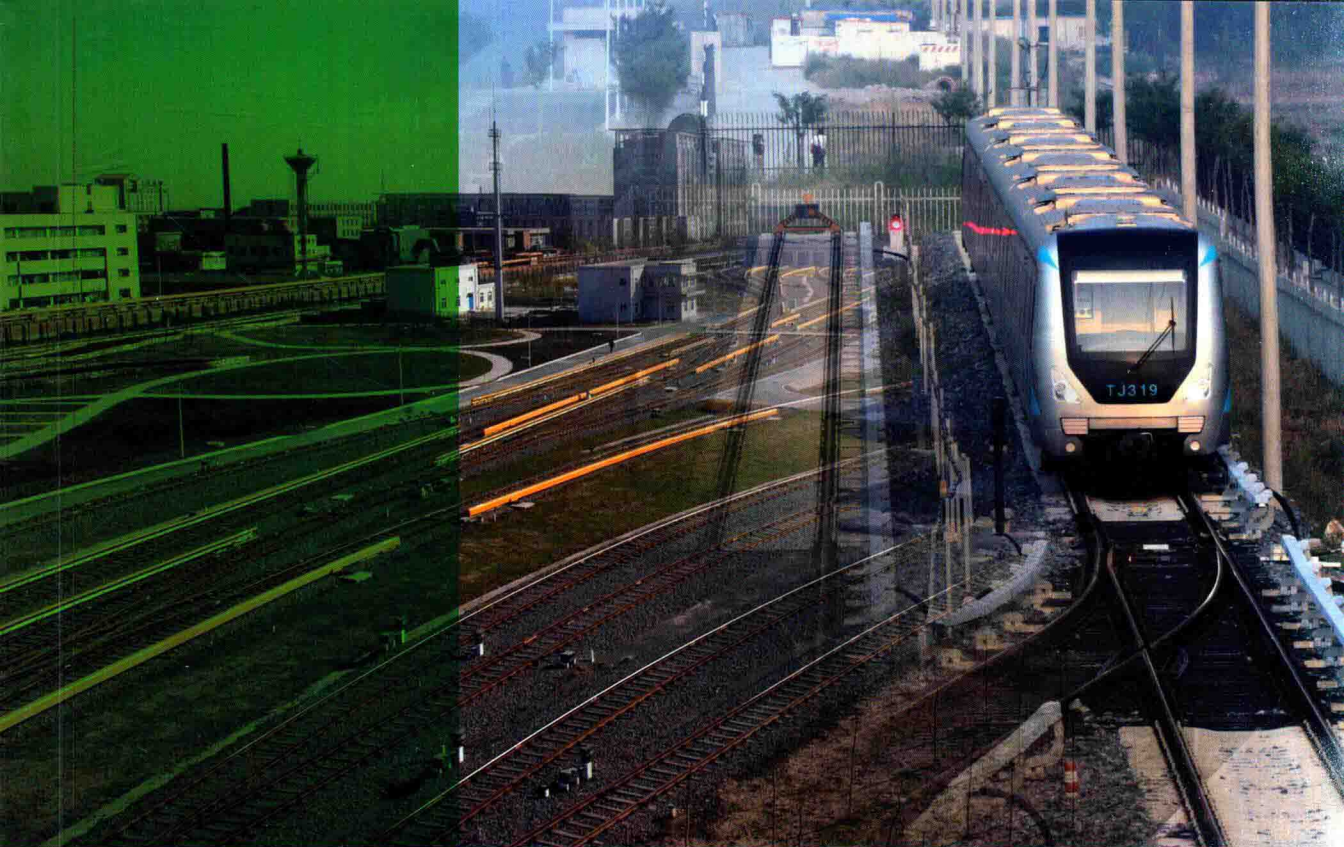




地铁供电系统及 电气设施的 维护与故障处理

陈耀荣 李义岭 于秋波 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

地铁供电系统及电气设施的 维护与故障处理

陈耀荣 李义岭 于秋波 等编著

机械工业出版社

地铁运输的“心脏”——供电系统的巡视、维护、检修、应急演练十分重要，是保障地铁运输安全、高效运营的根本。随着城市轨道交通建设的快速发展，专业人才短缺，基于此，我们编写了《地铁供电系统及电气设施的维护与故障处理》一书。

本书是地铁供电系统及电气设施原理、维护、巡视、操作、检修和故障处理的培训教材，着重介绍了两级（110kV/35kV 电压等级）集中供电方式在地铁供电系统中的应用，如高电压供电技术，地铁变电站的运行与维护，电力系统主设备继电保护与试验，变电站二次接线，SCADA 瘫痪故障分析与对策。并对降压整流及直流馈电系统、400V 交流电力设备的原理及常见故障的处理给予了详尽的讲述。

本书结合实际应用中的操作规程给出了故障处理实例，内容丰富、实用性强，可作为地铁现有电力维保员工的培训教材，也可作为大专院校城市轨道交通专业的教科书。

图书在版编目（CIP）数据

地铁供电系统及电气设施的维护与故障处理/陈耀荣等编著. —北京：机械工业出版社，2018.6

ISBN 978-7-111-60078-7

I. ①地… II. ①陈… III. ①地下铁道—供电系统—维修②地下铁道—供电系统—故障修复③地下铁道—电气设备—维修④地下铁道—电气设备—故障修复 IV. ①U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 116284 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：林春泉 责任编辑：林春泉

责任校对：郑 婕 封面设计：鞠 杨

责任印制：孙 炜

天津翔远印刷有限公司印刷

2018 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21.75 印张·534 千字

000 1—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-60078-7

定价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

前 言

截至2017年12月31日，中国内地累计有34个城市建成城市轨道交通，运营线路总长度达5021.69km，2017年新增石家庄、珠海、贵阳、厦门等4个运营城市。按照国家发展规划要求，总里程30000km应配备138万相关专业人员。目前，在岗人员仅为18.4万人，为了适应我国城市轨道交通快速发展的需要，提高地铁供电设备运行维护人员的专业水平，我们编写了本书，旨在帮助在岗和即将上岗的员工提高业务水平，更好地为城市建设服务。

