

城市轨道交通职业教育系列教材——城轨供电技术

城市轨道交通供变电技术

(第2版)

主 编 李学武

副主编 张家祥

主 审 彭大明



微课



动画



课件



教学大纲



课程标准



彩图



校企合作



新形态一体化教材

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书遵照《地铁设计规范》(GB 50157—2013)、《城市轨道交通技术规范》(GB 50490—2016)等技术条文,结合相关设计院、工程局、地铁公司、生产厂家的技术资料、运营文件,以设备单元为载体,详细介绍城市轨道交通供电系统的主变电所、降压变电所、牵引降压混合变电所的组成、一次二次设备的结构、原理及运营要点。

本书可作为高等职业技术学院城市轨道交通供配电技术专业的教学用书,也可作为城市轨道交通行业职工培训以及技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通供变电技术 / 李学武主编. —2版
—成都:西南交通大学出版社, 2021.8
ISBN 978-7-5643-8209-4

I. ①城… II. ①李… III. ①城市铁路—供电装置—
高等职业教育—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第165127号

Chengshi Guidao Jiaotong Gongbiandian Jishu

城市轨道交通供变电技术

(第2版)

主编 / 李学武

责任编辑 / 李芳芳

封面设计 / 曹天擎

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川五洲彩印有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 17.75 字数 442 千

版次 2016年7月第1版 2021年8月第2版 印次 2021年8月第4次

书号 ISBN 978-7-5643-8209-4

定价 49.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

出版说明

城市轨道交通凭借快捷、准时、舒适、运量大、能耗低、污染小、占地少等优点，日益成为城市现代化建设进程中重要的公益性基础设施项目。城市轨道交通涉及面广、综合性很强，其发展状况已被当成一个城市综合实力和现代化程度的重要评判指标。由此，城市轨道交通建设正在我国兴起一个新的浪潮，社会对城市轨道交通专业人才的需求巨大，给城市轨道交通类专业的职业教育发展带来了良好契机。

西南交通大学出版社与国内诸多交通院校一直保持友好往来，并整合他们在轨道交通领域的尖端科技优势和人才集成优势，致力于为国家轨道交通教育事业做出贡献，形成了以“轨道交通”为核心的出版特色，在教育界、学界都拥有良好的口碑和较高的品牌知名度。

本套丛书从满足快速增长的城市轨道交通专业实用型人才培养需求出发，从校企合作教学直接面向岗位需求这一特点出发，精心组织国内相关专业优秀教育工作者或优秀教育工作高校，分“运营管理”“工程技术”“车辆”“控制”“供电技术”五大类，系统地为学生呈现城市轨道交通教育课程全景。在编写时，力求体现如下特点：

◎ 适用性

理论知识够用即可，在讲述专业理论知识的基础上，突出实际操作技能的训练，注重岗位关键能力的培养。

◎ 专业性

图书的顶层设计从国家高职高专专业目录规范出发，内容编排紧密结合岗位应用实际，体现专业性和主流设备前沿特征，体现教学实际需求。同时，在编写或修改时，尽可能地让一线用人单位参与进来，根据生产现场实际提出的建议。

◎ 生动性

在架构设计和版式设计上，力求简洁生动，图文并茂；通过广泛应用二维码技术等移动互联网时代元素，尽可能把生产实际和研究成果用立体生动的形式表达，便于读者理解掌握。

这套书可作为高等职业院校、中等职业学校城市轨道交通相关专业的教学用书，也可作为城市轨道交通企业新职工的培训教材。有关教材的课件资料等，可以联系我社使用。

联系电话：028-87600533

邮箱：swjtucbsfx@163.com

西南交通大学出版社

二〇一五年八月

第二版前言

截至 2020 年 12 月 31 日，全国（不含港澳台）开通城轨交通运营的城市累计 45 个，运营线路共 7 978.19 km。2020 年当年，内地共新增三亚、天水、太原 3 个城轨交通运营城市，共新增城轨交通运营线路 1 241.99 km。“十四五”是我国城市轨道交通加快推进创新驱动、转型发展，提升运营服务品质的重要时期；也是加快推进产业变革、科技创新，全面建设智慧城轨的重要时期；更是加快推进高质量与高效率并重发展，从“城轨大国”向“城轨强国”迈进的重要时期。未来五年，我国城市轨道交通线路运营里程将增加 5 000 km，总量将达到 13 000 km，员工人数预计达到 63.7 万（中国城市轨道交通协会统计信息）。

城市轨道交通供电系统是城轨列车、车站和线路的动力源，它既为轨道交通运输提供电能，也为轨道交通运营安全提供技术屏障，是建设运营绿色城轨、智慧城轨的必然选择。

近几年来，城市轨道交通的主变电所、降压所、牵引降压混合所等供电设施，在设备与技术方面，从变电所综合自动化到变电站数字化，再到变电所智能化；运营管理方面，从有人值守到无人值守。

