

城市轨道交通系列

城市轨道交通概论
城市轨道交通专业英语
城市轨道交通车站设备
城市轨道交通车辆构造
城市轨道交通车辆检修
► 城市轨道交通供电技术
城市轨道交通班组管理

城市轨道交通通信技术
城市轨道交通信号技术
城市轨道交通客运组织
城市轨道交通行车组织
城市轨道交通票务管理
城市轨道交通运营安全
城市轨道交通服务礼仪

高等职业教育城市轨道交通系列创新教材

城市轨道交通供电技术

高等职业教育城市轨道交通系列创新教材

城市轨道交通供电技术

回文明 主编

策划编辑: 刘 建
责任编辑: 徐 伟 李 健
封面设计: 李 甲



定价: 36.00元

中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

高等职业教育城市轨道交通系列创新教材



城市轨道交通供电技术

主 编 回文明

副主编 袁长明 罗玉柱

 中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

山东·青岛

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通供电技术/回文明主编. —青岛:
中国石油大学出版社, 2015. 1(2024. 1 重印)
ISBN 978-7-5636-4574-9
I. ①城… II. ①回… III. ①城市铁路—供电系统
IV. ①U239. 5
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 274036 号

如有印装质量问题, 请与中国石油大学出版社发行部联系。
服务电话: 400-615-1233

书 名: 城市轨道交通供电技术

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG GONGDIAN JISHU

主 编: 回文明

责任编辑: 徐 伟 李 健

封面设计: 李 甲

出 版 者: 中国石油大学出版社

(地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编: 266580)

网 址: <http://cbs.upc.edu.cn>

电子邮箱: uppbok@upc.edu.cn

排 版 者: 华腾教育排版中心

印 刷 者: 三河市龙大印装有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 010-88433760)

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 11

插 页: 1

字 数: 268 千字

版 印 次: 2015 年 1 月第 1 版 2024 年 1 月第 6 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-4574-9

定 价: 36.00 元

总

序

Foreword

随着我国经济持续快速发展和城市规模不断扩大,城市交通需求急剧膨胀,地面交通容量迅速饱和,交通能力和交通需求之间的矛盾日益突出。同时,环境保护也对城市交通提出了新要求。在此形势下,城市轨道交通成为改善城市交通状况和缓解环境污染的有效途径。全国多个大中城市已经或者计划开展城市轨道交通建设,根据中国城市轨道交通协会统计,截至 2023 年 9 月 30 日,中国内地共有 58 个城市开通城市轨道交通运营,运营线路总长度达到 10 841.59 km。城市轨道交通凭借其运能大、速度快、能耗低、污染少、安全、准点等特点,已经成为缓解城市交通压力的最主要工具之一。

由于我国大部分城市轨道交通建设起步较晚,项目建设规模较大,且速度快,导致专业人才跟不上形势发展,供不应求。各地职业院校纷纷开设了城市轨道交通相关专业来适应城市轨道交通建设和运营需要大量高素质专业技术人员的要求。为了促进和规范城市轨道交通系列教材体系的建设,适应当前职业教育“校企合作,工学结合”的教学改革形式,我们特组织一批具有丰富教学经验的一线教师和企业人员编写了这套城市轨道交通系列规划教材。

本系列教材具有如下特色。

(1)严格按照国家相关标准和技术规范,并结合国内各大城市城市轨道交通建设运营实际情况,以项目教学的形式进行编排。

(2)突出职业教育的特色,教材内容的组织围绕职业能力的培养,侧重于实际工作岗位操作技能的培养。

(3)注重基本理论知识学习和动手能力训练相结合,根据需求和实际情况有针对性地设置实训环节,以增强学生的实际操作能力。

(4)注重城市轨道交通岗位需求和学生职业发展相结合,强调以学生为中心,满足培养面向城市轨道交通建设、运营、管理一线需要的高素质技术技能人才的目标要求。

为支持“立体化”教学,我们为本系列教材精心策划了精品教学资料包,向教师免费提供课程标准、教学课件、教学检测、教学资源推荐、课后习题答案、图片库、视频库等资源,以支持网络化及多媒体等现代教学方式,有效提升教学质量。

希望各职业院校在使用本系列教材的过程中提出宝贵的意见和建议,我们将认真听取,不断完善。

编审委员会

前

言

Preface

当前,我国经济持续快速发展,城市规模不断扩大,导致城市交通需求急剧增长。为了解决因地面交通运量不足而导致的问题,全国多个大中城市已经开展或者计划开展城市轨道交通建设。在此形势下,社会对城市轨道交通人才的需求也越来越迫切。

城市轨道交通供电技术是城市轨道交通相关专业的一门专业课程。学生通过本课程的学习,应能熟悉城市轨道交通供电系统的功能和工作模式,掌握城市轨道交通供电系统的构成及各组成部分的要求与作用,初步具备对城市轨道交通供电系统进行操作、维护和管理等方面的技能。

本书紧密结合城市轨道交通相关岗位的要求,根据城市轨道交通供电系统的实际构成与运行维护能力的需要组织教学内容,以达到培养面向城市轨道交通建设、运营、管理一线的高素质技术技能型人才的目标。本书内容严格按照国家相关标准和技术规范,并结合国内各大城市轨道交通建设运营实际情况,以项目教学的形式进行编排。

本书各项目的建议学时安排如下表所示。

内 容	学 时
项目一 认识供配电系统	6
项目二 认识城市轨道交通供电系统	6
项目三 城轨电源与主变电所	8
项目四 城轨牵引供电系统	8
项目五 城轨供配电系统	8
项目六 城轨供电系统的二次系统	8
项目七 城轨电力监控系统	6
项目八 城轨杂散电流防护系统	6
项目九 城市轨道交通接触网	8
总计	64



本书由石家庄铁路职业技术学院回文明任主编,袁长明、罗玉柱任副主编。具体编写分工为:回文明编写项目一至项目五,袁长明编写项目六至项目八,罗玉柱编写项目九。全书由回文明统稿。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

