制定了这2个故障场景对应的断路器控制方案。以广州地铁18号线牵引供电系统为例,通过MATLAB/Simulink软件仿真,验证了所提分段供电方案及故障辨识方法的正确性和可靠性。[结果及结论]该方法可有效辨识故障区段。牵引网故障断路器控制方案可为分段和过渡区提供可靠的主保护,可保证广州地铁18号线牵引供电系统稳定、高效运行。

关键词 城市轨道交通; 供电系统; 贯通供电方式; 牵引网分段供电; 故障辨识; 断路器控制

中图分类号 U223.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.008

Segmental Power Supply Scheme and Fault Identification Method for Urban Rail Transit Traction Network in Continuous Co-phase Power Supply Mode

HOU Feng¹, WANG Shuai², HE Zhixin¹, YI Dong², SUN Zhongrui²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. Electrical Engineering College, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China)

Abstract [Objective] When urban rail transit line adopts the continuous co-phase power supply mode, a fault in the traction network may cause extended power outage due to the complexity and non-backup structure of the traction network. Therefore, it is necessary to optimize the segmental power supply scheme for the traction network. [Method] A segmental

power supply scheme for the traction network applicable to the continuous co-phase power supply mode is proposed. Based on the topological characteristics of the segmental power supply of traction network, and combined with the coupling characteristics of vehicle-traction network, the identification methods of segmental short-circuit and neutral section short-circuit are proposed. The control schemes for these two fault scenarios are analyzed, and the self-healing process of the traction network under the above two fault scenarios is described, corresponding circuit breaker control schemes are formulated. In the case study of Guangzhou Metro Line 18, the correctness and reliability of the proposed segmental power supply scheme and the fault identification methods are verified by MATLAB/Simulink software simulation. [Result & Conclusion] The proposed method can effectively identify faulty segments. The circuit breaker control scheme for the traction network fault can provide reliable main protection for the segments and neutral sections, ensuring stable and efficient operation of the traction power supply system of Guangzhou Metro Line 18.

Key words urban rail transit; power supply system; continuous co-phase power supply mode; segmental power supply for traction network; fault identification; circuit breaker control

为解决传统电气化铁路中普遍存在的过分相问题和以负序为主的电能质量问题,广州地铁18号线采用了基于新型双边供电的贯通同相供电技术。该技术不仅可以取消传统单边供电方式在2个相邻牵引变电所间、供电臂末端设置的电分相,还可以在采用结构简单的带回流线的直接供电方式下大幅度提高牵引供电系统的供电能力^[1-3]。但是,采用该技术的城市轨道交通线路,因其牵引网结构复杂且无备用,牵引网故障成为了引发牵引供电系统供电中断的主要原因。牵引网发生故障时,整个供电臂中断供电,若继续沿用传统的牵引网结构及保

^{*} 国家重点研发计划项目(2017YFB1200801)

护方案,将会进一步扩大牵引网的停电范围,延长线路恢复正常运营的时间,这将对乘客出行造成一定的影响^[4-5]。本文针对广州地铁 18 号线的牵引网故障问题,提出了一种适用于贯通同相供电方式的牵引网分段供电方案,该方案可实现牵引网供电的网格化。基于该方案,本文进一步构建了牵引网故障分段辨识及断路器控制方法,以减少故障牵引网停电范围。

1 牵引网分段供电方案

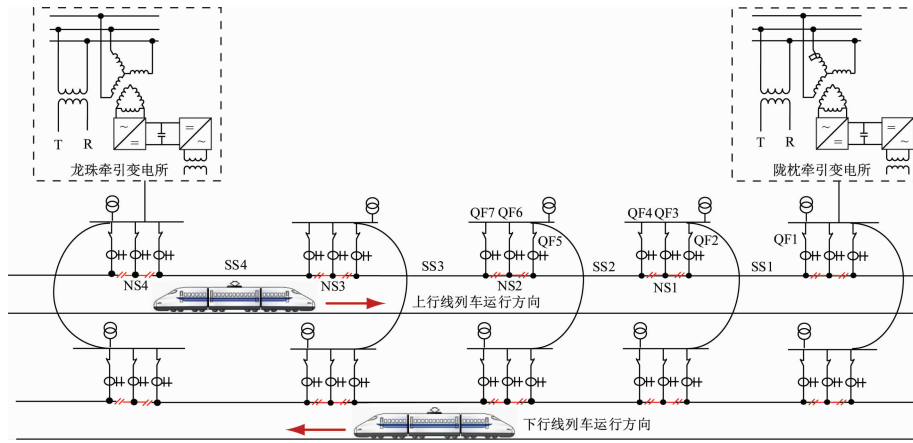
图 1 为该线的贯通供电方式牵引网分段供电方案。该线采用龙珠牵引变电所和陇枕牵引变电所构成的双边供电系统。将采用贯通供电方式的牵