本书的第二版修订过程中，作者收集了郑州、广州、成都、宁波等城市轨道交通供电系统设计、施工和运营维护技术文件，吸纳了《地铁设计规范》《城市轨道交通技术规范》《电力系统技术导则》《供配电系统设计规范》《电气简图用图形符号》等国家标准，对第二版教材内容做了全面修订更新。修订内容如下：第一章是电力系统与城市轨道交通供电系统的概况介绍，结合现行国家标准对教材内容做了修正、补充、完善；第二章到第八章，与当前城市轨道交通供电系统技术设备保持同步，对相关内容进行了进一步梳理、调整、充实、更新，分别补充了弹簧液压操动机构工作原理、展开式原理图标号原则等，确保了知识技能点的正确性、先进性、实用性。第九章自用电系统，结合现行地铁变电所自用电的设备、接线、运行等情况，对内容进行了重组、补充。对书中所有插图进行了统一的校对修改和重新绘制。

本书第二版由郑州铁路职业技术学院李学武教授担任主编，并负责全书统稿工作；由中铁电气化勘测设计研究院有限公司彭大明教授级高级工程师担任主审；

由郑州铁路职业技术学院张家祥副教授担任副主编。参加本书编写的有：郑州铁路职业技术学院张家祥（第一章、第二章、附录）；西安铁路职业技术学院陈莉（第四章、第六章）；浙江省轨道交通运营管理集团有限公司海宁分公司吴胜利（第五章、第七章）；郑州铁路职业技术学院李学武（第八章、第九章）；中国铁路郑州局集团有限公司调度所李春（第三章、第十章）。本书编写过程中，得到了相关设备厂家、地铁公司的大力支持，他们提供大量技术资料，在此表示衷心感谢。

本书同时提供数字教学资源，包括书中所有插图（部分为彩图或三维图）、教学 PPT、微课等，郑州简意科技有限公司协助完成了本书数字教学资源的制作，在此一并感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在不完善之处，请广大读者特别是从事轨道交通供电系统设计、施工和产品制造、维修工作的人员提出意见和建议。读者可以通过邮箱 xuewu6981@163.com 和编者共同探讨本书相关的技术问题。

编 者

2021 年 4 月



教学大纲与课程标准

前 言

教育部文件《普通高等学校高等职业教育（专科）专业目录（2015年）》（教职成〔2015〕10号），新增“城市轨道交通供配电技术专业”，这是城市轨道交通迅猛发展的必然结果。

供电系统是城市轨道交通的动力源泉。本书遵照最新颁布的《城市轨道交通技术规范》（GB 50490—2009）、《地铁设计规范》（GB 50157—2013）等技术条文，结合相关设计院、工程局、地铁公司、生产厂家的技术资料、运营文件，以设备单元为载体，详细介绍城市轨道交通供电系统的主变电所、降压变电所、牵引降压混合变电所的组成和一次、二次设备的结构、原理及运营要点。

本书共分十章：第一章介绍城市轨道交通、电力系统及其高压电气设备、城市轨道交通供电系统的概况；第二章介绍主变电所、降压变电所、牵引降压混合变电所的电气主接线、设备配置、运行方式以及中压环网结构与运行；第三章介绍干式变压器、整流机组的结构原理与运营维护；第四章以交流开关柜为对象，介绍开关柜的结构、开关柜中的断路器、隔离开关及互感器等的结构原理，以及高低压开关柜的操作、巡视、维护要点；第五章介绍直流开关柜的结构原理与维护；第六章介绍城轨交通变电所中的避雷器、电抗器等限流限压设备的结构原理、检修维护，以及接地的基本概念和地铁变电所中的接地装置结构与维护要点；第七章从杂散电流的产生机理入手，分析杂散电流的腐蚀原理、危害性，详细讲述杂散电流腐蚀防护的具体措施、杂散电流监测的原理与设备、杂散电流排流的原则与设备等；第八章介绍二次接线的基本知识，详细分析城市轨道交通变电所中交流开关柜二次系统的结构、电路原理及读图方法；第九章介绍城市轨道交通变电所的交流、直流自用电系统以及应急照明电源系统的结构原理与维护；第十章介绍电力监控系统的结构与功能。

本书采用“问题导入—学习目标—内容讲解—复习思考”的体例格式，在引导读者学习的同时也利于教师授课。本书可作为高等职业技术学院轨道交通类专

业的教学用书，也可作为城市轨道交通行业职工培训以及技术人员的参考用书。

本书由李学武担任主编，彭大明担任主审。编写分工如下：李轶群编写第一章、第五章；王喜燕编写第二章、第三章，陈莉编写第四章、第六章；程永胜编写第七章、第九章；李学武编写第八章、第十章、附录，并负责全书统稿工作。

编写过程中，参阅了大量技术资料，这些资料主要来源于：郑州、上海、成都、广州、武汉等地铁公司；海南金盘电气有限公司、厦门 ABB 开关有限公司、上海西门子开关有限公司、镇江大全赛雪龙牵引电器有限公司、广州东芝白云电器设备有限公司、徐州中矿大传动与自动化有限公司；中铁第四勘察设计集团有限公司、中铁电化院；等等。在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不完善之处，请广大读者特别是从事轨道交通供电系统设计、施工和产品制造、维修工作的人员提出意见和建议。读者可以通过邮箱 xuewu6981@163.com 和编者共同探讨本书相关的技术问题。