**项目一 认识供电系统..... 1**

学习目标 1

任务一 供电系统基本知识 2

一、供电系统的组成和特性 2

二、供电系统的电压 3

三、供电电能质量指标 4

四、负荷分级及供电要求 5

任务二 供电系统中性点运行方式 6

一、电力系统中性点运行方式 6

二、低压配电系统中性点接地方式 7

任务三 认识常用电气设备 10

一、电气设备的分类与要求 10

二、城轨供电系统设备配置 12

学习评价 16

**项目二 认识城市轨道交通供电系统 17**

学习目标 17

任务一 了解城轨供电系统的功能与要求 18

一、城轨供电系统的功能 18

二、城轨供电系统的基本要求 19

任务二 掌握城轨供电系统的构成 20

一、按系统功能划分 22

二、按设计任务划分 23

三、牵引网供电制式 23

任务三 城轨供电系统的电磁兼容措施 24

一、抑制骚扰源 24

二、消除或减弱骚扰耦合 26

三、提高敏感设备的抗干扰能力 26

学习评价 27

**项目三 城轨电源与主变电所 29**

学习目标 29

任务一 城轨供电系统外部电源系统 30

一、外部电源供电方式 30



二、外部电源供电方案的比选	32
三、电源外线的设计	33
任务二 城轨供电系统主变电所	34
一、所址选择	35
二、高压侧主接线	35
三、中压侧主接线形式	37
四、主变压器的选择	37
任务三 认识中压网络	39
一、中压网络的电压等级	39
二、中压网络的构成形式	40
三、新型中压网络	44
四、中压网络中应处理的几个关系	46
五、供电系统的运行方式	47
学习评价	52
 项目四 城轨牵引供电系统	55
学习目标	55
任务一 牵引变电所的设置	56
一、牵引变电所布点	56
二、牵引变电所选址	60
任务二 牵引变电所主接线	62
一、牵引变电所主接线的要求	62
二、中压主接线	63
三、直流主接线	66
任务三 认识牵引整流机组	72
一、整流机组的作用及要求	72
二、24 脉波整流机组的构成	72
三、24 脉波整流原理	73
学习评价	77
 项目五 城轨供配电系统	79
学习目标	79
任务一 认识城轨供配电系统	80
一、城轨供配电系统概述	80
二、降压变电所概述	80
三、动力照明系统	82
任务二 降压变电所设置	84
一、降压变电所布点	84
二、降压变电所的选址	85
任务三 降压变电所主接线	86
一、降压变电所主接线的要求	86



二、中压主接线	86
三、低压主接线	89
学习评价	91
 项目六 城轨供电系统的二次系统	93
学习目标	93
任务一 认识二次系统	94
一、二次系统的功能	94
二、二次系统的组成	94
任务二 城轨供电系统的控制	96
一、控制方式	96
二、电气设备的控制与联锁	98
三、电气设备间的控制与联锁	99
四、系统运行控制与联锁	104
任务三 城轨供电系统的保护	108
一、对保护装置的要求	108
二、城轨供电系统的保护设置	109
三、交流系统的主要保护形式	110
四、直流系统的主要保护形式	114
学习评价	120
 项目七 城轨电力监控系统	121
学习目标	121
任务一 认识电力监控系统	122
一、电力监控系统的作用	122
二、电力监控系统的一般要求	122
三、电力监控系统的构成	123
任务二 电力监控系统的功能	127
一、控制和操作功能	128
二、数据采集与处理功能	129
三、显示功能	130
四、报警功能	131
五、系统权限管理功能	131
六、历史数据的备份与复原	131
学习评价	131
 项目八 城轨杂散电流防护系统	133
学习目标	133
任务一 杂散电流的产生与危害	134
一、杂散电流的产生	134
二、杂散电流的腐蚀原理	135
三、杂散电流的危害	136



	任务二 杂散电流的防护与监测	136
	一、控制杂散电流的产生	136
	二、设置杂散电流收集装置	138
	三、杂散电流监测装置	140
	学习评价	142
	项目九 城市轨道交通接触网	143
	学习目标	143
	任务一 认识城轨接触网	144
	一、牵引网的组成	144
	二、接触网的工作特点	145
	三、接触网的基本要求	145
	四、接触网的分类	146
	五、接触网的供电方式	146
	任务二 了解接触轨系统	146
	一、接触轨的组成	146
	二、接触轨的授流方式	151
	任务三 认识柔性架空接触网	153
	一、柔性架空接触网的组成	153
	二、接触悬挂的类型	154
	三、柔性架空接触网的主要构件	156
	任务四 认识刚性架空接触网	161
	一、刚性架空接触网的特点	161
	二、刚性架空接触网的结构	161
	学习评价	165
	参考文献	167

1

项目一

认识供配电系统

学习目标

- 掌握供配电系统的构成。
- 了解供配电系统的电压及额定电压的确定方法。
- 了解电力负荷的等级及供电要求。
- 掌握供配电系统中性点的运行方式。
- 了解城轨供电系统选用的一次设备类型。



电能属于二次能源,是现代社会的重要能源,在生产、生活、运输等各领域得到广泛应用。城市轨道交通的电源来自城市电网,所以城市轨道交通供电系统就是城市供电系统的一个电能用户。城市电网的布局对城市轨道交通供电系统的设计方案具有决定作用,其供电能力和供电质量直接影响城市轨道交通供电系统的安全性与可靠性,从而直接影响城市轨道交通系统的运行安全和费用。那么电能是如何产生的?如何输送到各用户?供电系统又是如何运行的?在本项目中将逐一讲解。

任务一

供配电系统基本知识

供配电系统就是电能的供应和分配系统,包括电能的生产、输送、分配和应用各环节。为了能够连续、优质地为各用户提供电能,国家制定了多项与供配电系统相关的标准和规范。

一、供配电系统的组成和特性

供配电系统包括电力系统和配电系统,电力系统一般指 35 kV 及以上的输电网络,配电系统指 10 kV 及以下的配电网。

1. 电力系统的组成

由发电厂的发电机、升压及降压变电设备、电力网及电能用户构成的发电、输电、变配电和用电的整体称为电力系统。

(1) 发电厂是生产电能的场所,利用发电机将自然界的煤、水力、核能、风力、太阳能等一次能源转换成方便传输和应用的二次能源——电能。

(2) 电力网的主要功能是变换电压和输送电能,负责将发电厂的电能输送给电力用户,它由各类变电所和不同电压等级的线路连接组成。电力网的电压等级一般在 10 kV 以上,是电能的输送通道。

(3) 配电系统(电力用户)位于电力系统的末端,负责将电能传输、分配给电力用户。配电系统的电压等级一般在 110 kV 及以下,是电能的分配通道。

2. 配电系统的组成

配电系统是电力系统的一个组成部分,负责输送、分配和应用电能。

(1) 供电电源一般取自电力系统的电力网,由地区(区域)变电所的 35 kV 或 10 kV 电压供电;在使用城市电网不便的情况下也可以由用户自备的发电机供电。

(2) 配电网的作用是接受电力网的电能,将其变换为适合的电压,经过电能分配后通过输电线路安全、可靠、经济地输送给各种用电设备。它主要由用户的总降压变电所(或高压配电所)、高压输电线路、降压变电所(或配电所)和低压输电线路组成。