引网细分为 4 个供电单元,每个供电单元均采用 SS(分段) + NS(过渡区)的结构,其中,过渡区在既有牵引变电所出口处进行电分相改造后形成。分段内接触线两端经单极断路器连接到所内母线,进而实现分段独立控制^[6-9]。过渡区经单极断路器的馈线接入母线,通过对该断路器进行控制,可避免列车带负荷进入无电区造成拉弧隐患,以及列车从非故障分段驶入故障分段时造成二次短路等故障,有效提高牵引网贯通供电的可靠性和灵活性^[10-11]。

2 牵引网故障辨识方法

2.1 分段故障的辨识方法

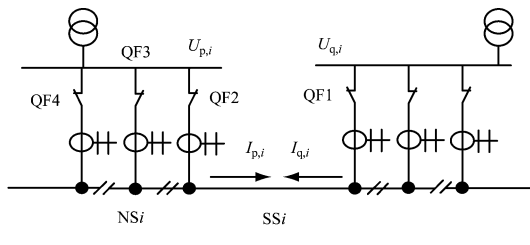
贯通供电方式牵引网分段电气量分布见图 2。



注: T—接触线; R—钢轨; SS1—序号为 1 的分段; NS1—序号为 1 的过渡区; QF1—序号为 1 的断路器。余类同。

图 1 广州地铁 18 号线的贯通供电方式牵引网分段供电方案

Fig. 1 Segmental power supply scheme for Guangzhou Metro Line 18 traction network under the continuous co-phase power supply mode



注: $U_{p,i}$ —第 i 个分段的首端(又称为“p 端”)电压; $U_{q,i}$ —第 i 个分段的末端(又称为“q 端”)电压; $I_{p,i}$ —第 i 个分段的首端电流; $I_{q,i}$ —第 i 个分段的末端电流; NS i —第 i 个 NS; SS i —第 i 个 SS。

图 2 贯通供电方式牵引网分段电气量分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the electrical quantity distribution in the traction network segments under the continuous co-phase power supply mode

当牵引供电系统正常运行时,根据 GB/T 1402—2010《标称电压及其允许的极限值》的规定,

牵引网电压的最低非持续电压为 17.5 kV。当牵引网电压低于 17.5 kV 时,列车车载变流器闭锁,列车停止弓网取流,牵引网中只有故障电流,没有牵引电流^[12-14]。

基于牵引网的车-网耦合电气特性,利用分段两端电气信息,提出了低压启动的牵引网故障辨识方法。设 U_{set} 为低压启动的整定阈值, I_{set} 为对应的电流整定值, k_1 为差动保护的可靠性系数,则分段故障启动依据为:

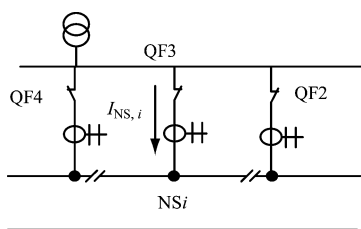
$$\begin{cases} |U_{p,i}| \leq U_{set} \\ |U_{q,i}| \leq U_{set} \end{cases} \quad (1)$$

分段故障动作依据为:

$$\begin{cases} |I_{p,i} + I_{q,i}| > I_{set} \\ |I_{p,i} + I_{q,i}| > k_1 |I_{p,i} - I_{q,i}| \end{cases} \quad (2)$$

2.2 过渡区故障的辨识方法

贯通供电方式牵引网过渡区电气量分布如图3所示。



注： $I_{NS,i}$ ——第*i*个过渡区电流。

图3 贯通供电方式牵引网过渡区电气量分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the electrical quantity distribution in the traction network neutral section under the continuous co-phase power supply mode

设 I_{max} 为该线路列车最大负荷电流。当过渡区发生故障时,以过渡区馈线电流大于列车最大负荷电流作为过渡区故障切除动作依据:

$$|I_{NS,i}| > I_{max} \quad (3)$$

2.3 过渡区负荷辨识方法

设 I_{min} 为该线路列车最小负荷电流。当过渡区处于跳闸等待状态时,以过渡区电流大于列车最小负荷电流作为过渡区负荷切除动作依据:

$$|I_{NS,i}| > I_{min} \quad (4)$$

3 牵引网故障断路器控制方案

贯通供电方式牵引网分段示意图如图4所示。本文分别对牵引网分段短路和过渡区短路2个故障场景下的控制方案进行研究,描述这2个故障场景下牵引网的自愈流程,其流程主要通过控制最小故障范围内相关断路器的开合来完成。