本书主要介绍了地铁110kV、35kV、10kV变、配电站（所）系统及结构特点、应急检修要点、主变电站及子变电站各种主要设备的原理、故障特点、安全操作规程、母线之间的联络；变压器的纵差保护；短路电流的计算、牵引降压变电站交流供电、直流牵引馈电系统以及地铁供、馈电系统的巡视、操作和检修等相关内容。本书主要由陈耀荣、李义岭、于秋波编写，参加编写的还有赵维泽、陈道华等。

本书可作为地铁员工培训教材和大专院校轨道交通专业的教材。

鉴于地铁的供电、变配电设备的国内外供应厂家众多及负荷的多样化、系列化，因此书中难免有不当之处，望读者阅后提出宝贵意见。

作 者

2018年3月

作者简介

陈耀荣高级工程师：研究生学历，多年从事高低压电源供电及电力电子技术的研究，具有地铁供电系统的工作实践经验。1982 年师从清华大学郑学坚、严继昌教授，从事电力电子技术的研究和应用，有多项原国防科学技术工业委员会、中国航天科工集团第二研究院、第三研究院系列军工产品的研发、设计及应用项目，在大功率逆变电源、微弧氧化电源技术，磁控溅射电源技术，介质阻挡放电技术等方面取得了成绩，现为中国电源学会专家委员会委员。

李义岭高级工程师：研究生学历，现为天津地铁运营公司副总工程师兼设备中心经理。具有多年地铁电力监控 SCADA 系统及环控（EMCS）系统的指挥领导能力，研究的 SCADA 系统瘫痪应急演练预案及处置方法已被广泛推广应用。他还组织编制了天津地铁《信号系统设备操作检修手册》《电力系统设备操作检修手册》等 8 册技术文本，主持编写了《电气火灾预防体系》并组织实施，对于提高地铁供电系统电气火灾预见、发现和处置起到了积极的作用，保证了地铁供电系统的安全运行。

于秋波工程师：本科学历，现为天津地铁供电中心副经理。多年从事地铁电力系统线路运转与维护，具有多年变配电线路安全运营的实践经验，总结的地铁电力系统“巡视、操作、检修”的三大板块方案已被多条线路采用。

截至 2017 年 12 月 31 日，中国内地累计有 34 个城市建成投运城轨线路达 5021.69km。2017 年新增石家庄、珠海、贵阳、厦门等 4 个运营城市，新增 33 条运营线路，运营线路长度达 868.9km。新增线路再创历史新高，比 2016 年新增线路 534.8km 增加了 334.1km，增幅达 62.5%。

2017 年中国内地已开通城轨交通线路长度统计表

序号	城市	截至 2017 年 12 月 31 日运营线路长度/km								其中 2017 年新增运营线路长度/km							
		合计	地铁	轻轨	单轨	城市快轨	现代有轨	磁浮交通	APM	合计	地铁	轻轨	单轨	城市快轨	现代有轨	磁浮交通	APM
1	北京	684.4	587.8			77.00	9.40	10.20		34.00	14.40				9.40	10.20	
2	上海	731.37	636.37			56.00	9.00	30.00		48.87	48.87						
3	天津	175.30	115.30	52.00			8.00										
4	重庆	264.57	166.07		98.50					51.17	51.17						
5	广州	357.93	346.23				7.70		4.00	81.63	81.63						
6	深圳	298.22	286.50				11.72			11.72					11.72		
7	武汉	251.16	200.90	33.40			16.86			72.16	55.30				16.06		
8	南京	364.91	177.19			170.62	17.10			132.51	33.79			89.62	9.10		

(续)

序号	城市	截至2017年12月31日运营线路长度/km								其中2017年新增运营线路长度/km							
		合计	地铁	轻轨	单轨	城市快轨	现代有轨	磁浮交通	APM	合计	地铁	轻轨	单轨	城市快轨	现代有轨	磁浮交通	APM
9	沈阳	125.00	54.00				71.00										
10	长春	78.14	10.14	47.00			13.00			18.14	18.14						
11	大连	181.27	56.27	101.00			24.00			14.27	14.27						
12	成都	269.34	175.14			94.20				69.64	69.64						
13	西安	89.00	89.00														
14	哈尔滨	21.75	21.75							4.55	4.55						
15	苏州	138.40	120.70				17.70			52.80	52.80						
16	郑州	133.54	90.54			43.00				44.34	44.34						
17	昆明	86.19	86.19							22.79	22.79						
18	杭州	105.62	105.62							24.12	24.12						
19	佛山	33.50	33.50														
20	长沙	68.70	50.10					18.60									
21	宁波	74.50	74.50														
22	无锡	55.70	55.70														
23	南昌	48.43	48.43							19.63	19.63						
24	兰州	61.00				61.00											
25	青岛	55.10	46.10				9.00			21.60	21.60						
26	淮安	20.00					20.00										
27	福州	24.60	24.60							15.40	15.40						
28	东莞	37.80	37.80														
29	南宁	53.30	53.30							21.20	21.20						
30	合肥	52.40	52.40							27.80	27.80						
31	石家庄	28.43	28.43							28.43	28.43						
32	珠海	8.92					8.92			8.92							
33	贵阳	12.90	12.90							12.90	12.90						
34	厦门	30.30	30.30							30.30	30.30						
合计		5021.69	3881.77	233.40	98.50	501.82	243.40	58.80	4.00	868.89	713.07			89.62	46.28	10.20	

注：表中 APM 为 Automated People Mover systems，即旅客自动捷运系统，该系统也称为自动导轨快捷运输系统（AGTS），是一种无人自动驾驶、立体交叉的大众运输系统。