编 者

2016年6月

目 录

第一章 系统认知	001
第一节 电力系统	001
第二节 高压电气设备	012
第三节 变配电所电气主接线	015
第四节 城市轨道交通系统	019
第五节 城市轨道交通供电系统	024
第二章 城市轨道交通供电系统变电所	033
第一节 主变电所	033
第二节 中压供电网络	040
第三节 降压变电所	046
第四节 牵引降压混合变电所	050
第三章 干式变压器与整流机组	054
第一节 干式变压器	054
第二节 牵引整流机组	060
第四章 交流开关柜	068
第一节 电弧理论	068
第二节 六氟化硫组合电器（GIS）概述	075
第三节 交流高、中压开关柜中的断路器	083
第四节 交流高、中压开关柜中的隔离开关	095
第五节 交流高、中压开关柜中的互感器	100
第六节 交流高、中压开关柜中的操动机构	114
第七节 交流高、中压开关柜的操作、巡视与维护	125
第八节 0.4 kV 低压开关柜的操作、巡视与维护	129
第五章 直流开关柜	137
第一节 直流开关柜的结构与原理	137
第二节 直流馈线柜的操作、巡视与维护	143

第六章 限流限压与接地装置	148
第一节 避雷器	148
第二节 避雷器的检修与维护	154
第三节 电抗器	156
第四节 电抗器的维护	160
第五节 城市轨道交通供电系统的接地装置	161
第六节 城市轨道交通供电系统接地装置的维护	170
第七章 杂散电流	173
第一节 杂散电流的形成与危害	173
第二节 杂散电流防护、监测与排流	176
第八章 二次接线	187
第一节 二次接线概述	187
第二节 展开式原理图	192
第三节 安装接线图	197
第四节 控制电路概述	203
第五节 高压 GIS 组合电器断路器控制、信号电路	205
第六节 交流中压开关柜控制、信号电路	209
第七节 变电所信号系统概述	217
第九章 自用电系统	222
第一节 自用电系统配置	222
第二节 自用电交直流系统	228
第三节 阀控式密封铅酸蓄电池	237
第四节 自用电应急电源系统	246
第十章 电力监控	251
第一节 电力监控系统的概念及其硬件构成	251
第二节 电力监控系统的功能	257
附 录	263
附录一 常用电气设备新旧文字符号对照表	263
附录二 电气设备常用图形符号	266
参考文献	272

第一章 系统认知



课件：系统认知



第一章彩版插图



问题导入 >>>

作为解决城市交通拥挤的一种重要手段，城市轨道交通已经从起步发展到全面建设阶段，以其环保、舒适、快捷的优势，改变了人们的出行生活。本章作为全书的开篇，将从“城市轨道交通系统”“电力系统”“城市轨道交通供电系统”等本书相关的重要概念入手，介绍其定义、结构、功能等，为全书的阅读学习奠定基础。



学习目标 >>>

1. 掌握电力系统的概念、组成、供电质量指标。
2. 掌握电力系统中性点运行方式的类型特点及其应用范围。
3. 理解变配电所中的高压电气设备类型、功能、操作顺序。
4. 掌握变配电所中各种类型电气主接线的结构要点、运行特点、适用范围。
5. 掌握城市轨道交通的概念、分类、设备系统。
6. 掌握城市轨道交通供电系统的构成及其各部分的功能。
7. 掌握城市轨道交通供电系统的供电方式种类、概念及其优缺点。



内容讲解 >>>

第一节 电力系统

一、电力系统的概念及其组成

《电力系统技术导则》(GB/T 38969—2020)给出了“电力系统(power system)”的定义：由发电、供电(输电、变电、配电)、用电设备以及为保障其正常运行所需的继电保护和自动装置、调度自动化、电力通信等二次设备构成的统一整体，称为电力系统。电力系统加上发电厂的“动力部分”称为动力系统。所谓动力部分，包括发电机的原动机(如汽轮机、水轮机)、原动机的力能部分(热力锅炉、水库、反应堆)等。