(3) 用电设备指专门消耗电能的电气设备,将电能转换成需要的其他形式的能量,如机械能、热能、光能等。用电设备根据额定电压分为高压设备和低压设备,高压设备的额定电压一般在 1 kV 以上,低压设备的额定电压一般为 220/380 V。

配电系统在结构上与电力系统极其相似,它实际上是电力系统的电力用户,由电力系统中的电网供电。



3. 电力系统的特性

(1)电力系统是一个有机整体,电力系统中任何一个主要设备出现非正常运行状况,都会影响整个系统的正常运行。

(2)电力系统时刻处在动态平衡的相对稳定之中。发电厂发出的交流电不能大量存储,要求电能的生产、输送、分配和使用必须同时进行,而且要保持动态平衡状态。能量的转换以功率的形式表现,要时刻保持电力系统有功功率和无功功率的平衡。

(3)随机变化、实时调整。电力系统的运行状态是动态变化的,除了设备的计划停送电外,异常和事故对系统的冲击是随机的;正常情况下,电力系统的负荷和机组出力的变化也是随机的。所以,各级调度部门必须运用一切手段不断进行调节和控制,以维持电力系统的平衡。

(4)易实现自动化,分配控制简单,可进行远距离自动控制。

二、供配电系统的电压

根据三相功率 S 与线电压 U 、线电流 I 的关系 $S = \sqrt{3}UI$ 可知,在输送功率一定的情况下,电压越大则电流越小,有利于减少线路上的电压损失和电能损耗,也可减小导线截面以节约有色金属。但电压越高对线路和设备的绝缘能力与灭弧能力的要求也越高,所以所需的投资也相应增加。因而在供配电系统中对应一定的输送功率和输送距离,均有相应技术上的合理输送电压等级。

1. 额定电压

额定电压就是用电设备、发电机和变压器正常工作时具有最佳技术经济指标的电压。为了便于设备制造的标准化和系列化,我国颁布了额定电压的国家标准。根据国家标准《标准电压》(GB/T 156—2007)规定,额定电压等级分为 3 类:第 1 类是 100 V 以下的安全电压,用于直流控制、操作电源、蓄电池和安全照明用具等电气设备;第 2 类是 100~1 000 V 的电压,用于一般工业和民用电气设备;第 3 类是 1 000 V 以上的电压,用于发电、变电、输电、配电和高压电气设备。我国三相交流电网、发电机和电力变压器的额定电压如表 1-1 所示,各级电压电力线路合理的输送功率和输送距离如表 1-2 所示。

表 1-1 我国三相交流电网、发电机和电力变压器的额定电压

分 类	电网和用电设备 额定电压/kV	发电机额定 电压/kV	电力变压器额定电压/kV	
			一次绕组	二次绕组
低压	0.38	0.40	0.38	0.40
	0.66	0.69	0.66	0.69
高压	3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
	6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
	10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
	—	13.8、15.75、18、20	13.8、15.75、18、20	—
	35	—	35	38.5
	66	—	66	72.6
	110	—	110	121
	220	—	220	242
	330	—	330	363
	500	—	500	550



表 1-2 各级电压电力线路合理的输送功率和输送距离

线路电压/kV	线路类型	输送功率/kW	输送距离/km
0.22	电缆	≤ 100	≤ 0.20
0.38	电缆	≤ 175	≤ 0.35
6	架空	$\leq 2\,000$	3~10
	电缆	$\leq 3\,000$	≤ 8
10	架空	$\leq 3\,000$	5~15
	电缆	$\leq 5\,000$	≤ 10
35	架空	1\,500~2\,000	20~50

需要指出的是,750 kV 及以上超高压虽然不是我国的标准电压等级,但已经在部分输电网有所应用;20 kV 虽然不属于国家标准额定电压,但在输电能力和设备造价上具有明显优势,已经在配电网络中应用,将来有可能应用于城市轨道中压网络。

我国铁路牵引电压为交流 25 kV,城市轨道交通牵引电压为直流 1 500 V 和 750 V,属于行业特殊电压等级。

2. 额定电压的确定

1) 电网的额定电压

电网(电力线路)的额定电压是指线路首末两端电压的平均值,是国家根据国民经济发展的需要和电力工业的水平经技术经济分析后确定的,是确定其他电力设备和用电设备额定电压的依据。

2) 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压与同级电路线路的额定电压相同。

3) 发电机的额定电压

由于电网在传输电能时有电压损耗,所以发电机的额定电压比同级电网的额定电压高 5%。

4) 变压器的额定电压

变压器与发电机相连时,其一次绕组额定电压与发电机额定电压相同,即比同级电网的额定电压高 5%;变压器与电网相连时,其一次绕组额定电压与线路额定电压相同,即等于同级电网额定电压。

变压器二次绕组的额定电压要考虑变压器自身的电压损耗和输电线路的电压损耗。当变压器距离用户较近时,可不考虑线路电压损耗而只考虑变压器自身的电压损耗,此时二次绕组额定电压比同级电网高 5%;当变压器距离用户较远时,要同时考虑自身电压损耗和线路电压损耗,此时二次绕组的额定电压比同级电网高 10%。

三、供电电能质量指标

电能质量指标是指供配电装置在正常情况下不中断、不干扰用户使用电能的指标,表征了供配电系统工作的优劣。供电质量要从安全性、可靠性、优质性和经济性几方面综合



评价。

1. 频率偏差

频率偏差指供电实际频率与电网标准频率的差值。我国电网的标准频率为 50 Hz, 通常称为工频。频率变化对电力系统运行的稳定性不利, 调整频率主要依靠调节发电机的转速来实现。在实际供电系统中频率是不可调的, 只能通过提高电压的质量来提高供电系统的电能质量。

当电网容量大于 3 000 MW 时, 频率偏差不允许超过 ± 0.2 Hz; 当电网容量小于 3 000 MW 时, 频率偏差不允许超过 ± 0.5 Hz; 在电力系统非正常情况下, 供电频率偏差不应超过 ± 1 Hz。

2. 电压偏移

电压偏移指用电设备的实际端电压 U 偏离额定电压 U_N 的百分比, 计算公式为

$$\Delta U_N = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1-1)$$

产生电压偏移的主要原因是系统滞后的无功负荷和线路损耗所引起的系统电压损失。10 kV 及以下三相配电系统的电压偏移允许值是 $\pm 7\%$, 220 V 单相配电系统的电压偏移允许值是 $+7\%$ 、 -10% ; 在供电系统非正常运行情况下, 用户受电端的电压偏移允许值是 $\pm 10\%$ 。