轨道交通行业常用中英文对照表

缩写	英文	中文
FAS	Fire Alarm System	火灾报警系统
BAS	Building Automation System	建筑设备自动化系统
AFC	Auto Fare Collection	自动售检票系统
ATP	Automatic Train Protection	列车自动防护
ATS	Automatic Train Supervision	列车自动监控
ATC	Automatic Train Control	列车自动控制
ATO	Automatic Train Ope	列车自动运行
SCADA	Scan Control Alarm Database	供电系统管理自动化
OCC	Operated Control Center	控制中心
HMI	Human Machine Interface	人机接口
UPS	Uninterrupted Power Supply	不间断电源
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol	传输控制协议/网络互联协议
FTP	File Transfer Protocol	文件传输协议
API	Application Programming Interface	应用程序接口
IBP	Integrated Backup Panel	综合后备盘
LAN	Local Area Network	局域网
WAN	Wide Area Network	广域网
MTBF	Mean Time Between Failure	平均无故障时间
MTTR	Mean Time To Repair	平均修复时间
SNMP	Simple Network Management Protocol	简单网络管理协议
UPS	Uninterruptible Power Supply	不间断电源
IEEE	Institute for Electrical and Electronic Engineers	美国电气电子工程师学会
GB		中国国家标准
EN		欧洲标准
OTN	Open Transport Network	开放传输网络
OSI	Open System Internet	开放系统互联
PC	Personal Computer	个人计算机
PIIS	Passenger Information and Indication System	旅客向导系统
PSD	Platforms Screen Door	安全门
QoS	Quality of Service	服务质量
RAMS		安全性、可靠性、可用性、可维护性
TB		中国铁道部标准
CIF	Cost Insurance and Freight	到岸价格
UIC		国际铁路联盟
ITU		国际电信联盟
IEC	International Electrician Commission	国际电工委员会
ISO	International Organization For Standardization	国际标准化组织
ANSI	American National Standards Institute	美国国家标准学会
NFPA	National Fire Protection Association	美国全国防火协会
BSI	British Standards Institution	英国标准学会
DIN	Deutsches Institut for Normung	德国标准化学会
JISC	Japanese Industrial Standards Committee	日本工业标准调查会
EIA	Electronic Industries Alliance	美国电子工业协会
CCIR		国际无线咨询委员会标准
ISO9001		质量安全体系标准
ISO14000		环境管理体系标准
RIA	Railway Industry Association	铁路工业协会

目 录

前言	
作者简介	
2017 年中国内地已开通城轨交通线路长度统计表	
轨道交通行业常用中英文对照表	
第 1 章 地铁供电	1
1.1 地铁的概念	1
1.1.1 外部电源及主变电站	4
1.1.2 内桥连接方式及内桥特点	4
1.1.3 外桥连接方式及外桥特点	4
1.1.4 牵引供电	5
1.2 地铁的供电布局及路网基本形式及车辆	7
1.2.1 地铁供电布局	7
1.2.2 地铁环网供电技术的应用形式	8
1.2.3 其他常见的地铁供电方式	9
1.2.4 地铁供电系统的供电方式的选择	10
1.2.5 中压供电系统	11
1.2.6 地铁车站及车辆	11
1.2.7 地铁车辆的组成及路网形式	11
1.2.8 地铁车辆的内部设备	12
1.2.9 地铁车辆的编组原则	12
1.2.10 地铁列车的速度	12
第 2 章 地铁的供（馈）电系统	13
2.1 地铁的交流供电系统及接地系统	13
2.1.1 地铁的交流供电系统	13
2.1.2 地铁变电站的接地系统	15
2.2 地铁供电系统的回路结构与变电站的种类	18
2.2.1 地铁供电系统的回路结构	18
2.2.2 地铁供电系统电压等级和变电站的种类	19
2.3 地铁 110kV/35kV/10kV 供电及直流馈电系统的分析	27
2.3.1 供、馈电的标准	27
2.3.2 直流馈电系统	29
2.3.3 地铁供电系统中母线和母线之间的联络	31
2.4 地铁 400V 低压供电系统及电缆检测	32
2.4.1 地铁 400V 供电系统	32
2.4.2 电缆检测	34
2.4.3 电力电缆绝缘电阻的测量	35
2.4.4 地铁电力设备的绝缘电阻测试	36
2.5 地铁主变电站、子变电站和开闭所的运行与维护	37
2.5.1 主变电站	37
2.5.2 地铁主变电站综合自动化系统	41
2.5.3 子变电站	42
第 3 章 地铁变电站主要设备及运行和维护	50
3.1 主变电站、子变电站变压器的电参数及运行与维护	50
3.1.1 主变电站的主要设备	51
3.1.2 地铁主变电站变压器及其母线的接线方式	53
3.1.3 地铁变压器的额定容量与负荷能力	55
3.1.4 变压器的绝缘老化	56
3.1.5 变压器的日常维护及运行中的检查	56
3.1.6 地铁电力变压器的接线组别及并联规则	57
3.1.7 地铁变配电站的种类	58
3.1.8 变压器并联运行应满足的条件	58
3.1.9 变压器的常见故障、检测、试验及保护	59
3.1.10 地铁变电站变压器的检测、试验	60
3.1.11 对地铁主变压器的运行要求及保护	61