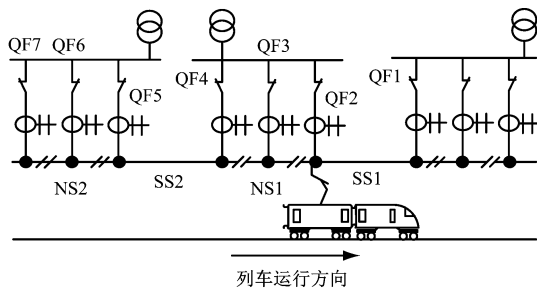


图4 贯通供电方式牵引网分段示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the traction network segments under the continuous co-phase power supply mode

3.1 分段短路故障场景下的断路器控制流程

如图4所示,SS1发生接地短路故障时,SS1两

侧断路器QF1与QF2同时跳闸,同时过渡区断路器QF3进入跳闸等待状态。设 t_{wait} 为NS1的跳闸等待时间,贯通供电方式牵引网分段测控系统(以下简称“测控系统”)在故障发生后的 t_{wait} 内持续检测NS1是否存在负荷电流。若NS1存在负荷电流,QF3立即跳闸。若NS1无负荷电流,QF3继续保持跳闸等待状态。

经重合闸时限后,SS1启动自动重合闸。若QF1与QF2重合闸成功,NS1将恢复正常运行,牵引网恢复正常供电。若重合闸失败,则QF1与QF2加速跳闸,并闭锁重合闸,此时线路发生永久性故障,测控系统将故障信息通知行车调度。行车调度调整列车行车计划后,运营调整方案经列车运行控制系统通知后方列车,后方列车做出相应的避险操作。接触网工区组织抢修,抢修完成后,系统恢复正常供电。

假定此时列车保持3 min的追踪间隔。为避免连续2列列车进入故障区段,行车调度须告知测控系统:从列车发生故障到避免后续列车进入过渡区的总时长须小于3 min。因此,设 $t_{wait} = 3 \text{ min}$,若列车到达NS1的时间小于 t_{wait} ,列车进入NS1后,NS1失电,列车换流器闭锁,以避免列车从正常区段驶入故障区段造成的二次短路、列车带负荷进入无电区等情况。若列车到达NS1的时间大于 t_{wait} ,列车可以完成避险操作,列车不会带电进入SS1,行车调度令测控系统取消跳闸等待状态。

3.2 过渡区短路故障场景下的断路器控制流程

如图4所示,NS1发生短路故障时,QF3跳闸,将NS1切除,联跳SS2两侧的QF4和QF5,此时NS2进入跳闸等待状态。经重合闸时限后,QF3重合闸。若QF3重合闸成功,NS1恢复正常供电,SS2经重合闸后投入运行,NS2取消跳闸等待状态。若QF3重合闸失败,行车调度将在测控系统的技术支持下组织抢修,以尽快恢复正常供电。

4 牵引网故障辨识的仿真验证

为验证贯通供电方式牵引网故障辨识方法及最小故障范围断路器控制方案的正确性,进一步以广州地铁18号线牵引供电系统为例,在MATLAB/Simulink软件上搭建了牵引网状态测控系统(其供电拓扑见图1)。仿真时设定了2个故障工况,如表1所示。牵引网导体的具体参数如下:线路自阻抗为 $(0.131 + j0.387) \Omega$,线路互阻抗为 $(0.021 +$

j0.117) Ω 。牵引网分段的具体参数如下:分段 SS1、SS2、SS3 和 SS4 的长度均为 15 km,过渡区 NS1、NS2、NS3 和 NS4 的长度均为 150 m。

表 1 牵引网故障仿真设定的 2 个工况

Tab. 1 Two scenarios for traction network faults simulation

工况序号	故障位置	故障类型	故障电阻/ Ω	相邻区域内是否有列车
故障工况 1	SS2	永久性故障	0.2	NS1 内有列车
故障工况 2	NS2	永久性故障	5.0	SS2 内无列车