电力系统中，由各种不同电压等级的输配电线路将升压和降压变电站连接在一起的部分称为电力网。

如图 1.1 所示为动力系统、电力系统、电力网的示意图。

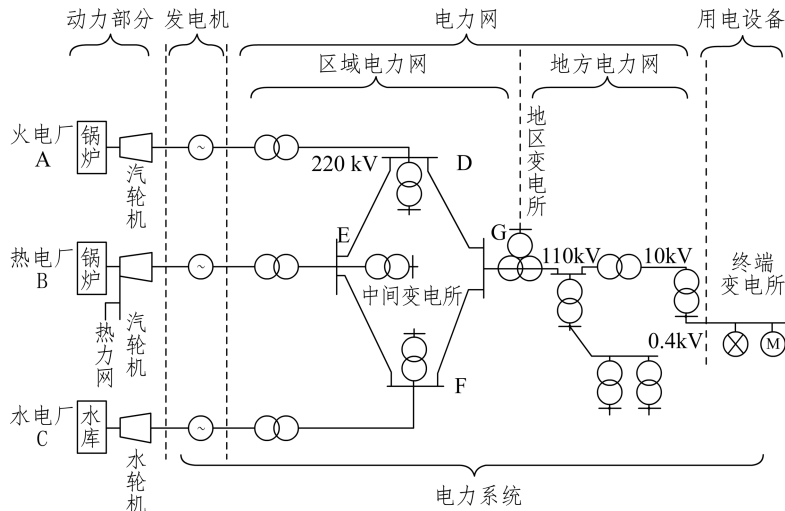


图 1.1 动力系统、电力系统、电力网的示意图

电力系统的主要设施和设备包括发电厂、变配电所、电力线路和电能用户。

1. 发电厂

按使用能源划分有以下基本类型：

① 火力发电厂：火力发电是利用燃烧燃料（煤、石油及其制品、天然气等）所得到的热能发电。

② 水力发电厂：水力发电是将高处的河水（或湖水、江水）通过导流引到下游形成落差推动水轮机旋转带动发电机发电。

③ 核能发电厂：核能发电是利用原子反应堆中核燃料（如铀）慢慢裂变所放出的热能产生蒸气（代替了火力发电厂中的锅炉）驱动汽轮机再带动发电机旋转发电。以核能发电为主的发电厂称为核能发电厂，简称核电站。根据核反应堆的类型，核电站可分为压水堆式、沸水堆式、气冷堆式、重水堆式、快中子增殖堆式等。

④ 风力发电厂：利用风力吹动建造在塔顶上的大型桨叶旋转带动发电机发电称为风力发电，风力发电厂一般由数座、十数座甚至数十座风力发电机组成。

⑤ 其他还有地热发电厂、潮汐发电厂、太阳能发电厂等。

2. 变配电所

变电所的任务是接受电能、变换电压和分配电能，即受电-变压-配电。

配电所的任务是接受电能和分配电能，但不改变电压，即受电-配电。

变电所可分为升压变电所和降压变电所两大类。升压变电所一般建在发电厂，主要任务是将低电压变换为高电压；降压变电所一般建在靠近负荷中心的地点，主要任务是将高电压变换到一个合理的电压等级。

降压变电所根据其在电力系统中的地位和作用不同，又分为枢纽变电站、中间变电所、

地区变电所和终端变电所（工业企业变电所）等。

枢纽变电站位于电力系统的枢纽点，汇集多个电源，连接电力系统高压和中压的几个部分，电压等级一般为 330 ~ 500 kV。这种变电所一旦停电，将造成大范围停电，引起系统解列，甚至整个系统瘫痪。因此，枢纽变电站对电力系统运行的稳定性和可靠性起着重要作用。

中间变电所的电压等级一般为 220 ~ 330 kV，汇集 2 ~ 3 个电源和若干线路，高压侧起交换功率的作用，或使长距离输电线路分段，同时降压向一个区域供电。这样的变电所在系统中主要起中间环节的作用，故称中间变电所。全所停电后，将引起区域电网的解列。

地区变电所的电压等级一般为 110 ~ 220 kV，主要向一个地区用户供电，是一个地区或一个中小城市的主要变电所，一旦停电，将造成该地区或城市供电的紊乱，甚至中断供电。

终端变电所位于配电线路的末端，接近负荷处，电压等级一般为 35 ~ 110 kV，经降压后直接向用户供电。降压后的电压一般为 10 kV 和 0.4 kV，分别向不同的用户供电。

3. 电力线路

电力线路的作用是输送电能，并把发电厂、变配电所和电能用户连接起来。

水力发电厂须建在水力资源丰富的地方，火力发电厂一般也多建在燃料产地，即所谓的“坑口电站”。因此，发电厂一般距电能用户均较远，所以需要多种不同电压等级的电力线路，将发电厂生产的电能源源不断地输送到各级电能用户。

通常把电压在 35 kV 及以上的高压电力线路称为送电线路，而把 10 kV 及以下的电力线路，称为配电线路。

电力线路按其传输电流的种类又分为交流线路和直流线路；按其结构及敷设方式又可分为架空线路、电缆线路及户内配电线路。

4. 电能用户

电能用户又称电力负荷。在电力系统中，一切消费电能的用电设备均称为电能用户。

用电设备按电流可分为直流设备与交流设备，而大多数设备为交流设备；按电压可分为低压设备与高压设备，1 000 V 及以下的属低压设备，高于 1 000 V 的属高压设备；按频率可分为低频（50 Hz 以下）设备、工频（50 Hz）设备及中高频（50 Hz 以上）设备，绝大部分设备采用工频；按工作制分为连续运行设备、短时运行设备和反复短时运行设备三类；按用途可分为动力用电设备（如电动机）、电热用电设备（如电炉、干燥箱、空调器等）、照明用电设备、试验用电设备、工艺用电设备（如电解、电镀、冶炼、电焊、热处理等）。用电设备分别将电能转换为机械能、热能和光能等不同形式的用于生产、生活需要的能量。