3.2 地铁主变断路器、隔离开关、GIS 组合电器的常见故障分析	65	4.1.11 清扫二次回路注意事项	126
3.2.1 断路器	65	4.1.12 调测二次回路注意事项	127
3.2.2 隔离开关	76	4.2 继电保护、二次回路分析和故障检修	127
3.2.3 GIS	82	4.2.1 继电保护	127
3.3 电压、电流互感器的原理及检修、无功补偿	90	4.2.2 二次回路分析	128
3.3.1 互感器	90	4.2.3 二次回路故障的检修方法	129
3.3.2 互感器的检修	94	4.3 互感器、零序电流互感器及其接线	132
3.3.3 电容器组、SVG 功率模块、滤波及阻波器	96	4.3.1 电流互感器	132
3.4 电抗器、消弧线圈、接地变压器和零序电流的接地保护	100	4.3.2 微机差动保护用电流互感器	134
3.4.1 电抗器	100	4.3.3 电压互感器	136
3.4.2 接地变压器	102	4.3.4 零序电流互感器的原理及应用	137
3.4.3 零序电流的保护	103	4.4 断路器的控制、闭锁、防跳回路和安/秒特性	139
3.4.4 小电流接地系统	104	4.4.1 断路器的控制	139
3.4.5 小电流接地电网单相接地故障的选线装置	105	4.4.2 断路器的防跳（跳跃闭锁）控制回路	141
3.5 故障录波器	107	4.4.3 闭锁回路	143
3.5.1 故障录波器简介	107	4.4.4 断路器的储能回路	144
3.6 避雷器、绝缘子及绝缘电阻摇测、电磁兼容及牵引电动机	113	4.4.5 直流断路器	145
3.6.1 避雷器	113	4.4.6 断路器的安/秒特性	146
3.6.2 绝缘子、绝缘套管	116	4.5 隔离开关的逻辑关系及控制和闭锁回路	148
3.6.3 绝缘电阻及摇测	117	4.5.1 隔离开关	148
3.6.4 电磁兼容	117	4.5.2 隔离开关电气闭锁的原理	150
3.6.5 地铁列车的牵引电动机	119	4.5.3 隔离开关电动机回路	151
第4章 地铁变电站二次回路控制及综合自动化柜、交直流屏的运行与维护	122	4.5.4 电动操作机构操作失灵的处置	152
4.1 地铁变电站二次回路及保护的分类	122	4.6 SVC、SVG、AVC 无功补偿系统及电容器组的投、切	153
4.1.1 地铁变电站二次回路的定义	122	4.6.1 SVC、SVG、AVC 三种无功补偿方式	153
4.1.2 地铁变电站二次回路的作用	122	4.6.2 FC 滤波装置	158
4.1.3 地铁变配电站的继电保护	124	4.6.3 地铁主变电站电容器组运行及投切注意事项	158
4.1.4 微机保护装置	124	4.7 综合自动化柜（信号盘）的原理及控制回路	161
4.1.5 测量二次回路绝缘电阻的方法	125	4.7.1 地铁综合自动化系统	161
4.1.6 二次设备	125	4.7.2 综合自动化计算机操作	167
4.1.7 二次回路	126	4.8 交直流屏的原理及控制回路	170
4.1.8 二次接线图	126	4.8.1 地铁站用微机型交直流屏	170
4.1.9 二次回路电缆截面积	126	4.8.2 地铁交直流屏的作用和原理	171
4.1.10 更换电缆的注意事项	126	4.8.3 直流充电系统中的故障现象	172
4.1.11 清扫二次回路注意事项	126	第5章 地铁变电站电气设备巡视、操作、	
4.1.12 调测二次回路注意事项	127		
4.2 继电保护、二次回路分析和故障检修	127		
4.2.1 继电保护	127		
4.2.2 二次回路分析	128		
4.2.3 二次回路故障的检修方法	129		
4.3 互感器、零序电流互感器及其接线	132		
4.3.1 电流互感器	132		
4.3.2 微机差动保护用电流互感器	134		
4.3.3 电压互感器	136		
4.3.4 零序电流互感器的原理及应用	137		
4.4 断路器的控制、闭锁、防跳回路和安/秒特性	139		
4.4.1 断路器的控制	139		
4.4.2 断路器的防跳（跳跃闭锁）控制回路	141		
4.4.3 闭锁回路	143		
4.4.4 断路器的储能回路	144		
4.4.5 直流断路器	145		
4.4.6 断路器的安/秒特性	146		
4.5 隔离开关的逻辑关系及控制和闭锁回路	148		
4.5.1 隔离开关	148		
4.5.2 隔离开关电气闭锁的原理	150		
4.5.3 隔离开关电动机回路	151		
4.5.4 电动操作机构操作失灵的处置	152		
4.6 SVC、SVG、AVC 无功补偿系统及电容器组的投、切	153		
4.6.1 SVC、SVG、AVC 三种无功补偿方式	153		
4.6.2 FC 滤波装置	158		
4.6.3 地铁主变电站电容器组运行及投切注意事项	158		
4.7 综合自动化柜（信号盘）的原理及控制回路	161		
4.7.1 地铁综合自动化系统	161		
4.7.2 综合自动化计算机操作	167		
4.8 交直流屏的原理及控制回路	170		
4.8.1 地铁站用微机型交直流屏	170		
4.8.2 地铁交直流屏的作用和原理	171		
4.8.3 直流充电系统中的故障现象	172		