4.1 故障工况 1

设 t_1 为故障工况 1 下的仿真时间。故障工况 1 下,SS2 的接触线首末端电压、接触线电流及过渡区 NS1 电流如图 5 所示,断路器 QF4、QF5 和 QF6 的状态如图 6 所示。设 $t_1 = 0.1$ s 时 SS2 发生故障,SS2 首末端电压迅速降至 5 kV,低于低压启动的整定阈值 U_{set} (17.5 kV),故障辨识启动,同时 SS2 内两端电流满足式(2),测控系统判定线路发生故障。测控系统下发跳闸命令, $t_1 = 0.2$ s 时,SS2 首末端断路器 QF4 和 QF5 分闸,SS2 被成功切除。经重合闸时限后,SS2 重合闸,SS2 两端电气量仍满足动作条

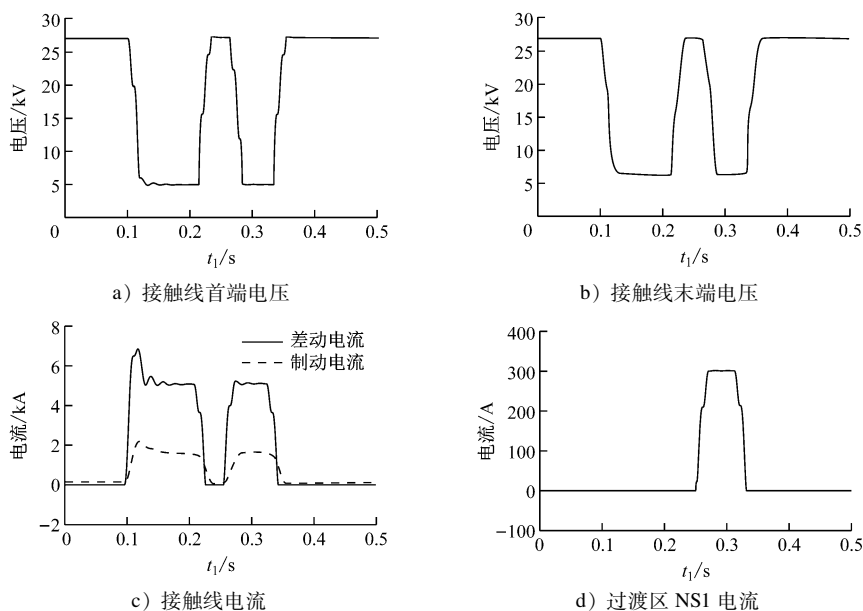


图 5 故障工况 1 下 SS2 的接触线首末端电压、接触线电流及过渡区 NS1 电流

Fig. 5 SS2 initial and terminal voltages of contact wire, contact wire currents and neutral section NS1 current under fault scenario 1

