

城市轨道交通职业教育系列教材——城轨供电技术

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG ZHIYE JIAOYU XILIE JIAOCAI
CHENGGUI GONGDIAN JISHU

城市轨道交通 供变电技术



主 编 ○ 李学武
主 审 ○ 彭大明

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG
GONGBIANDIAN JISHU

 西安交通大学出版社

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

主编 李学武

主审 彭大明

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书遵照最新颁布的《地铁设计规范》(GB 50157—2013)、《城市轨道交通技术规范》(GB 50490—2009)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. —成都: 西南交通大学出版社, 2016.7
城市轨道交通职业教育系列教材. 城轨供电技术
ISBN 978-7-5643-4786-4

I. ①城... II. ①李... III. ①城市轨道交通 - 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 (2016) 第 154637 号

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

主编 李学武

责任编辑 李芳芳
特邀编辑 寇云云
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话 028-87600564 028-87600533
邮政编码 610031
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 16.75
字数 418 千
版次 2016 年 7 月第 1 版
印次 2016 年 7 月第 1 次
书号 ISBN 978-7-5643-4786-4
定价 36.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

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者，分“运营管理”“工程技术”“车辆”“控制”“供电技术”五大类，系统地为读者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；努力体现二维码技术等移动互联网时代元素在图书中的应用，尽可能把生产实际和研究成果，用立体生动的形式予以表达，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

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、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,讲解接地的基本概念及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,详细讲述了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,详细分析了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,旨在引导读者学习,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：李学武编写第二章、第五章、第八章、第九章、附录，并负责全书统稿工作；陈莉编写第四章、第六章；岳梅编写第一章、第十章；宋延军编写第三章；杜庆彦编写第七章。

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。

由于编者水平所限，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	1
第一节 电力系统	1
第二节 高压电气设备	11
第三节 变配电所电气主接线	14
第四节 城市轨道交通系统	19
第五节 城市轨道交通供电系统	23
第二章 城市轨道交通供电系统变电所	32
第一节 主变电所	32
第二节 中压供电网络	39
第三节 降压变电所	45
第四节 牵引降压混合变电所	49
第三章 干式变压器与整流机组	53
第一节 干式变压器	53
第二节 牵引整流机组	58
第四章 交流开关柜	66
第一节 电弧理论	66
第二节 六氟化硫组合电器 (GIS) 概述	73
第三节 交流高、中压开关柜中的断路器	81
第四节 交流高、中压开关柜中的隔离开关	92
第五节 交流高、中压开关柜中的互感器	97
第六节 交流高、中压开关柜中的操动机构	111
第七节 交流高、中压开关柜的操作、巡视与维护	121
第八节 0.4 kV 低压开关柜的操作、巡视与维护	125
第五章 直流开关柜	133
第一节 直流开关柜的结构与原理	133
第二节 直流馈线柜的操作、巡视与维护	139
第六章 限流限压与接地装置	144
第一节 避雷器的认识	144

第二节	避雷器的检修与维护	149
第三节	电抗器的认识	151
第四节	电抗器的维护	154
第五节	城轨交通供电系统的接地装置	155
第六节	城轨交通供电系统接地装置的维护	163
第七章	杂散电流	166
第一节	杂散电流的形成与危害	166
第二节	杂散电流防护、监测与排流	169
第八章	二次接线	179
第一节	二次接线概述	179
第二节	展开式原理图	183
第三节	安装接线图	185
第四节	控制电路概述	192
第五节	高压 GIS 组合电器断路器控制、信号电路	193
第六节	交流中压开关柜控制、信号电路	197
第七节	变电所信号系统概述	205
第九章	自用电系统	210
第一节	自用电系统概述	210
第二节	自用电交流屏	217
第三节	阀控式密封铅酸蓄电池 (VRLA 蓄电池)	220
第四节	高频开关直流操作电源系统	227
第五节	应急照明电源	234
第十章	电力监控	239
第一节	电力监控系统的概念及其硬件构成	239
第二节	电力监控系统功能	245
附录一	常用电气设备新旧文字符号对照表	250
附录二	电气设备常用图形符号	253
参考文献		259

第一章 系统认知



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功能、构成及其各部分功能。
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

为了提高供电的可靠性和经济性,将许多分散的各种形式的发电厂,通过送电线路、变电站和电力用户连接起来,就形成了电力系统。由发电机、升压和降压变电站、输配电线路及用电设备有机连接起来的总体,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。