检修 176

5.1 35kV 高压开关柜的巡视、操作和检修 176

5.1.1 35kV 高压开关柜 176

5.1.2 35kV 高压开关柜巡视检查 181

5.1.3 35kV 开关柜的日常检修 187

5.1.4 35kV 开关柜操作 191

5.2 400V 开关柜的巡视、操作及检修 197

5.2.1 400V 系统双电源供电方式 197

5.2.2 400V 开关柜的巡视 198

5.2.3 400V 低压开关柜的操作 199

5.2.4 400V 开关柜的日常检修 204

5.3 750V/1500V 直流开关柜的巡视、操作及检修 204

5.3.1 牵引降压混合变电站直流开关柜的配置 204

5.3.2 750V/1500V 直流柜养护、操作及检修作业 208

5.4 动力变压器的巡视、操作及检修 216

5.4.1 动力变压器 216

5.4.2 动力变压器的巡视操作及检修 217

5.5 整流柜的巡视、操作及检修 221

5.5.1 地铁子变电站整流机组 221

5.5.2 整流柜的巡视及检修 222

5.6 综合自动化柜的巡视、操作及检修 226

5.6.1 地铁子变电站综合自动化系统 226

5.6.2 综合自动化系统巡视作业 227

5.6.3 综合自动化系统的操作 230

5.6.4 综合自动化系统的日常检修 236

5.7 交直流屏原理及巡视、操作、检修 239

5.7.1 交、直流屏的定义及作用 239

5.7.2 地铁变电站交直流屏、直流系统的名词解释 241

5.7.3 交、直流屏的工作原理 242

5.7.4 交、直流屏的巡视 243

5.7.5 交、直流屏的日常检修 245

5.8 EPS 原理和巡视、操作、检修 249

5.8.1 EPS 电源的工作原理 249

5.8.2 地铁 EPS 电源的日常巡视 253

5.8.3 EPS 应急电源的检修 254

5.9 双电源切换装置（双切箱）的工作原理和巡视、操作、检修 256

5.9.1 双电源转换开关 256

5.9.2 地铁供电系统中双电源切换装置的巡视作业要求 260

5.9.3 双切箱的操作 262

5.9.4 双切箱的日常检修 264

5.9.5 检修过程中的注意事项 264

5.9.6 作业内容（周期半年） 265

第 6 章 地铁输电线路保护、双边联跳保护、倒闸操作及操作电源 266

6.1 输电线路的保护和双边联跳 266

6.1.1 输电线路的保护和双边联跳原理的分析 266

6.1.2 输电线路的保护原理 267

6.1.3 地铁输电线路的电流保护 269

6.1.4 电网的距离保护 270

6.1.5 双边联跳保护 271

6.1.6 方向过电流保护 273

6.2 倒闸操作 276

6.2.1 倒闸操作的定义 276

6.2.2 倒闸操作前的规定 278

6.3 操作电源 279

6.3.1 操作电源及接线方式 279

6.4 站用交直流系统 282

6.4.1 站用交流系统 282

6.4.2 站用直流系统 285

6.5 二次设备操作及接地系统 288

6.5.1 二次设备操作及接地 288

6.5.2 二次设备接地 292

第 7 章 地铁运营供电系统事故及 SCADA 瘫痪的应急处理 293

7.1 地铁运营事故的分析 293

7.1.1 地铁供电系统应急事故的处理流程 294

7.1.2 值班要求 294

7.1.3 抢修车辆管理 294

7.1.4 料具管理 294

7.1.5 预案编制及修订 294

7.1.6 抢修演练 294

7.1.7 应急信息汇报 295

7.1.8 预案启动 295

7.1.9 应急送电 295

7.1.10 抢修出动 295

7.1.11 现场抢修	296	7.5.2 故障现象和处置	313
7.1.12 抢修作业安全	296	7.6 di/dt 、 ΔI 和框架泄漏保护	314
7.1.13 应急分析	296	7.6.1 直流馈电柜的 di/dt 、 ΔI 和框架 泄漏保护细则	314
7.1.14 火灾、爆炸	296	7.6.2 电流上升率 di/dt 的保护	314
7.1.15 恶劣天气	297	7.6.3 ΔI 电流增量的保护	315
7.2 数据采集与监控系统	297	7.6.4 两种保护的整定值	316
7.2.1 SCADA 的主站系统	297	7.6.5 A-D 转换器	317
7.2.2 SCADA 硬件系统	298	7.6.6 数字式控制和 DCP-116 框架漏电 保护装置	318
7.2.3 SCADA 硬件系统各部件的 功能	298	7.6.7 DCP-116 框架漏电保护装置的 工作原理	319
7.3 SCADA 系统主要功能及故障处置	298	第8章 地铁变电站(所)员工应知应会 (技能考核试卷)	321
7.3.1 地铁 SCADA 系统主要功能	298	8.1 地铁供电值班员工技术应知应会	321
7.3.2 SCADA 系统瘫痪的故障处置	301	8.2 地铁变电站值班员安全知识考核	326
7.4 短路电流及计算	304	8.3 地铁变电站值班员基本技能考核	328
7.4.1 短路电流	304	8.4 地铁变电站值班员消防知识考核	331
7.4.2 短路电流的计算	305	8.5 地铁安全防汛演练	335
7.4.3 供电系统各种元件电抗的计算	305	结束语	337
7.4.4 短路容量和短路电流的计算	307	参考文献	338
7.4.5 双边联跳保护	308		
7.4.6 控制短路电流造成的危害措施	309		
7.4.7 短路冲击电流的计算	310		
7.5 单、双边、跨区供电故障的处置	310		
7.5.1 单、双边供电、跨区供电	310		

地铁供电

1.1 地铁的概念

1. 地铁是地下铁道的简称

它是一种独立的轨道交通系统，不受地面道路情况的影响，能够按照设计的运载能力正常运行，并快速、安全、舒适地运送乘客。地铁效率高，无污染，能够实现大运量的需求，具有良好的社会效益。地铁是有轨交通，其运输组织、功能实现、安全保证均应遵循有轨交通的客观规律。在运输组织方面：实行集中调度、统一指挥、按运行图组织行车；在功能实现方面：各有关专业，如隧道、线路、供电、车辆、通信、信号、车站、机电设备及消防系统均应保证状态良好，运行正常；在安全保证方面：主要依靠行车组织和设备正常运行来保证必要的行车间隔和正确的行车路径。为了保证地铁列车运行安全、正点，在集中调度、统一指挥的原则下，行车组织、设备、车辆检修、设备运行管理、安全保证等均由一系列规章制度来规范。地铁是一个多专业、多工种配合、围绕安全行车这一中心而组成的有序联动是时效性极强的系统。地铁中采用以电子计算机处理技术为核心的各种自动化设备，代替人工的、机械的、电气的行车组织、设备运行和安全保证系统。如 ATC（列车自动控制 Automatic train control）系统可以实现列车自动驾驶、自动跟踪、自动调度；SCADA（数据采集与监视控制 Supervisory Control and Data Acquisition）系统可以实现主变电站、牵引变电站、降压变电站设备系统的遥控、遥信、遥测和遥调；如 ATC（列车自动控制）系统可以实现列车自动驾驶、自动跟踪、自动调度 BAS（环境监控系统，Building Automation System）和 FAS（火灾报警系统 Fire Alarm System）可以实现车站环境控制的自动化和消防、报警系统的自动化；AFC（自动售检票系统 Automatic Fare Collection System）可以实现自动售票、检票、分类等功能。这些系统全线各自形成网络，均在 OCC（运行控制中心 Operation Control Center）设中心计算机，实行统一指挥，分级控制。根据功能的不同，地铁供电系统一般划分为以下几部分：外部电源；主变电站；牵引供电系统、动力照明系统、与之配套的具有杂散电流腐蚀防护系统、电力监控系统。