3. 电压波动

电压在某一时段内急剧变化而偏离额定值的现象称为电压波动, 其程度通常以电压幅度波动值和电压波动频率来衡量。电压波动主要由用户负荷的剧烈变化引起。例如, 大型晶闸管整流装置、电焊机、大功率电动机的启动等都会引起电压波动, 从而直接影响系统中其他电气设备的正常运行。电压幅度波动的相对值为

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} \times 100\% \quad (1-2)$$

4. 电压正弦波畸变

电力系统中存在大量的非线性供电设备, 使得电压波形偏离正弦波, 这种现象称为电压正弦波畸变。电压波形的畸变程度用电压正弦波畸变率来衡量, 也称为电压谐波畸变率。电压正弦波畸变会影响某些电气设备的正常工作。

5. 供电可靠性

供电可靠性指标是根据用电负荷的等级要求制定的, 用全年平均供电时间占全年时间的百分比来表示。绝对可靠的供电系统是不存在的, 可以通过合理的供电方案和保护装置隔离事故、减小事故范围, 尽快恢复供电, 维持较高的供电可靠性指标, 但也要考虑经济性。

四、负荷分级及供电要求

负荷指发电机或变电所供给用户的电力, 即电气设备(发电机、变压器)和线路中通过的功率或电流。为方便应用, 设备负荷通常用功率表示, 而线路负荷用通过的电流值来表征。发电机、变压器等电气设备的负荷指其输出功率, 而电动机类用电设备的负荷指其输入功率。



1. 负荷的分级

电力负荷应根据供电可靠性及中断供电在政治、经济上所造成的损失或影响程度分为三级。

城市轨道交通的通信、信号、电力牵引、车站通风、消防等重要设备属一级负荷。

2. 供电要求

(1) 一级负荷应由两个电源供电, 当一个电源发生故障时, 另一个电源不应同时受到损坏。一级负荷中特别重要的负荷, 除由两个电源供电外, 还应增设应急电源, 并严禁将其他负荷接入应急供电系统。可作为应急电源的有独立于正常电源的发电机组, 供电网络中独立于正常电源的专用的馈电线路、蓄电池、干电池。

(2) 二级负荷的供电系统应由两个回线路供电。

(3) 三级负荷的供电无特殊要求, 但是也应该尽量保证供电的可靠性。

任务二

供配电系统中性点运行方式

为了提高供配电系统的安全性、可靠性和经济性并且保证人身安全, 供配电系统的不同位置常采用不同的中性点接地方式。电力系统中性点常采用不接地、经消弧线圈接地、直接接地和经低电阻接地 4 种运行方式, 低压电网采用 TN 系统、TT 系统、IT 系统 3 类接地系统。

一、电力系统中性点运行方式

电力系统中发电机的三相绕组和变压器高压侧绕组通常为星型联结, 星型绕组的联结点称为中性点, 系统接地方式的实质就是中性点的接地方式。

1. 中性点直接接地系统

中性点直接接地系统称为大接地电流系统, 指系统中性点经金属导线直接与大地相接, 中性点电压为地电位。正常运行时, 中性点无电流通过; 单相接地时构成单相短路, 将会产生很大的故障电流和零序电流, 继电保护在此电流的启动下, 迅速将故障线路切除。为了提高供电可靠性, 可在线路上加装自动重合闸装置。

采用中性点直接接地方式的系统对线路绝缘水平的要求较低, 能明显降低线路造价。其缺点之一是单相接地短路对附近的通信线路有电磁干扰。我国 110 kV 及以上电压等级的电力系统多采用大接地电流系统, 在接有单相负载的低压 220/380 V 配电系统中一般也采用该接地方式。

2. 中性点不接地系统

中性点不接地系统是指系统中性点对地绝缘。正常运行时, 电力系统的三相导线之间及各相对地之间, 沿导线全长都分布有电容, 这些电容在电压作用下将有附加的电容电流通过。单相接地后系统的三相对称关系并未破坏, 线电压不变, 中性点的电压上升到相电压, 非故障相对地电压值增大为 $\sqrt{3}$ 倍相电压, 接地点的短路电流是正常运行的单相对地电容电



流的 3 倍,故中性点不接地系统可以带故障继续运行。

我国配电网大多采用中性点不接地方式,因为该接地方式在发生单相接地故障时系统还是对称的,一般可以带故障连续供电 2 h,为排除故障赢得了时间,相对提高了供电的可靠性,而且不需要任何附加设备,投资小,只需安装绝缘监视装置,以便及时发现单相接地故障。

目前,我国中性点不接地系统适用于电压等级在 500 V 以下的三相三线制系统、接地电流小于或等于 30 A 的 3~10 kV 系统、接地电流小于或等于 10 A 的 20~35 kV 系统、与发电机有直接电气联系的 3~20 kV 系统。

3. 中性点经阻抗接地系统

中性点经阻抗接地系统是指在系统中性点与大地之间用一消弧线圈相连的接地方式,在系统发生单相接地故障时,消弧线圈产生的电感电流补偿单相接地电容电流,以使通过接地点电流减少并能自动灭弧。消弧线圈接地方式在技术上不仅拥有了中性点不接地系统的所有优点,还避免了单相故障可能发展为两相或多相故障、产生过电压损坏电气设备绝缘和烧毁电压互感器等危险。中性点经消弧线圈接地的电网发生单相接地故障时,故障电流很小,所以它属于小接地电流系统。根据接地电阻值的大小,该系统分为高电阻接地和低电阻接地两种方式。

高电阻接地方式接地电流较小,通常在 5~10 A 范围内,但至少应等于系统对地的总电容电流。此接地的保护方式需要配合接地指示器或警报器,保证故障时线路立即跳脱。

低电阻接地方式增大了接地短路电流,使保护迅速动作,切除故障线路。接地电阻的大小必须使系统具有足够的最小接地故障电流,保证接地继电器准确动作。

目前,我国大城市的配电网大多采用中性点经低电阻接地的方式。

二、低压配电系统中性点接地方式

在低压配电系统中,广泛采用中性点直接接地的运行方式,而且引出有中性线(N)、保护线(PE)和保护中性线(PEN)。中性线用来引出单相电源、传输三相系统中的不平衡电流和单相电流,还可以减小负荷中性点的电位偏移。保护线是为了保护人身安全,防止发生触电事故而设的接地保护线。保护中性线兼具中性线和保护线的作用。

低压电网有三类接地方式,分别是 TN 系统、TT 系统和 IT 系统,其中 TN 系统又分为 TN-C、TN-S、TN-C-S 三种。第一个字母表示电源中性点的对地关系,第二个字母表示装置外露可导电部分的对地关系,横线后的字母表示中性线和保护线的关系。