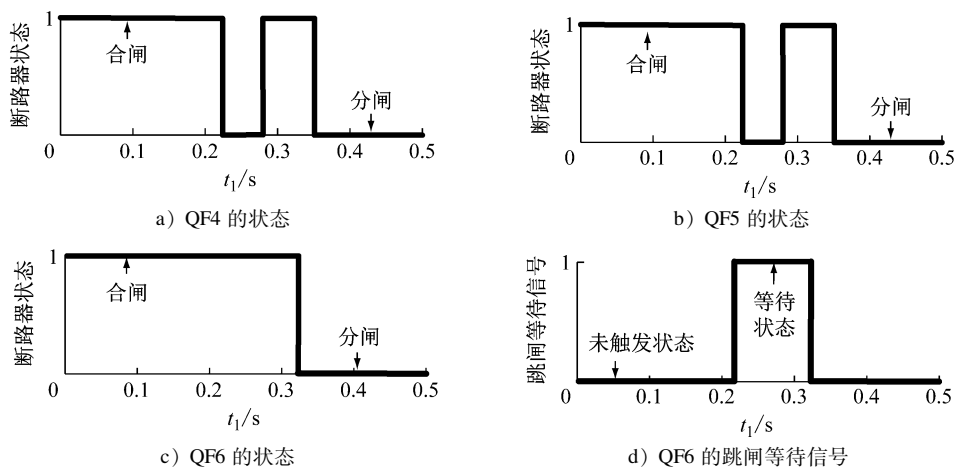


图 6 故障工况 1 下断路器 QF4、QF5 和 QF6 的状态

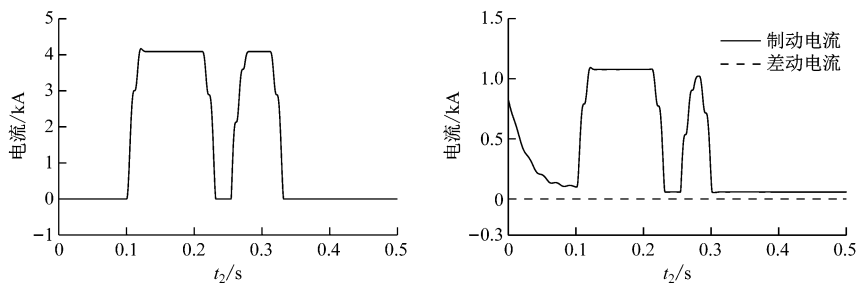
Fig. 6 Status of circuit breakers QF4, QF5 and QF6 under fault scenario 1

件,断路器 QF4 和 QF5 再次跳闸,故障被再次切除。在 $t_1 = 0.3 \text{ s}$ 时,检测到 NS1 存在列车取流,此时 NS1 跳闸,列车变流器闭锁,以确保列车不带电进入故障分段。

4.2 故障工况 2

设 t_2 为故障工况 2 下的仿真时间。故障工况 2 下,NS1 的电流、SS2 的差动电流如图 7 所示,断路器 QF3、QF4、QF5 和 QF6 的状态如图 8 所示。在

$t_2 = 0.1 \text{ s}$ 时,NS1 发生故障,NS1 的电流大于低压启动的电流整定阈值 $I_{\text{set}} (1 \text{ kA})$,测控系统判定 NS1 故障。相邻分段 SS2 两端电流虽未达到动作条件,但测控系统下发断路器 QF3、QF4 和 QF5 跳闸命令,NS1 与 SS2 被切除,NS2 进入跳闸等待状态。经重合闸时限后,NS1 断路器 QF3 重合闸,但 NS1 电流再次超出阈值,过渡区 NS1 重合闸失败,NS1 被再次切除。

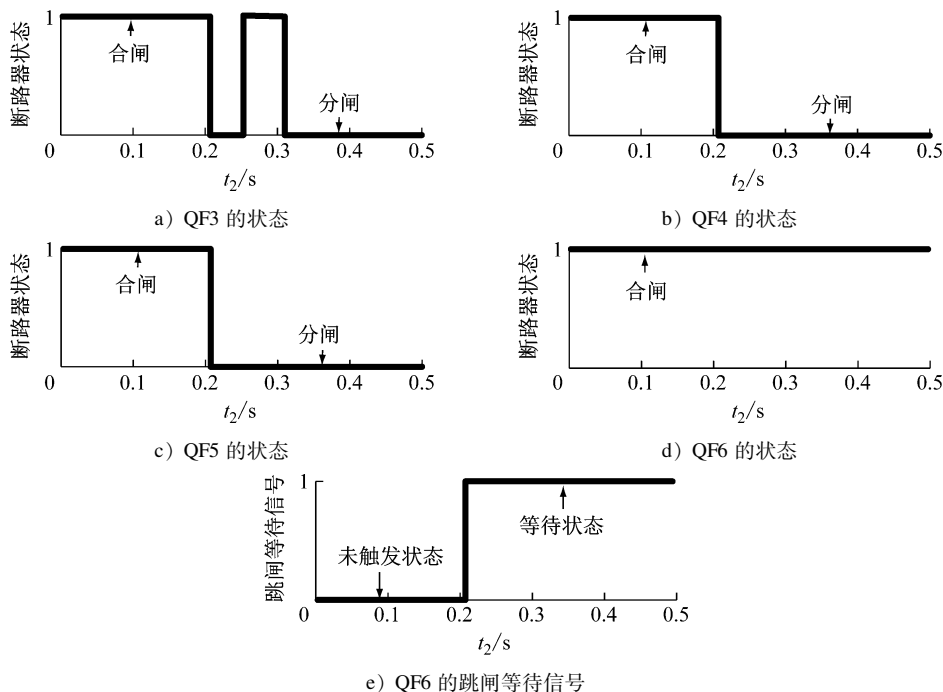


a) NS1 电流

b) SS2 差动电流

图 7 故障工况 2 下 NS1 的电流、SS2 的差动电流

Fig. 7 NS1 current and SS2 differential current under fault scenario 2



a) QF3 的状态

b) QF4 的状态

c) QF5 的状态

d) QF6 的状态

e) QF6 的跳闸等待信号

图 8 故障工况 2 下断路器 QF3、QF4、QF5 和 QF6 的状态

Fig. 8 Status of circuit breakers QF3, QF4 QF5 and QF6 under fault scenario 2

4.3 仿真结果分析

由仿真结果可知,本文所提的低压启动故障辨识方法可有效辨识故障区段。该方法与牵引网故障断路器控制方案相结合,可为分段和过渡区提供可靠的主保护,为广州地铁 18 号线牵引供电系统的安全、稳定运行提供保障。