2. 地铁供电简介

地铁是我国大型城市公共交通的重点发展方向，可靠的供电是地铁安全运营的重要保障，功能强大的地铁供电变电站自动化系统是保证供电质量的基础。地铁供电变电站的一次

设备、运行方式及管理模式与大电网变电站有一定的差异,导致其自动化系统的功能与大电网变电站的功能存在诸多差异。

(1) 一次系统

地铁供电变电站按功能主要划分4种类型:主变电站、牵引变电站、降压变电站和跟随变电站。主变电站将110kV电网电压降为35kV,为牵引变电站和降压变电站供电(电压等级仅为参考值,进口处一次设备可能略有差异,以下同);牵引变电站将35kV交流电经变压器、整流器转换为直流1500V/750V,为接触网/接触轨供电;降压变电站将35kV电网电压降为400V,提供车站的动力和照明电源,同时也是跟随变电站的进线电源;跟随变电站无变压器,是降压变电站400V侧在地理上的延伸,为离降压变电站较远的地铁设备供电。主变电站、降压变电站、跟随变电站与交流电网上的其他变电站并无本质的区别,无论是电气接线方式还是运行方式均与普通变电站类似,只有直流牵引变电站是地铁供电系统所特有的。地铁变电站自动化系统的很多独特之处也多与直流牵引变电站有关。

(2) 系统功能

现代意义的变电站自动化系统的功能在《IEC 61850-5:2003 变电站的通信和系统 第5部分:功能和设备模型的通信要求》中作了系统、全面的阐述。IEC 61850-5将系统的功能从逻辑上分为变电站层、间隔层和过程层3个层次,系统支持功能(如自检、时钟同步)、系统配置或维护功能(如测试、配置参数)、运行或控制功能(如遥控)、本地过程自动化功能(如数据采集、继电保护)、分布式自动化支持功能(如联锁、同期)和分布式过程自动化功能(如顺控、电压无功控制),共6种类别。而传统意义的变电站自动化系统指的是数据采集与监控系统(SCADA)(不包括继电保护等功能)的子站部分,或称为远动终端设备。远动终端设备可以视为现代意义的变电站自动化系统的一部分。

2002年颁布实施的国家标准《GB/T 13729—2002 远动终端设备》,对远动终端设备的功能要求作了明确的规定。铁道行业标准《TB/T 2831—1997 电气化铁道牵引供电远动系统技术条件》则在引用GB/T 13729—1992的基础上,对系统功能做出了针对行业应用的更为具体的要求。地铁变电站自动化系统的功能不仅要符合上述两个有关远动终端设备的标准,还应该尽快向即将推出的《IEC 61850-5—2003 变电站的通信网络和系统 第5部分:功能和设备模型的通信要求》靠拢,将继电保护、故障录波等功能有机地、无缝地融入到自动化系统中。具有地铁变电站典型特征的自动化系统的基本功能如下:

1) 遥控功能 《TB/T 2831—1997 电气化铁道牵引供电远动系统技术条件》提出的功能要求包括6项内容:遥控、遥信、遥测、打印、接口和自检。遥信、遥测、打印、接口和自检功能的要求与《GB/T 13729—2002 远动终端设备》的要求是基本一致的。而遥控功能则赋予了其更多的内涵。地铁变电站自动化系统的遥控功能按受控对象的数量分为单控和程控两种。单控是指对单个对象的控制,也就是通常所指的基本遥控功能;而程控则是对多个对象的程序控制。单控、程控的概念是地铁变电站所特有的,不管是单控还是程控,其内涵均包括控制和相关的联锁两部分。单控联锁功能通常是由受控的间隔层设备来完成的。例如,牵引变电站直流馈线开关的合闸,是由安装于直流开关柜内的保护测控单元来实现的。合闸出口继电器动作以前,必须进行一系列的联锁逻辑判断:首先检查开关是否处于分位,手车是否处于运行位;然后检查是否有合闸闭锁信号;最后进行线路测试,确认无短路后,方可进行合闸。若受控的间隔层设备无联锁功能,则可由变电站层的通信控制器来完成。程

控功能按操作对象和联锁关系分为两个层次:

① 操作对象和联锁关系均在同一变电站内,称为站内程控功能。例如,降压变电站的动力变压器的停电/恢复,需要对相邻的多个断路器进行操作。站内程控功能通常由变电站层的通信控制器来完成。

② 操作对象或联锁关系涉及多个变电站,称为站间程控功能。例如,接触网/接触轨的越区供电,需要对多个牵引变电站的多个直流断路器以及分段隔离开关进行操作。站间程控功能可由某一变电站的通信控制器来完成,也可由运行控制中心(OCC)供电调度主站来完成。前者需将邻站纳入采集和监控的范围,增加了硬件投资,但可脱离OCC供电调度运行;后者只能由OCC供电调度进行操作,对主站的依赖性太高,不利于紧急情况的处理。所以前一个方案更可取。值得一提的是程控并不是简单的多个单控的组合,因为受控的多个对象之间可能存在复杂的联锁或闭锁的关系。而单控仅存在受控对象与其他非受控对象之间的联锁逻辑关系。IEC61850-5中,单控属于控制和分布式联锁功能的组合,而程控属于分布式顺控和分布式联锁功能的组合。

