

铁路职业教育铁道部规划教材

电力牵引供变电技术

DIANLIQIANYINGONGBIANDIANJISHU

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

陈海军 主编

高职

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

(高 职)

电力牵引供变电技术

陈海军 主 编

图 书 在 册 编 目 (CIP)

ISBN 978-7-113-08283-4

I. 电... II. 陈... III. 电... IV. U533

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 003928 号

电力牵引供变电技术

主 编 陈海军

电子邮箱: qd1872133@163.com

电 话: 010-21873133

责任编辑: 陈海军

封面设计: 陈海军

版式设计: 陈海军

校对: 陈海军

地址: 北京市宣武区广安门内大街 8 号 邮政编码: 100045

中国铁道出版社 (社)

北京市丰台区右安门内大街 8 号

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

787 mm × 1 092 mm 1/16 印张: 10.75 字数: 412 千

ISBN 978-7-113-08283-4 · 5183

中国铁道出版社

7.35 00 元

2008 年 · 北 京

版式设计: 陈海军

印刷: 北京印刷厂

电 话: 010-21873170 电 邮: qd1872133@163.com

北京市宣武区广安门内大街 8 号 邮编: 100045

内 容 简 介

本书系统地介绍了电气化铁道供变电技术,以交流电气化铁道为重点,同时对迅速发展的直流牵引供电系统作了介绍,以增加读者对牵引供电系统的认识。内容包括:电力牵引供电系统概述、牵引供电系统主要电气设备、电气主接线及高压配电装置、变电所接地与防雷、二次接线装置、短路概念及电气设备选择原则及直流牵引供电系统等。

本书可作为电气化铁道供电专业高职教材,也可作为现场工程技术人员参考用书。

(照 高)

木 站 申 变 共 用 牵 式 申

图书在版编目(CIP)数据

电力牵引供变电技术/陈海军主编. —北京:中国铁道出版社,
2008. 2

铁路职业教育铁道部规划教材. 高职

ISBN 978-7-113-08583-4

I. 电… II. 陈… III. 电气化铁道—供电装置—高等学校:
技术学校—教材 IV. U223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 005958 号

书 名:电力牵引供变电技术

作 者:陈海军 主编

责任编辑:阚济存 武亚雯

电话:010-51873133

电子信箱:td51873133@163.com

封面设计:陈东山

责任校对:孙玫

责任印制:金洪泽

出版发行:中国铁道出版社(地 址:北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码:100054)

印 刷:河北省遵化市胶印厂

版 次:2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

开 本:787 mm × 1 092 mm 1/16 印张:16.75 字数:415 千

书 号:ISBN 978-7-113-08583-4/U · 2182

定 价:32.00 元

中 国 铁 道 出 版 社

版 权 所 有 侵 权 必 究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前 言

本书为铁路职业教育铁道部规划教材,是根据铁路高职电气化铁道供电专业教学计划“电力牵引供变电技术”课程教学大纲的要求编写的。本书可作为电气化铁道技术专业的专业课教材,并适用于现场的工程技术人员参考使用。

本书系统地介绍了电气化铁道供变电技术,以交流电气化铁道为重点,同时对迅速发展的直流牵引供电系统作了介绍,以增加读者对牵引供电系统的认识。牵引供电系统中又以牵引变电所为重点,介绍了供电系统一次设备和二次电气设备,对变电所一次电气设备的构成、类型、工作原理及运行维护技术进行了较详细的介绍;对变电所二次装置的构成、工作原理、整定和调试方法及运行维护技术进行了较详细的介绍,对一次设备和二次设备的介绍结合了现场的实际情况。内容的编写以牵引变电所运行维护人员的职业技能为出发点,紧扣职业标准,理论与实践相结合,力求使读者掌握必备的基本知识,同时能掌握必要的技能。

为加强读者对现场的认识,本书增加了典型案例,通过案例的分析,使读者对现场的故障处理有更深入的认识。对于现场的读者,也可获得有益的经验 and 启发。

本教材立足于培养应用型技术人才,图文并茂,结合现场技术,力求通俗易懂。书中的图纸以现场图纸为参考,参照最新的国家标准对部分图纸的文字和符号进行了更新。考虑到高职教育的特点,以突出应用和技能为重点,对以往较为繁琐复杂的计算进行了舍弃,如有必要,可参考其他手册。另外需要说明的是,本次组织编写的教材中,综合自动化的内容自成一书,因此本书中没有重复这部分内容。

本书由广州铁路职业技术学院陈海军主编,广州铁路集团公司广州供电段王维北和南京铁道职业技术学院苏州校区李乐参编。第三、六、七章由李乐和王维北编写,其余由陈海军编写。