1. TN 系统

TN 系统即保护接零系统,有 TN-C、TN-S、TN-C-S 三种接线方式。T 表示电源中性点直接接地;N 表示设备外露可导电部分与配电网中性点直接相连,即与配电网保护零线相连,所以称为保护接零系统;C 表示中性线和保护线合并为保护中性线,S 表示中性线和保护线分别设置。



1) TN-C 系统

TN-C 系统由三根相线和一根 PEN 线构成,所以也称为三相四线制系统,如图 1-1(a)所示。在该系统中,设备外露可导电部分接在 PEN 线上。当系统存在不平衡三相负荷或单相负荷时,PEN 线上有电流通过,电气设备的外露可导电部分有对地电压。由于保护线不得断线,因而 PEN 线在进入建筑物前应重复接地。

TN-C 系统适用于正常运行时三相负荷基本平衡的情况,也适用于 220 V 的单相设备及便携式用电设备。

2) TN-S 系统

TN-S 系统由三根相线、一根 N 线和一根 PE 线共五条线构成,故也称为五线制系统,如图 1-1(b)所示。在该系统中,设备外露可导电部分直接接到 PE 线上。PE 线在正常时没有电流通过,当电气设备发生漏电事故或接地故障时有电流通过,使保护迅速切除故障,保证操作人员的安全。

PE 线和 N 线的区别有以下几点。

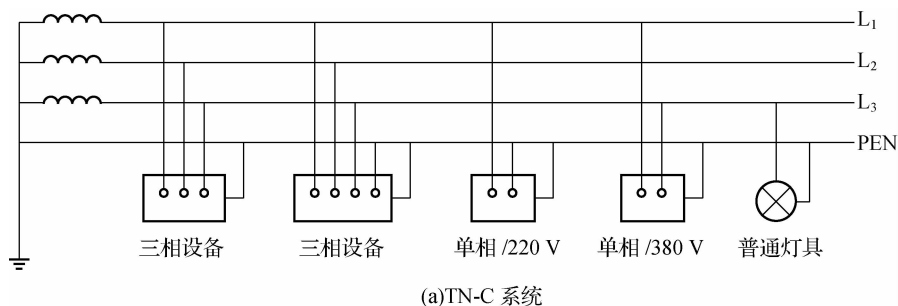
- (1) PE 线是专用保护接地线, N 线是工作零线。
- (2) PE 线在正常时无电流通过, N 线在三相负荷不平衡或有单相负荷时可能有电流通过。
- (3) PE 线用黄、绿双色表示, N 线用黑色或淡蓝色表示。
- (4) PE 线不得进入漏电保护器, N 线可以。
- (5) 在照明支路中, PE 线必须用铜线,截面积不得小于 2.5 mm^2 ,而 N 线截面积根据计算负荷确定。

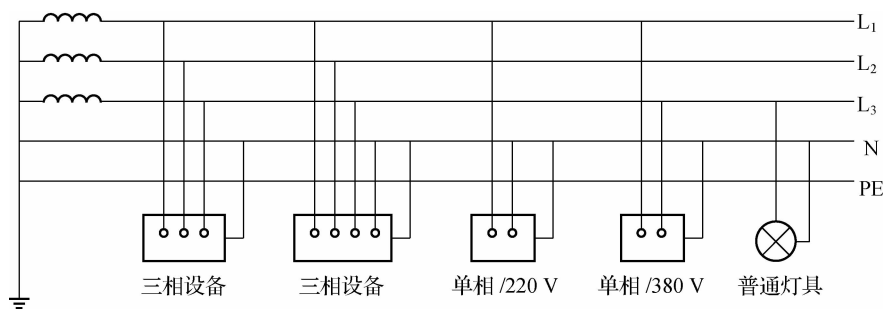
TN-S 系统适用于工业与民用建筑等低压供电系统,是目前我国低压系统中普遍采用的接地方式。

3) TN-C-S 系统

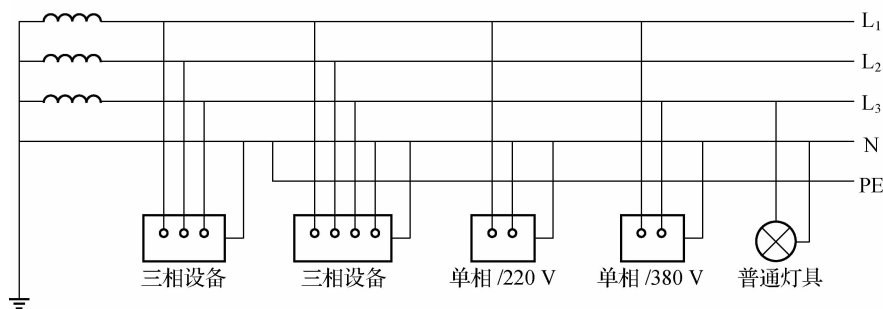
TN-C-S 系统是在 TN-C 系统的末端将 PEN 线分开为 PE 线和 N 线,分开后不允许再合并,如图 1-1(c)所示。此系统前面部分具有 TN-C 系统的特点,后面部分具有 TN-S 系统的特点。

该系统适用于工业建筑和民用建筑,也可用于新建住宅小区的供电系统,一般在电源进户总配电箱处将 PEN 线分为 PE 线和 N 线。





(b)TN-S 系统



(c)TN-C-S 系统

图 1-1 TN 系统接地方式

2. TT 系统

TT 系统是配电网中性点和电气设备外露可导电部分分别接地的系统,外露可导电部分采用各自的 PE 线直接接地,如图 1-2 所示。

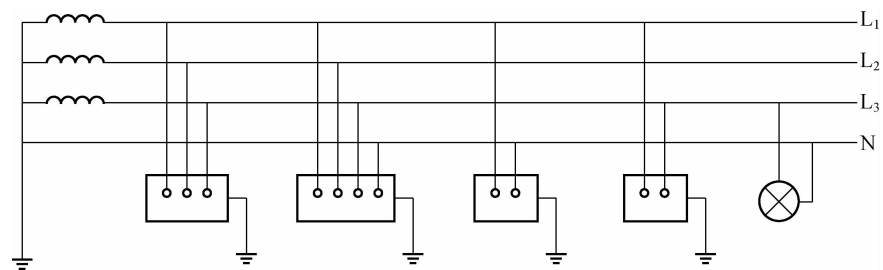


图 1-2 TT 系统接地方式

在 TT 系统中,当电气设备的外露可导电部分带电时,接地保护装置可以减少触电危险,但低压断路器不一定动作,所以外露可导电部分对地电压有可能超过安全电压。当漏电电流较小时,需加漏电保护器。接地装置的接地电阻应保证接地电压小于 50 V,并当出现单相接地故障时能在规定的时间内切断供电线路。