2) 网络通信功能 GB/T13729—2002提出了一些选配功能,其中的网络通信功能也应作为地铁变电站自动化系统的基本功能要求,而不是选配功能。其理由如下:

① GB/T13729—2002仅是远动终端设备的标准,而地铁变电站自动化系统不仅包括远动终端设备的功能。网络通信功能是现代意义的变电站自动化系统区别于传统RTU(远动终端设备, Remote terminal Unit)的本质特征之一。

② 网络通信是今后变电站自动化系统的发展方向。在IEC61850-5中,网络通信是根本,是整个IEC61850-5思想体系的核心和基础。在IEC61850-5对功能的分类中,网络通信不再是独立的功能,因为它已是所有功能的基础。

③ 网络通信已在地铁变电站自动化系统中得到了大量的应用。如本世纪投入运行的上海、广州地铁,正在实施的南京、武汉、重庆等地铁(或轻轨)变电站项目,无一例外地具备了网络通信的功能。事实上,地铁变电站自动化系统不仅已经具备了网络通信功能,而且还在同一个站内具有五花八门的通信硬件和软件协议,这与大电网变电站有很大区别,因为,大电网变电站自动化系统的网络通信已经与《IEC60870-5-103通信规的基本要点》标准统一,而地铁变电站(尤其是牵引变电站)自动化系统间隔层设备的网络通信,由于诸多原因尚无法统一。

在通信网络短时间内不能统一的前提下,地铁变电站自动化系统要能够支持各种通信硬件和网络协议。从长远看,地铁变电站自动化系统的通信网络终将与IEC61850-5统一的。

3) 继电保护功能 继电保护设备与远动终端设备一样,是现代变电站自动化系统的核心设备。自从IEC60870-5-103诞生以来,两者就已经是一个有机的整体,不再是两个孤立的子系统。对于地铁供电领域来说,除了牵引变电站外,其他类型变电站(如主变电站、降压变电站)的继电保护功能与大电网交流变电站的继电保护功能是完全相同的。而牵引变电站采用直流馈线,使其继电保护功能具有显著的差异。目前,国内尚无任何标准对直流牵引变电站的继电保护功能做出完整的描述,笔者通过对国外保护设备的研究,认为应该具备以下功能:

① 所有直流断路器本体必须安装大电流脱扣保护。

② 直流馈线以 di/dt 及 ΔI 保护为主保护, 定时限过电流保护、 $I_{\max}$ 保护或其他类型的保护为后备保护, 同时必须具有自动重合闸的功能, 采用双边供电的还必须具备联跳邻站断路器的功能。

③ 直流进线则必须有逆流保护。

④ 框架保护。地铁直流牵引系统框架保护是供电系统的重要保护, 框架保护动作后将导致断路器的跳闸。框架保护动作后断路器不会自动重合闸, 会造成接触网大面积停电, 影响客运。因此, 框架保护的正确动作对整个牵引供电系统尤为重要。

⑤ 其他保护: 其他的保护功能可根据实际需要选配。

1.1.1 外部电源及主变电站

1) 地铁供电系统的外部电源是地铁供电系统主变电站供电的外部城市所电网电源。外部电源方案的形式有集中式供电、分散式供电、混合式供电。集中式供电通常从城市电网 110kV 侧引入两回路电源, 按照地铁设计规范要求, 至少有一回路电源为专线。

2) 主变电站在地铁供电系统中用于直接接受城市电网的电, 并将其分配给牵引变电站和车站变电站, 因地铁供电系统的第一级变电站而命名, 主变电站的功能是接受城网高压电源 (通常为 110kV), 经降压为牵引变电站、降压变电站提供中压电源 (通常为 35kV 或 10kV), 主变电站适用于集中式供电。主变电站接线方式为线变式或桥型接线, 线变式接线方式用于变电站只有一路进线与一台变压器的接线, 其特点是投资少, 操作简便, 易于扩建。桥形接线适用于仅有两台变压器和两回出线的装置中, 仅有 3 台断路器, 桥形接线属于无母线接线, “桥” 即是回路连接线, 根据桥回路断路器的位置不同, 桥形接线分为内桥和外桥两种接线。内桥: 桥回路置于线路断路器与主变内侧。外桥: 桥回路置于线路断路器与主变外侧。(线路断路器特指低压侧出线断路器)

1.1.2 内桥连接方式及内桥特点

1) 线路操作方便。线路故障, 仅跳开故障线路断路器, 其余线路正常工作。

2) 正常运行时主变操作复杂。若变压器检修或故障时, 需跳开线路侧断路器和桥回路断路器, 使未发生故障线路受影响而短时停电。

3) 桥回路检修或故障时, 两个回路单元失去联系; 同时出线断路器检修时会造成回路停电。

适用于两回路进线、两回路出线, 线路较长且故障可能性较大, 变压器不需要经常切换运行方式的系统。

1.1.3 外桥连接方式及外桥特点

1) 变压器操作方便。如变压器检修或故障时, 仅断开线路侧断路器, 其余回路正常。

2) 线路投入与切除复杂。如线路故障或检修时, 需断开线路侧断路器和桥断路器, 并使本线路变压器短时停电。

3) 桥回路检修或故障时, 两个单元失去联系; 同时出线侧断路器检修或故障时, 造成线路变压器停电。

1.1.4 牵引供电

1. 牵引供电系统

牵引供电是指拖动车辆运输所需电能的供电方式,牵引供电系统的功能按 IEC 标准将交流中压经降压整流变成直流 1500V 或直流 750V 电压,为地铁列车提供牵引供电,系统包括牵引变电站与牵引网,牵引网包括接触网与回流网。接触网有架空接触网(直流 1500V)和接触轨(直流 1500V 或 750V)两种方式,我国地铁基本采用走行轨兼回流轨;目前国外仅美国、加拿大、马来西亚的地铁设置独立的回流轨,就是第四轨,牵引供电站通过接触轨给列车供电,从独立设置的回流轨(不是走行轨)回流,虽然一次投资大,但却解决了杂散电流带来的一切问题。