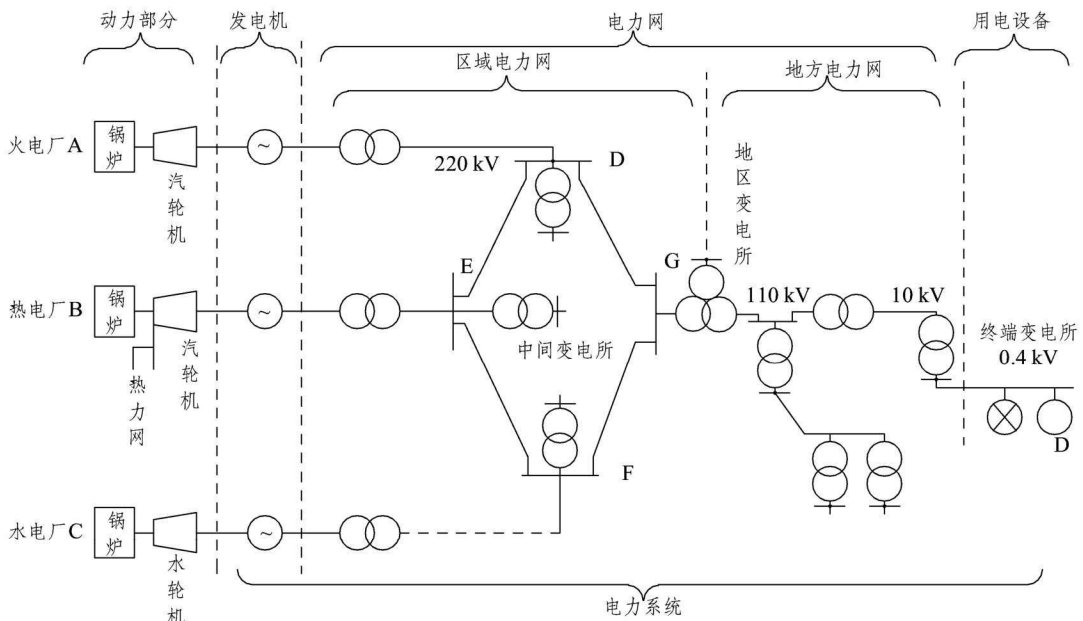


图 1.1 动力系统、电力系统、电力网的示意图

电力系统由发电厂、变配电所、电力线路和电能用户组成。

1. 发电厂

按使用能源划分有下述基本类型：

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汽（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，枢纽变电所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适于生产、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。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。因此分两种情况讨论：

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、供电质量指标

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) 电压偏移

电压偏移又称电压偏差，是指用电设备端电压与用电设备额定电压之差对额定电压的百分数，即

$$\Delta U\% = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100 \quad (1.1)$$

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。

电压偏移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。我国规定，正常情况下，用电设备端子处电压偏移的允许值为：

- ☆ 电动机 $\pm 5\%$ 。
- ☆ 照明灯一般场所 $\pm 5\%$ ；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 $\pm 5\%$ 。

《电能质量供电电压允许偏差》(GB 12325—90)规定电力系统在正常运行条件下，用户受电端供电电压的允许偏差为：

- ☆ 35 kV 及以上供电和对电压质量有特殊要求的用户为额定电压的 $+5\% \sim -5\%$ 。
- ☆ 10 kV 及以下高压供电和低压电力用户为额定电压的 $+7\% \sim -7\%$ 。
- ☆ 低压照明用户为额定电压的 $+5\% \sim -10\%$ 。

(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，并对附近的通讯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，频率的变化范围一般不应超过 ± 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 8760 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%。

根据突然中断供电所造成的损失程度分类，可以分为 I 级负荷、II 级负荷、III 级负荷。

(1) I 级负荷

I 级负荷是指突然中断供电将会造成人身伤亡或会引起周围环境严重污染的、造成经济上的巨大损失的或将会造成社会秩序严重混乱或在政治上产生严重影响的负荷。I 级负荷应

由两个相互独立的电源供电。如果两个电源不是相互独立而有联系时，应该做到在发生故障时，两个电源的任何部分不会同时受到损坏；或者有些 I 级负荷允许在很短的时间内能中断供电，能在发生任何一种故障时，有一个电源不中断供电；或由值班人员完成必要的操作，迅速恢复一个电源的供电。

(2) II级负荷

II级负荷是指突然中断供电将会造成经济上较大损失的或将会造成社会秩序混乱或在政治上产生较大影响的负荷。II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。

(3) III级负荷

III级负荷是指不属于上述 I 类和 II 类负荷的其他负荷。III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，因而应立即使继电保护动作，将故障部分切除。