5 结语

本文针对广州地铁 18 号线牵引供电系统牵引网故障的问题,提出了适用于贯通供电方式的牵引网分段供电方案,并基于该牵引网分段的拓扑结构,提出了一种低压启动的故障辨识方法,以实现

故障区段的准确辨识。在此基础上,构建了故障分段导向安全的断路器控制方案,以保障非故障区段的正常运行,缩小事故停电范围。软件仿真结果验证了本文所提故障辨识方法及断路器控制方案的正确性。

本文提出的贯通供电方式牵引网分段供电方案、故障区段辨识方法及最小停电区间断路器控制方案,可进一步推广到粤港澳大湾区城际铁路(交流制线路)中,以提升粤港澳大湾区城际铁路供电系统的可持续性与可靠性。

参考文献

- [1] 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, 49(4): 559.
LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559.
- [2] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 199.
LI Qunzhan. Industrial frequency single-phase AC traction power supply system and its key technologies for urban rail transit[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2): 199.
- [3] 崔杰圣. 贯通同相供电系统运行方式研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
CUI Jiesheng. The research on operation modes of cophase continuous traction power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [4] 李兴旺. 贯通式同相牵引供电系统建模及牵引网故障区间定位研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
LI Xingwang. Study on modeling of through-type in-phase traction power supply system and fault location of traction network[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [5] 黄钰淇. 贯通式同相牵引供电系统故障识别研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
HUANG Yuqi. Research on fault identification of through-type in-phase traction power supply system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [6] WANG S, CHEN M, LI Q, et al. A new hybrid fault identification method based on multiterminals synchronous measure information for all parallel at traction power supply system[J]. Energies, 2018, 11(10): 2698.
- [7] SERRANO J, PLATERO C, LÓPEZ-TOLEDO M, et al. A novel ground fault identification method for 2×5 kV railway power supply systems[J]. Energies, 2015, 8(7): 7020.
- [8] CHO G J, KIM C H, KIM M S, et al. A novel fault-location algorithm for AC parallel autotransformer feeding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 475.
- [9] 陈海涛, 熊列彬, 王昌. 纵向分段式全并联 AT 牵引网保护配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(12): 47.
CHEN Haitao, XIONG Liebin, WANG Chang. Protection configuration of longitudinal segmented all parallel AT traction network[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2015, 27(12): 47.
- [10] 王旭光, 李群湛, 陈民武, 等. 高速铁路全并联 AT 牵引网状态测控方案与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 128.
WANG Xuguang, LI Qunzhan, CHEN Minwu, et al. A scheme of state measure and control of all-parallel AT traction network for high-speed railway and simulation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 128.
- [11] 黄华学. 组合式同相供电继电保护方案研究[J]. 电气化铁道, 2014, 25(5): 17.
HUANG Huaxue. Study on scheme for combined type co-phase power supply relay protection[J]. Electric Railway, 2014, 25(5): 17.
- [12] CHEN M W, LI Q Z, ROBERTS C, et al. Modelling and performance analysis of advanced combined co-phase traction power supply system in electrified railway[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2016(10): 906.
- [13] 崔召华. 高速铁路牵引网分段测控系统研究与试验分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
CUI Zhaohua. Research and test analysis of high speed railway traction network segmented measurement and control system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 刘淑萍. 高速铁路牵引供电系统继电保护研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LIU Shuping. Study on protective relay of traction power supply systems for high speed railways[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- 收稿日期:2022-05-15 修回日期:2022-06-20 出版日期:2024-09-10
Received:2022-05-15 Revised:2022-06-20 Published:2024-09-10
- 通信作者:侯峰,高级工程师,houfeng6686@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- 收稿日期:2022-04-29 修回日期:2022-08-30 出版日期:2024-09-10
Received:2022-04-29 Revised:2022-08-30 Published:2024-09-10
- 第一作者:郑则君,博士研究生,zhengjuner@163.com
- 通信作者:宋冬利,高级实验师,sdlcds@swjtu.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 46 页)

- [11] 李杨. 基于振动环境下的高速列车轴箱轴承试验台设计与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
LI Yang. Design and research on the test rig for axle box bearings in high-speed train based on the vibration environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.