二、电力系统额定电压

为了便于电器制造业的生产标准化和系列化，国家规定了标准电压等级系列《标准电压》（GB/T 156—2017）。在设计时，应选择最合适的额定电压等级。所谓额定电压，是指使某一用电设备（如电动机、电灯等）、发电机和变压器等在正常运行时具有最大经济效益的电压。

我国规定的额定电压，按电压高低和使用范围分为以下三类：

第一类额定电压是 100 V 及以下的电压等级，主要用于安全照明、蓄电池及开关设备的直流操作电压。直流为 6 V，12 V，24 V，48 V；交流单相为 12 V 和 36 V，三相线电压为 36 V。

第二类额定电压是 100 ~ 1 000 V 之间的电压等级。这类额定电压应用最广、数量最多，如动力、照明、家用电器和控制设备等。

第三类额定电压是 1 000 V 及以上的高电压等级，如表 1.1 所示，主要用于电力系统中的发电机、变压器、输配电设备和用电设备。

表 1.1 第三类额定电压

单位: kV

用电设备与电网 额定电压	交流发电机	变压器		设备最高工作电压
		一次绕组	二次绕组	
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3	3.5
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6	6.9
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11	11.5
	13.8	13.8		
	15.75	15.75		
	18	18		
	20	20		
35		35	38.5	40.5
110		110	121	126
220		220	242	252
330		330	363	363
500		500	550	550
750		750	825	825

1. 电力线路的额定电压

电力线路(或电网)的额定电压等级是国家根据国民经济发展的需要及电力工业的水平，经全面技术经济分析后确定的。它是确定各类用电设备额定电压的基本依据。

2. 用电设备的额定电压

由于用电设备运行时，电力线路上会有负荷电流流过，因而在电力线路上引起电压损耗，造成电力线路上各点电压略有不同。但成批生产的用电设备，其额定电压不可能按使用地点的实际电压来制造，而只能按线路首端与末端的平均电压即电力线路的额定电压来制造。所以用电设备的额定电压规定与同级电力线路的额定电压相同。

3. 发电机的额定电压

由于电力线路允许的电压损耗为 $\pm 5\%$ ，即整个线路允许有 10% 的电压损耗，因此，为了确保线路首端与末端平均电压的额定值，线路首端(电源端)电压应比线路额定电压高 5%，而发电机是接在线路首端的，所以规定发电机的额定电压高于同级线路额定电压 5%，用以补偿线路上的电压损耗。

4. 电力变压器的额定电压

(1) 电力变压器一次绕组的额定电压

该额定电压有两种情况：

① 当电力变压器直接与发电机相连，则其一次绕组的额定电压应与发电机额定电压相同，即高于同级线路额定电压 5%。

② 当变压器不与发电机相连，而是连接在线路上，则可将变压器看作是线路上的用电设备，因此其一次绕组的额定电压应与线路额定电压相同。

(2) 变压器二次绕组的额定电压

变压器二次绕组的额定电压，是指变压器一次绕组工作在额定电压下而二次绕组开路时的电压，即空载电压。而变压器在满载运行时，二次绕组内约有 5% 的阻抗电压降。因此分两种情况：

① 如果变压器二次侧供电线路很长（如较大容量的高压线路），则变压器二次绕组额定电压，一方面要考虑补偿变压器二次绕组本身 5% 的阻抗电压降；另一方面还要考虑变压器满载时输出的二次电压要满足线路首端应高于线路额定电压的 5%，以补偿线路上的电压损耗。所以，变压器二次绕组的额定电压要比线路额定电压高 10%。

② 如果变压器二次侧供电线路不长（如为低压线路或直接供电给高、低压用电设备的线路），则变压器二次绕组的额定电压只需高于其所接线路额定电压 5%，即仅考虑补偿变压器内部 5% 的阻抗电压降。

三、电能质量指标

随着科学技术和国民经济的发展，电能需求量日益增加，对电能质量的要求也越来越高。从 20 世纪 80 年代初开始，我国将制定电能质量国家标准列为重点项目。我国已颁布了 7 个电能质量指标方面的标准，即《电能质量供电电压偏差》（GB/T 12325—2008）、《电能质量电力系统频率偏差》（GB/T 15945—2008）、《电能质量公用电网谐波》（GB/T 14549—1993）、《电能质量电压波动和闪变》（GB/T 12326—2008）、《电能质量三相电压不平衡》（GB/T 15543—2008）、《电能质量公用电网间谐波》（GB/T 24337—2009）以及《电能质量暂时过电压和瞬态过电压》（GB/T 18481—2001）（其中有的标准已修订过一、二次）。这些标准从不同方面反映了供电电压的一些基本特性，这些特性关系到各行各业用户电气设备的安全和经济运行、广大人民群众的生活和工作，以及许多产品的质量。

电力系统中的所有电气设备都必须在一定的电压和频率下工作。电气设备的额定电压和额定频率是电气设备正常工作并获得最佳经济效益的条件。因此，电压、频率和供电的连续可靠是衡量电能质量的基本参数。