TT 系统主要用于低压共用用户,即用于未装备配电变压器,从外面直接引进低压电源的小型用户,如小型车间 220/380 V 照明负荷、动力负荷等。



3. IT 系统

IT 系统即保护接地系统,主要用于配电网中性点不接地或经高阻抗接地的系统,用电设备外露可导电部分采用各自的 PE 线接地,如图 1-3 所示。

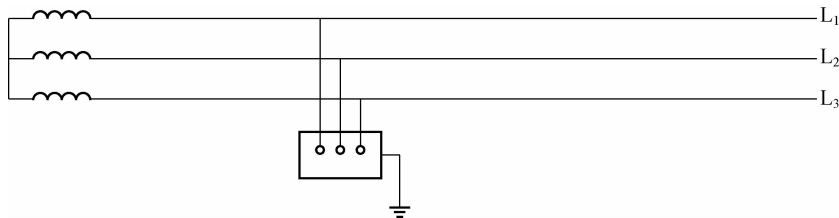


图 1-3 IT 系统接地方式

IT 系统的 PE 线正常时无电流,发生漏电故障时有电流通过。任何一相发生接地故障时,系统可以大地为相线继续运行,所以须加单相接地检测和监视装置。另外,为了避免发生双重故障,即两台设备不同相漏电的情况,应采取等电位连接措施或加装漏电保护装置。

任务三 认识常用电气设备

城市轨道交通工程是城市电网的重大电力用户,城市轨道交通供电系统(以下简称城轨供电系统)所接受的城市电网的不同电压等级的电源并不能直接为城轨的车辆和机电设备所用,需要具备变换和分配功能的各类电气设备将引入电源进行接受、变换和再分配。城轨供电系统包括交流供电系统和直流牵引供电系统两个部分,电压等级包括交流 110 kV、35 kV、10 kV、0.4 kV 和直流 1 500 V、750 V 等多个级别,所以涉及的电气设备比较多。在交流供电系统中有变压器和高、中、低压配电设备;在直流牵引供电系统中,有牵引变压器、整流器和直流配电设备。同时,为了保证供电系统的安全、可靠运行,还设有监视、保护、测量、自动控制设备。

一、电气设备的分类与要求

变配电系统的电气设备可分为一次设备和二次设备两大类,二者共同协调工作来保证变配电系统的安全、可靠运行。一次设备是变配电系统的主体,负责电能的转换与传输;二次设备是变配电系统安全、可靠运行的重要保障。

1. 一次设备

在变配电所中,直接用来接收电能、改变电压和分配电能的设备都称为一次设备或主设备,由一次设备构成的电路称为一次电路或主电路。一次设备可按照功能、安装地点及电流制式进行分类。

1) 按照设备功能分类

(1) 变换电器。变换电器在变配电系统中改变电压或电流,包括变压器、电流互感器和电压互感器。变压器用来变换电压和传输电能,根据需要将电压升高或降低,完成电能的传



输和分配。电流互感器和电压互感器用来变换电路中的电流与电压,以便供电给测量仪表、继电器或自动装置,并使之与高压电路隔离。

(2)开关电器。开关电器是用来正常控制主电路开断或闭合的电器,具有控制、隔离、保护和接地作用,包括断路器、隔离开关、负荷开关、熔断器、负荷开关-熔断器组合电器等。断路器具有灭弧能力,用来在电路正常工作和发生故障时关合或开断电路。隔离开关具有明显的断开点,用来隔离电源和设备,保证设备检修时工作人员的安全。负荷开关主要用于电路通断,它可以关合正常负荷和过载负荷,但不能开断短路电流。熔断器用在电路过载或短路时通过熔件的熔断开断电路,因而具有保护作用。

(3)限制电器。限制电器主要用来限制电路中的电流或电压,包括电抗器、避雷器、阻波器等。电抗器是一个扼流线圈,用来限制电路中的短路电流。避雷器是一种泄能装置,用来限制电路中出现的过电压或内部操作过电压。阻波器是一种电感线圈,主要用于载波通信,能限制高频载波进入变电所。

(4)补偿电器。补偿电器是指用于变配电系统中补偿无功功率、提高功率因数的设备,如电力电容器和同步补偿机等。

(5)成套装置。成套装置又称组合电器,根据一次电路的要求将各种一次设备组装成一个整体,如高压开关柜、低压成套电器装置、气体绝缘金属封闭组合电器 GIS 等。

2)按照安装地点分类

一次设备按照安装地点可分为户内式和户外式两大类。户内式设备不具有防风、雨、雷、露、冰、灰尘等功能,须安装在特殊的建筑物内使用,设备运行和维护条件好。户外式设备具有防风、雨、雷、露、冰、灰尘等功能,直接安装在露天环境中使用,设备运行和维护条件差。35 kV 及以下电压等级的电器大都是户内式设备,基本上采用成套产品形式。35 kV 及以上电压等级的电器以户外式为主,但随着电器设备小型化、无油化的发展,户内式 35 kV 及以上电器也越来越多,如 SF₆ 封闭式组合电器 GIS。

3)按照电流制式分类

一次设备按照电流制式可划分为交流电器和直流电器。交流电器工作于三相或单相工频交流电路,也有个别电器工作于非工频电路;直流电器工作于直流电路。城市轨道交通由城市电网工频交流电源供电,牵引网采用直流供电方式,所以在城轨供电系统中交流电器和直流电器使用量都很大。

2. 二次设备

在变配电系统中,对一次设备进行控制、保护、监测和指示的设备称为二次设备,又称为辅助设备。二次设备与一次设备保持电气隔离,通过电流互感器和电压互感器与一次设备取得电联系。二次设备属于低电压、小容量设备,主要包括测量仪表、控制和信号器具、继电保护装置、自动远传装置、操作电源、控制电缆等。

3. 主要电气设备的基本要求

变配电系统主要设备出现故障可能会导致供电中断甚至造成严重的安全事故,在对电气设备进行设计和选择时应综合考虑安全、可靠和经济等多方面因素,并应满足以下基本要求。

(1)能长期承受系统最高工作电压、短期承受内部过电压和外部过电压的作用而不被





击穿。

(2)能长期承受额定电流和短期过载电流的作用,温升保持在允许范围内。

(3)能承受短路热效应和力效应的作用而不损坏。

(4)开关电器的断流能力应符合相关规定,供测量和保护用的变换电器应符合规定的精度要求。

(5)在规定的使用环境中能承受一定的外界条件影响并安全可靠地运行。

二、城轨供电系统设备配置

城市轨道交通工程是城市电网的重大电力用户,接受城市电网不同电压等级的电源,而这些电源不能直接为城轨的车辆和机电设备所用。因此,城轨供电系统需要将引入电源进行接受、变换和再分配。而完成这些变换和分配功能需要各类电气设备,主要分为开关设备类、变压器类、整流器类、继电保护类的设备。