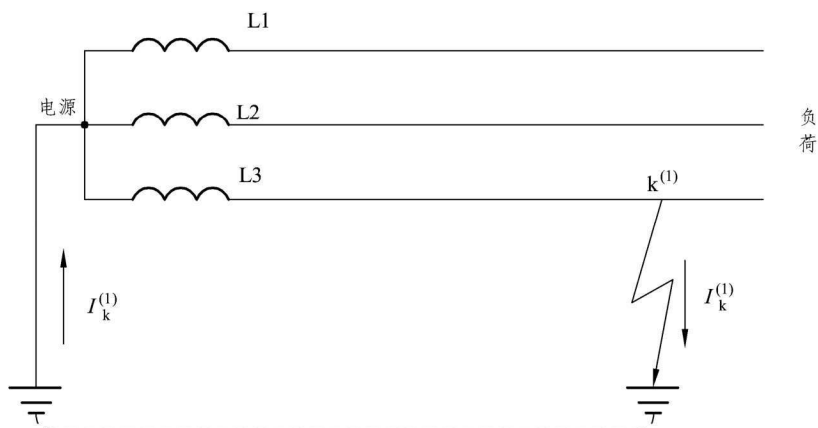


图 1.2 中性点直接接地或低阻接地的电力系统

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，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。

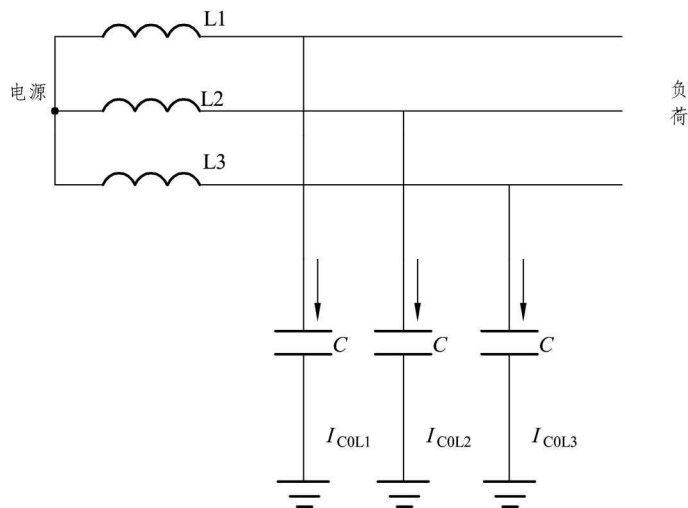


图 1.3 中性点不接地电力系统

(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 (C 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

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

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

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

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

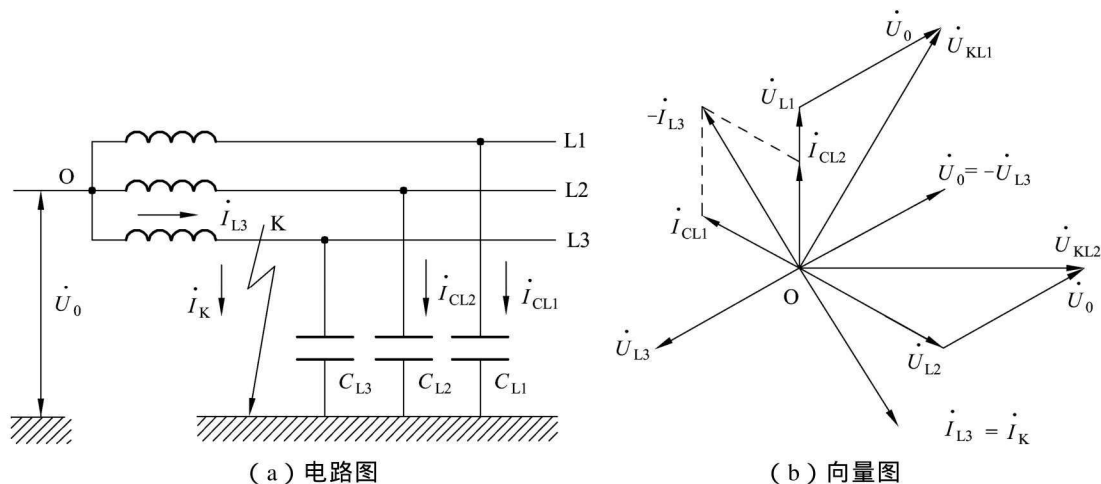


图 1.4 中性点不接地电力系统 L3 相发生单相金属性接地故障

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

消弧线圈是安装在变压器或发电机中性点与大地之间的具有气隙铁芯的电抗器。

(1) 单相 (L3 相) 金属性接地故障

如图 1.5 所示，C 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

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

当发生单相接地故障时，接地故障相与消弧线圈构成了另一个回路，接地故障相接地电流中增加了一个感性电流，它和装设消弧线圈前的容性电流的方向刚好相反，相互补偿，减