1. 电压及波形

交流电的电压质量包括电压的数值与波形两个方面。电压质量对各类用电设备的工作性能、使用寿命、安全及经济运行都有直接的影响。

(1) 供电电压偏差

供电电压偏差，是指实际运行电压与系统标称电压的偏差相对值，用百分数来表示，即

$$\text{电压偏差 (\%)} = \frac{\text{电压测量值} - \text{系统标称电压}}{\text{系统标称电压}} \times 100\% \quad (1.1)$$

加在用电设备上的电压在数值上偏移额定值后，对于感应电动机，其最大转矩与端电压的平方成正比，当电压降低时，电动机转矩显著减小，以致转差增大，从而使定子、转子电流都显著增大，引起温升增加，绝缘老化加速，甚至烧毁电动机；而且由于转矩减小，转速下降，导致生产效益降低，产量减少，产品质量下降。反之，当电压过高，激磁电流与铁损都大大增加，引起电机的过热，效率降低。对电热装置，这类设备的功率与电压平方成正比，所以电压过高将损伤设备，电压过低又达不到所需温度。电压偏移对白炽灯影响显著，白炽灯的端电压降低 10%，发光效率下降 30%以上，灯光明显变暗；端电压升高 10%时，发光效率将提高 1/3，但使用寿命将只有原来的 1/3。

正常情况下，用电设备端子处电压偏移的允许值为：

- ☆ 电动机：± 5%。
- ☆ 照明灯：一般场所 ± 5%；在视觉要求较高的场所 +5%、- 2.5%。
- ☆ 其他用电设备：无特殊规定时 ± 5%。

电压偏差是由供电系统改变运行方式或电力负荷缓慢变化等因素引起的，其变化相对缓慢。《电能质量供电电压偏差》(GB/T 12325—2008)标准规定的供电电压为供电部门与用户电气系统连接点的电压，而不是用电设备处的电压。因为电能的计量点一般在供电点处，而用户内部电网的设计和管理是由用户自身负责的。《电能质量供电电压偏差》(GB/T 12325—2008)规定电力系统在正常运行条件下，用户受电端供电电压偏差的限值：

35 kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%。注：如供电电压上下偏差同号（均为正或负）时，按较大的偏差绝对值作为衡量依据。

20 kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的±7%。

220 V 单相供电电压偏差为标称电压的+7%、- 10%。

对供电点短路容量较小、供电距离较长以及对供电电压偏差有特殊要求的用户，由供、用电双方协议确定。

(2) 波形畸变

近年来，随着硅整流、晶闸管变流设备、微机及网络和各种非线性负荷的使用增加，大量谐波电流注入电网，造成电压正弦波波形畸变，使电能质量大大下降，给供电设备及用电设备带来严重危害，不仅使损耗增加，还使某些用电设备不能正常运行，甚至可能引起系统谐振，从而在线路上产生过电压，击穿线路设备绝缘；还可能造成系统的继电保护和自动装置发生误动作，并对附近的通信设备和线路产生干扰。

2. 频率

我国采用的工业频率（简称工频）为 50 Hz。当电网低于额定频率运行时，所有电力用户的电动机转速都将相应降低，因而工厂的产量和质量都将不同程度地受到影响。频率的变化还将影响到计算机、自控装置等设备的准确性。电网频率的变化对供配电系统运行的稳定性影

响很大，因而对频率的要求比对电压的要求更严格。《电能质量 电力系统频率偏差》(GB/T 15945—2008)规定，电力系统正常运行条件下的频率偏差限值为 ± 0.2 Hz，当系统容量较小时，频率偏差限值可以放宽到 ± 0.5 Hz。

3. 可靠性

供电的可靠性是衡量供配电质量的一个重要指标，一般把它列在质量指标的首位。衡量供配电可靠性的指标，一般以全年平均供电时间占全年时间的百分数来表示，例如，全年时间为 8 760 小时，用户全年平均停电时间 87.6 小时，即停电时间占全年的 1%，则供电可靠性为 99%。

自 2010 年 7 月 1 日起实施的《供配电系统设计规范》(GB 50052—2009)规定：电力负荷应根据对供电可靠性的要求及中断供电在对人身安全、经济损失上所造成的影响程度进行分级。

符合下列情况之一时，应视为一级负荷：中断供电将造成人身伤害时；中断供电将在经济上造成重大损失时；中断供电将影响重要用电单位的正常工作。一级负荷应由双重电源供电，当一电源发生故障时，另一电源不应同时受到损坏。双重电源指的是一个负荷的电源由两个电路提供，这两个电路就安全供电而言被认为是互相独立的。

在一级负荷中，当中断供电将造成人员伤亡或重大设备损坏或发生中毒、爆炸和火灾等情况的负荷，以及特别重要场所的不允许中断供电的负荷，应视为一级负荷中特别重要的负荷。一级负荷中特别重要的负荷供电，除应由双重电源供电外，还应增设应急电源，并严禁将其他负荷接入应急供电系统。设备的供电电源的切换时间，应满足设备允许中断供电的要求。根据实际需求，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、干电池可作为应急电源。