2. 牵引供电的优点

牵引供电,主要由牵引变电站和接触网两大部分组成。牵引变电站将电力系统输电线路电压从 110kV(或 220kV)降到 35kV(27.5kV),经馈电线送入整流变压器整流后馈入接触网为地铁列车供电。

牵引供电的优越性主要有以下几点:

1) 电力牵引的动力大,生产效率高 电力牵引的能量取于强大的电力系统,牵引动力大,能最大限度适应铁路运输多拉快跑的需要。据有关资料统计,电力牵引的生产效率比内燃机车的生产效率高 50% 以上,对于客货运输繁忙的铁路干线,电力牵引的这种优越性尤为显著。

2) 电力牵引节省能源,经济效益好 一方面电力机车本身的电能转换效率高;另一方面电力的生产能够高效率地综合利用各种廉价的自然能源,这对于节约国家有限的煤炭、石油资源,提高铁路运输的经济效益十分有利。

3) 有利于优化生态环境,改善劳动条件 电力机车运行时不会产生有害气体,对铁路沿线的居民和列车乘客不会造成危害,特别是在多隧道的山区线路,这种无有害气体产生的优点更为可贵。电力机车的司乘人员工作条件好,维护检修工作量小,大大降低了工人的劳动强度。

3. 牵引供电的缺点

- 1) 基本建设投资较大。
- 2) 电力机车的功率因数较低,高次谐波含量较大等因素都会给电力系统造成不良的影响。
- 3) 对铁路沿线附近的通信线路造成一定的电磁干扰。
- 4) 接触网需要停电检修,要求在列车运行图中留有一定的天窗时间,在此时间内,列车要停止运行。

4. 动力照明供电系统

地铁的动力照明供电系统是地铁车站建设的重要组成部分,与车站的安全、稳定运行息息相关,与车站及相应区间范围大部分机电设备相关联,为其配电,并且实现保护和控制。动力照明供电系统的功能是将交流中压(35kV 或 10kV)降压变成交流 400V 电压,为运营需要的各种机电设备提供 220/380V 交流电源。其范围主要包括配电变压器后的低压柜、交直流盘馈出的电缆至车站的动力、照明、通信、信号等设备,系统范围大致为站台层、站厅

层、设备及管理用房的环控、排水、消防、电梯、自动扶梯、自动售、检票及站控室等。

5. 杂散电流腐蚀防护系统

城市轨道交通工程采用直流牵引供电系统，通过架空接触网或接触轨受电，利用列车走行钢轨作为负回流线。列车运行时，牵引电流沿钢轨流回牵引变电站时在钢轨上形成电压降，从而导致钢轨与大地之间产生电位差而引起泄漏电流，即杂散电流。杂散电流容易对土建结构钢筋、设备金属外壳及其他地下金属管线产生电化学腐蚀，即杂散电流腐蚀。杂散电流腐蚀防护系统的功能是减少因直流牵引供电回流轨对地泄漏杂散电流（迷流）并防止其对外扩散，尽量避免杂散电流对城市轨道交通主体结构及其附近结构钢筋、金属管线的电腐蚀，并对杂散电流及其腐蚀保护情况进行监测。由于轨道交通结构中杂散电流很难直接测量，所以腐蚀危险性指标只能采取间接指标（泄漏电流引起的电位极化偏移（电压）值）来表示。《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》中规定，结构外表面受杂散电流腐蚀危害的控制指标用泄漏电流引起的结构电压偏离其自然电位的数值来表示（ ΔV ）。对于钢筋混凝土材质的轨道交通主体结构钢筋，其极化电压的正向偏移平均值不应超过 0.5V。

6. 数据采集与监控系统（SCADA）

数据采集与监控系统（Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA）的主要功能是对供电设备（包括变电及接触网设备）进行监视、控制和采集。数据采集与监控系统的主要设备设置在控制中心。远程控制终端设备 RTU（Remote Terminal Unit, 远程测控单元装置）设置在各变电站内，RTU 通过通信网络 OTN（Open Transport Network, 开放式传输）与控制中心设备相连接，控制中心命令由 OCC（Operating Control Center, 运行控制中心）发往各 RTU，再由 RTU 传向供电系统，供电系统的信息通过 RTU 传向控制中心。SCADA 系统所有计算机和 RTU 都有自监功能，系统设备具有高度可靠性，各设备状态可在 CRT（cathode raytube, 显示器）上显示。数据采集与监控系统的功能是实时对地铁变电站、接触网设备进行远程数据采集和监控。在城市轨道交通控制中心，通过调度端、通信通道和变电站综合自动化系统对主要电气设备进行四遥控制，实现对整个供电系统的运营调度和管理。

7. 我国地铁供电的负荷类型

1) 我国地铁供电负荷类型在《GB50157—2013 地铁设计规范》中针对动力照明供电系统有以下规定

① 动力照明供电系统应包括降压变电站与动力照明配电系统。

② 动力照明的用电负荷应按照用电可靠性要求及失电影响程度分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。

③ 一级负荷必须采用双电源双回线路供电。

④ 一级负荷中特别重要的负荷，除有双电源双回线路供电外，应增设应急电源，并严禁其他负荷接入。

⑤ 二级负荷宜采用双电源单回线路专线供电。

⑥ 三级负荷可采用单电源单回线路供电。

⑦ 当系统中只有一个电源工作时可切除三级负荷。

2) 地铁用电设备的负荷等级应符合下列规定

① 一级负荷 火灾自动报警系统设备、防排烟风机及各类防火排烟阀、防火（卷帘）门、消防疏散用自动扶梯、消防电梯、应急照明、主排水泵雨水泵、防淹门及火灾或其他灾