1. 设备的分类

按照设备功能可划分为开关设备、变压器、整流器和继电保护设备四大类。开关设备包括交流开关设备和直流开关设备。变压器包括主变压器、所用变压器、接地变压器、配电变压器、牵引变压器。

按照电压等级可划分为高压设备、中压设备和低压设备。高压设备包括高压开关设备、主变压器;中压设备包括中压开关设备和配电变压器、牵引变压器、1 500 V 直流开关设备;低压设备包括低压开关设备、整流器、750 V 直流开关设备、继电保护类设备。

按照设备所在位置可分为主变电所设备、牵引变电所设备和降压变电所设备。

按照设备系统可分为交流供电系统设备、直流牵引供电系统设备、动力照明供电系统设备。

2. 高压开关设备

高压开关设备应用于城轨工程主变电所,作为高压配电设备,接受城市电网电源并分配给主变压器。高压开关设备为户内式安装,一般采用高压 GIS 全封闭组合电器设备。

高压 SF₆ 全封闭组合电器将 SF₆ 断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线、连接件和三线终端等组合在一起,这些设备或部件全部封闭在已接地的金属外壳中,在其内部充有一定压力的 SF₆ 绝缘气体,该设备简称 GIS(gas isolate system)。由于 GIS 将多个高压电器元件有机组合在一起,因此具有结构紧凑、元器件不受污染及大气环境因素的影响、安装方便、有利于缩短安装工期等特点。

3. 中压开关设备

中压开关设备应用于城轨工程的主变电所、电源开闭所、牵引变电所和降压变电所,用于接受和分配中压电能。

中压开关柜按照电气绝缘介质可分为空气绝缘开关柜、复合绝缘开关柜和 SF₆ 气体绝缘开关柜。按照开关柜内安装的开关设备可分为断路器柜、负荷开关柜、隔离开关柜和熔断器柜。空气绝缘和复合绝缘开关柜的结构形式为金属铠装封闭式,内部设有不同功能隔室,手车可为落地式或中置式。SF₆ 气体绝缘开关柜可分为全密封充气(SF₆)环网开关柜和 C-GIS(cubicle type-GIS)开关柜。不同的电气绝缘介质对开关柜的外形尺寸影响很大,采用



空气绝缘的开关柜体积最大,采用复合绝缘次之,采用 SF₆ 气体绝缘时开关柜体积最小。

35 kV 开关柜多采用 C-GIS 开关柜,以减小变电所的土建规模,20 kV 及以下开关柜应采用空气绝缘的金属铠装开关柜,避免温室气体 SF₆ 对环境的影响。金属铠装封闭手车式开关柜、C-GIS 开关柜可用于主变电所、牵引变电所和降压变电所,全密封充气(SF₆)环网开关柜、负荷开关柜一般用于跟随式降压变电所。

4. 断路器类型

目前,城轨工程一般采用真空断路器。真空断路器的主要部件是真空灭弧室,灭弧室是一个高度真空的玻璃泡或矾土陶瓷,内置动静触头,利用真空的绝缘性能强迫灭弧,灭弧时没有游离气体产生,电弧容易熄灭,触头不会烧损。由于真空的绝缘性能很好,动静触头的开距较小,适合于频繁操作。真空断路器的灭弧原理是在断路器跳闸动静触头分开的瞬间,真空灭弧室内触头间形成高温液态的金属桥,金属桥被拉断时,金属桥蒸发,产生金属蒸气,使触头间隙击穿,产生电弧。电弧电流流过触头时,将产生磁场,驱使电弧在电流过零点时熄灭,或在过零点前被强迫熄灭。在熄灭的瞬间,金属蒸气离子在磁场的作用下迅速扩散,并被吸附在触头和金属屏蔽罩上,金属离子的密度迅速降低,使触头间恢复真空间隙,不再被较高的恢复电压击穿,使电弧熄灭,实现断路器的开断功能。

5. 低压开关设备

1) 低压开关设备的功能

低压开关设备用于降压变电所中,是动力照明供电系统的核心内容。它接受配电变压器提供的低压电能,为车站、停车场和控制中心的低压动力照明设备提供电源。

低压开关设备一般设置安装于断路器本体的脱扣器作为保护设备。

2) 低压开关柜的型式

城轨工程降压变电所低压开关柜多采用金属封闭间隔式刀开关柜。开关柜的电气绝缘和开关设备的灭弧介质均为空气,其外壳防护等级在 IP20 及以上。开关柜柜体为模块化框架结构,基本分三个功能隔室:水平母线室、功能单元隔室、电缆室。功能单元某一隔室产生故障电弧时,不影响相邻的其他隔室。开关能前接线或后接线,接线端子规格及固定的牢靠性能满足所连接电缆的需要。

开关柜的类型按低压电器的安装方式可分为固定式、抽出式和混合式。抽出式断路器可以是插拔式也可以是固定安装在开关柜的抽屉中。混合式断路器是在同一低压开关柜中,低压电器既有固定式安装,也有抽出式安装。无论低压电气设备为何种安装方式,低压开关柜的各安装单元之间均采用金属或绝缘板分隔,以避免在某安装单元出现故障时,对其他安装单元产生影响,扩大故障范围。

低压电器安装于低压开关柜内,一般分为配电电器和控制电器。配电电器包括低压断路器、熔断器、低压负荷开关、低压隔离开关等;控制电器包括接触器、起动器、主令电器和各种控制继电器等。低压开关柜的主要电器是低压断路器。

3) 低压断路器的类型

低压断路器主要用于配电线路和电气设备的过载、失压和短路保护。在 IEC 国际电工词汇中,对断路器的定义为:断路器是能接通、承载及分断正常电路条件下的电流,也能在规定的非正常电路条件下(如短路)接通、承载一定时间和分断电流的开关电器。





按照断路器的极数可分为单极、双极、三极和四极断路器;按照是否具有隔离功能,可分为具有隔离功能断路器和不具有隔离功能断路器;按照动作速度可分为一般型和快速型(快速型断路器通常为限流型,其分断时间短到足以使电流在未达到预期值之前即被分断);按照结构分为框架式(万能式)断路器和塑壳断路器;按照用途分为配电断路器、保护电动机用断路器、剩余电流断路器等。