符合下列情况之一时，应视为二级负荷：中断供电将在经济上造成较大损失时；中断供电将影响较重要用电单位的正常工作。二级供电负荷最好能由两个电源供电。如果供电条件有困难或负荷较小时，可以用一个 6 kV 以及 6 kV 以上的专用线路供电。如果采用电缆供电时，可以另外设一条备用电缆，而且该电缆要经常处于运行状态。

不属于一级和二级负荷者应为三级负荷。三级供电负荷对供电无特殊要求。

四、电力系统中性点运行方式

运行中星形连接的发电机和变压器的中性点称为电力系统的中性点。

在电力系统中，当变压器或发电机的三相绕组为星形连接时，其中性点可有三种运行方式：中性点直接接地、中性点不接地和中性点经消弧线圈接地。中性点直接接地系统常称大电流接地系统，中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统称小电流接地系统。

电力系统中性点的运行方式选择是一个综合性问题，它与电压等级、单相接地短路电流、过电压水平、继电保护配置等有关，直接影响系统的绝缘水平、系统供电的可靠性和连续性。

1. 中性点直接接地方式

中性点直接接地或低阻接地的电力系统如图 1.2 所示，中性点的电位在电网的任何工作

状态下均保持为零。在这种系统中，当发生一相接地时，这一相直接经过接地点和接地的中性点短路，一相接地短路电流的数值最大，因而应即使继电保护动作，将故障部分切除。

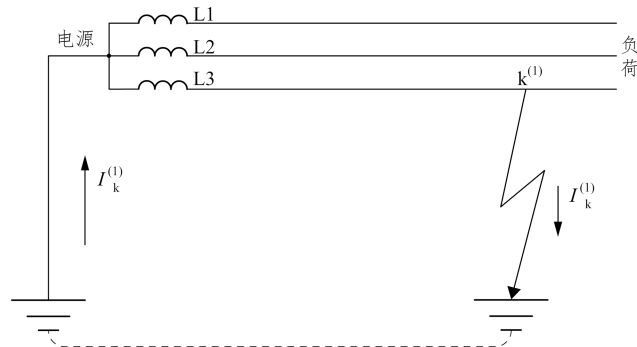


图 1.2 中性点直接接地或低阻接地的电力系统

中性点直接接地或经过电抗器接地的系统，在发生一相接地故障时，故障的送电线被切断，因而使用户的供电中断。运行经验表明，在 1 000 V 以上的电网中，大多数的一相接地故障，尤其是架空送电线路的一相接地故障，具有瞬时恢复的性质。在故障部分切除以后，接地处的绝缘可以迅速恢复，而使送电线路可以立即恢复工作。目前在中性点直接接地的电网内，为了提高供电可靠性，均装设自动重合闸装置，在系统一相接地线路切除后，立即自动重合，再试送一次，如为瞬时故障，送电即可恢复。

中性点直接接地的主要优点是它在发生一相接地故障时，非故障相对地电压不会增高，因而各相对地绝缘即可按相对地电压考虑。电网的电压愈高，经济效果愈大；由于接地电流较大（中性点经过电抗器接地，可以起到适当减小接地电流的作用），继电保护一般都能迅速而准确地切除故障线路，且保护装置简单，工作可靠。

2. 中性点不接地方式

中性点不接地电力系统如图 1.3 所示。在正常运行时，电力系统的中性点与地处于绝缘状态。电力系统的三相导线之间及各相导线与地之间，沿导线全长都存在分布电容。如果三相导线完全对称，则各相导线对地的分布电容是相等的，可用位于线路中央的集中电容 C 代替，而相间电容较小，不予考虑。

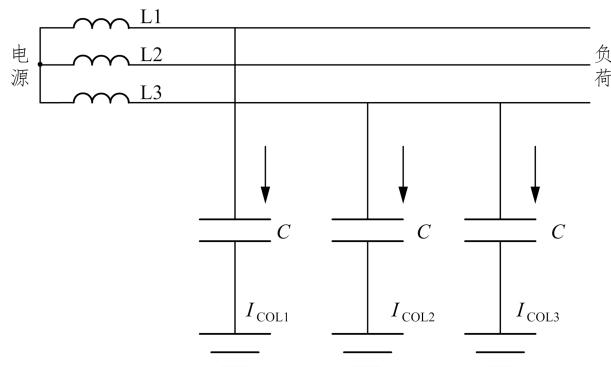


图 1.3 中性点不接地电力系统

(1) 正常运行时

$$\dot{U}_{L1} + \dot{U}_{L2} + \dot{U}_{L3} = 0 \quad (1.2)$$

$$\dot{I}_{L1} + \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} = 0 \quad (1.3)$$

三相电压对称，三相导线对地电容流过的电流也是对称的，三相电容电流相量之和为零，这说明没有电容电流经过大地流动。

(2) 单相金属性接地故障时 (L3 相)