6. 直流开关设备

直流开关设备在直流牵引供电系统中承担接受和分配直流电能的作用。它接受牵引整流机组提供的直流电能,分配给上、下行牵引网,为电动列车提供直流电能。直流开关设备包括牵引变电所内的直流开关柜和一般设于牵引变电所外的上网开关柜。

直流开关柜包括正极开关柜、负极开关柜、馈线开关柜和上网开关柜。正极开关柜内可采用直流快速断路器或电动隔离开关;负极开关柜内设电动隔离开关或手动隔离开关;馈线开关柜采用直流快速断路器;上网开关柜(包括纵向联络开关设备)采用电动隔离开关,为短轨供电采用直流接触器或直流快速断路器。上网开关柜用于牵引网断电检修和形成大双边越区供电。

目前,城轨工程采用的直流开关柜均为金属铠装落地手车式,直流快速断路器安装在手车上,电动或手动隔离开关在开关柜内固定安装。

直流开关柜无论其标称电压为 750 V 还是 1 500 V,其电气绝缘介质和断路器的灭弧介质都是空气。

7. 微机保护装置

供电系统在运行过程中不可避免地会出现一些故障,最常见的是各种形式的短路及频率下降等,故障的基本特征是导致电流突增、电压下降及电流与电压间相角的变化。继电保护装置对这些故障和不正常工作状态会自动发出故障报警或跳闸信号,实现对电气设备的保护,满足供电系统可靠运行的要求。

继电保护装置采集电流互感器、电压互感器二次侧的实时电流和电压数值,并与继电保护装置中预先设定的门槛值进行比较,当超过限定值时,装置可发出报警信号或驱动开关操作机构分闸线圈,使断路器跳闸。

继电保护可通过各种电磁继电器实现,如利用电流继电器判断线路电流是否越限,利用电压继电器判断线路电压是否正常,利用中间继电器驱动指示灯、开关的操作机构合闸、分闸线圈等。

微机保护装置也是实现继电保护的一种设备,它的基本功能包括继电保护、测量计量、装置的自诊断功能和通信功能,其中通信功能可实现微机保护装置内各种信息的上传。

有些微机保护装置除了上述基本功能外,还有 PLC 的功能,可实现控制联锁等逻辑编程功能。微机保护装置一般不会将所有保护功能集于一身,主要是价格和装置大小将影响产品的适用性。目前,微机保护装置在城轨工程中已得到广泛应用,交流高压、中压系统和直流牵引供电系统的继电保护多采用微机保护装置。

微机保护装置的主要特点在于灵活方便的远方调整功能、故障录波功能和可编程功能,采用微机保护装置大大减少了二次控制电缆的数量,提高了继电保护的可靠性。

8. 牵引整流机组

牵引整流机组由牵引变压器和整流器构成。牵引变压器接受中压开关设备提供的中压



电压,经过降压,为整流器提供适合的低压交流电源;整流器则将交流电源整流为电动列车所需要的直流电源。

牵引整流机组是牵引变电所的核心设备,是列车高速、安全、可靠、经济、节电运行的保证。牵引整流机组需要牵引变压器和整流器两种完全不同的设备相互匹配,才能实现牵引整流机组的整体性能。

牵引变压器的绝缘类型分为树脂浇注、浸绝缘漆和杜邦纸绝缘,城轨工程多采用树脂浇注绝缘方式。整流器中的整流元件可分为大功率二极管、可控硅和晶闸管,采用可控硅、晶闸管可以控制整流桥臂的导通或关闭,使直流输出的纹波系数更小,而且可以在不同负载情况下对直流输出电压进行调节,使直流输出电压恒定。城轨工程多采用二极管作为整流元件。

按照中压系统和直流牵引供电系统标称电压的不同,目前国内牵引变压器采用的网侧电压为 35 kV、33 kV 和 10 kV,阀侧电压对于 750 V 系统为 0.59 kV、0.61 kV,对于 1500 V 系统为 1.18 kV、1.22 kV。

牵引整流机组为Ⅵ类重牵引负荷等级,即在额定负荷时能够长期运行,在 1.5 倍过载时能够运行 2 h,在倍过载时能够运行 1 min。

9. 主变压器

主变压器是城轨工程中设在主变电所的配电变压器,用于将城市电网引入的高压电源转换成中压电源并满足容量要求。主变压器的网侧和阀侧电压等级依据供电系统设计确定,目前使用的主变压器主要有 110/35 kV、110/33 kV 和 110/10 kV 三种。

为了减少城市电网电压波动和负荷变化对城轨中压系统电压质量的影响,主变压器多采用有载调压型电力变压器。有载调压开关具有就地、远方操作功能。

110 kV 级变压器按照绝缘介质的不同可分为复合油绝缘式、油浸式、SF₆ 气体绝缘式(GIT)和树脂浇注干式变压器(RCDT)。由于油浸式变压器价格低,应用成熟,目前多采用自冷油浸式变压器。

10. 配电变压器

配电变压器就是将中压电源降压成适合动力照明负荷的低压电源并满足容量要求。根据中压网络电压等级的不同,配电变压器的电压比主要分为 35(33)/0.4 kV 和 10/0.4 kV 两种,绝缘材质可采用绝缘油、环氧树脂和杜邦纸,相应配电变压器可分为油浸式变压器、环氧树脂浇注干式变压器和杜邦纸绝缘干式变压器。

油浸式变压器、环氧树脂浇注干式变压器和杜邦纸绝缘干式变压器在城市电网大量采用,但出于防火要求,城轨工程配电变压器已不采用油浸式变压器,而多采用环氧树脂浇注干式变压器。由于杜邦纸绝缘产品具有承受热冲击的能力强,过负载能力大,难燃,防火性能高,对湿度、灰尘不敏感,可回收等优势,从而具有广泛的适应性,并适用于防火要求高、负荷波动大、污秽潮湿的恶劣环境。因此,杜邦纸绝缘干式变压器以其良好的性能和环保特点越来越受到关注。



学 习 评 价

1. 供配电系统由哪几部分组成？各有什么作用？
2. 电能质量的评价指标有哪些？允许的偏差各是多少？
3. 我国额定电压分为几级？如何确定额定电压？
4. 电力负荷分为几级？各级负荷对供电有什么具体要求？
5. 电力系统中性点有几种运行方式？分别应用于什么环境？
6. 配电系统中性点接地方式有哪几种？各有什么特点？
7. 一次设备有哪些？各有什么功能？
8. 二次设备的作用是什么？
9. 城轨供电系统都选用什么类型的一次设备？