中性点不接地电力系统 L3 相发生单相金属性接地故障示意图如图 1.4 所示。

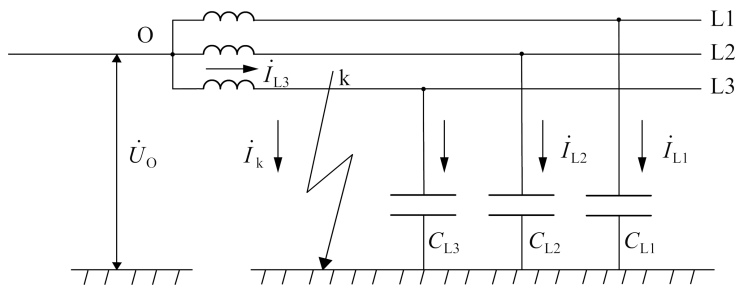
故障相对地电压、中性点对地电压、非故障相对地电压分别为

$$\dot{U}_{KL3} = 0 \quad (1.4)$$

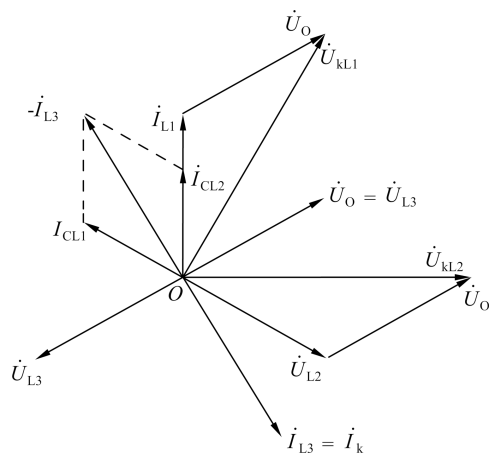
$$\dot{U}_O = -\dot{U}_{L3} \quad (1.5)$$

$$\dot{U}_{KL1} = \dot{U}_{L1} + \dot{U}_O = \dot{U}_{L1} - \dot{U}_{L3} = \sqrt{3}\dot{U}_{L3}e^{-j150^\circ} \quad (1.6)$$

$$\dot{U}_{KL2} = \dot{U}_{L2} + \dot{U}_O = \dot{U}_{L2} - \dot{U}_{L3} = \sqrt{3}\dot{U}_{L3}e^{+j150^\circ} \quad (1.7)$$



(a) 电路图



(b) 向量图

图 1.4 中性点不接地电力系统 L3 相发生单相金属性接地故障

中性点不接地系统单相接地故障的结论：

① 故障相对地电压降为零；非故障相对地电压升高为线电压，且相位相差 60° 。因此，线路及各种电气设备的绝缘要按线电压设计，绝缘投资所占比重加大，显而易见，电压等级越高绝缘投资越大。

② 三相之间的线电压仍然对称, 用户的三相用电设备仍能照常运行, 但允许继续运行的时间不能超过 2 h。

③ 接地电流在故障处可能产生稳定的或间歇性的电弧。

④ 如果接地电流大于 30 A 时, 将形成稳定电弧, 成为持续性电弧接地, 这将烧毁电气设备和可能引起多相相间短路。

⑤ 如果接地电流大于 5 ~ 10 A, 而小于 30 A, 则有可能形成间歇性电弧; 间歇性电弧容易引起弧光接地过电压, 其幅值可达 $(2.5 \sim 3) U_\phi$, 将危害整个电网的绝缘安全。

⑥ 如果接地电流在 5 A 以下, 当电流经过零值时, 电弧就会自然熄灭。

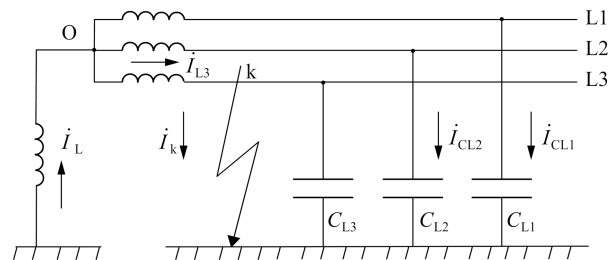
3. 中性点经消弧线圈接地方式

消弧线圈安装在变压器或发电机中性点与大地之间, 它是一种具有气隙铁心的电抗器。

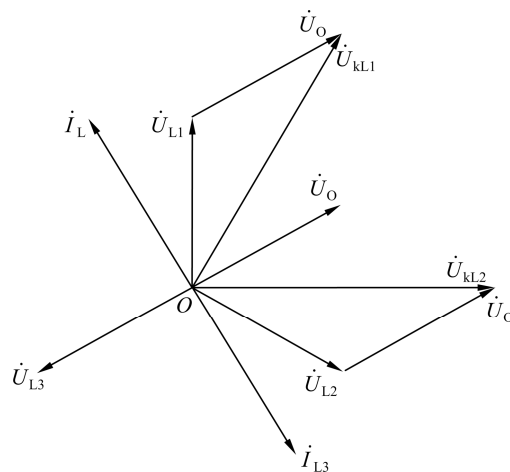
(1) 单相 (L3 相) 金属性接地故障

如图 1.5 所示, L3 相发生接地时, 中性点电压变为 $-U_{L3}$, 在消弧线圈作用下, 产生电感电流 (滞后 90°), 其数值为

$$I_L = U_{L3} / X_L = U / X_L \quad (1.8)$$



(a) 电路图



(b) 向量图

图 1.5 中性点经消弧线圈接地电力系统的单相接地