由于编者的水平所限,书中难免存在疏漏和错误,诚恳欢迎读者提出宝贵意见。

编 者

2007 年 12 月

目 录

第一章 电力牵引供电系统概述	1
第一节 电力牵引特点及发展概况	1
第二节 电力系统简介	4
第三节 三相电力系统的中性点运行方式	9
第四节 牵引供变电系统的组成	14
第五节 牵引供电方式	17
本章小结	20
复习思考题	21
第二章 牵引供电系统主要电气设备	23
第一节 电气设备概述	23
第二节 牵引变压器	24
第三节 互感器	34
第四节 高压断路器	42
第五节 高压隔离开关和负荷开关	50
第六节 熔断器	53
第七节 避雷器、放电保护器、抗雷线圈及电抗器	58
第八节 低压开关电器	62
第九节 无功补偿装置	65
第十节 成套电器装置	67
本章小结	72
复习思考题	74
第三章 电气主接线及高压配电装置	76
第一节 电气主接线概述	76
第二节 牵引变电所 110 kV 侧的电气主接线	78
第三节 27.5 kV 或 55 kV 侧电气主接线	84
第四节 牵引变电所主接线举例	90
第五节 高压配电装置的布置	96
本章小结	106
复习思考题	106
第四章 变电所接地与防雷	108

第一节 接地基本知识	108
第二节 变电所的接地装置	112
第三节 变电所防雷措施	118
本章小结	121
复习思考题	122
第五章 二次接线装置	123
第一节 二次接线基本知识	123
第二节 高压开关控制及信号回路	136
第三节 中央信号系统	145
第四节 测量装置与绝缘监察装置	151
第五节 直流操作电源	155
本章小结	166
复习思考题	167
第六章 牵引变电所的运行及故障处理	168
第一节 牵引变电所运行基本常识	168
第二节 牵引变电所故障处理	182
第三节 牵引变电所故障处理实例分析	199
本章小结	209
复习思考题	210
第七章 短路概念及电气设备选择原则	211
第一节 短路概念及效应	211
第二节 高压电气设备的选择原则	214
本章小结	216
复习思考题	217
第八章 直流牵引供电系统	218
第一节 直流牵引供电系统的供电方式	218
第二节 城轨供电系统的主要电气设备	221
第三节 城轨变电所电气主接线	229
本章小结	233
复习思考题	234
附录 1 二次电路图用图形符号开关、控制和保护器件	235
附录 2 二次电路图用图形符号测量仪表、灯和信号器件	246
附录 3 二次电路图用图形符号移植自其他技术文件的器件、连接和标记	250
附录 4 项目种类代号用的字母码	254
附录 5 小母线新旧文字符号及其回路标号	257
参考文献	259

1911年12月,在天津建成我国第一条有轨电车线路,全长2.91 km,为单轨制。1924年,在上海建成我国第一条公共汽车线路,全长12.1 km,为双轨制。1928年,在北京建成我国第一条有轨电车线路,全长2.91 km,为单轨制。

城市轨道交通牵引供电系统

第一章

电力牵引供电系统概述

本章介绍电力牵引的优点,简述电气化铁道的发展情况。对电力系统的基本知识及电力系统的中性点运行方式作了介绍。重点讲述了电力系统基本知识、牵引供电系统的组成、各部分功能及电力牵引的供电方式。

第一节 电力牵引特点及发展概况

电力牵引是一种新型有轨运输牵引动力形式。在干线铁路、城市轨道交通和工矿运输中有着广泛的应用。电力牵引是利用电能作为牵引动力,将电能转换为机械能,驱动铁路列车、电动车组和城市轨道交通车辆等有轨运输工具运行的一种运输形式。

电力牵引按其牵引网供电电流制式不同,分为工频单相交流制、低频单相交流制和直流制。我国电气化铁路采用工频单相交流制电力牵引,直流制电力牵引仅用于城市轨道交通系统和工矿运输系统。

一、电力牵引特点

电力牵引运输具有一系列优点:

1. 电力牵引机车本身不带燃料,可使用二次能源,为非自给式牵引动力,并由大容量电力系统供电,连接全国电网,能源有保证。
2. 机车或动车组总功率大,具有启动和加速快、过载能力强、运输能力大等特点,能满足各种现代交通运输对快速、大运输能力的需要。
3. 不造成空气和环境(噪声)污染。
4. 电力牵引的总效率高,节约能源。我国的铁路机车牵引经历了蒸汽机车、内燃机车和电力机车的发展阶段。统计资料表明,电力牵引在全部或部分为水电供电的情况下,包括发电厂、输变电和供电系统以及机车、车辆效率在内,比用内燃机为动力的内燃机车和汽车等运输工具的总效率要高出几个至几十个百分点。因而采用电力牵引可有效节约能源,并降低运营成本。

5. 安全性高。随着信息技术、微电子技术的广泛应用,电力机车可实现实时检测故障、自动驾驶、遥测及遥控等,电力牵引系统易于实现全面自动化和信息化,从而大力提高劳动生产率和经济效益。

当然,电力牵引也存在某些缺点,主要是其一次投资费用较同类运输工具要高。

从上可知,电力牵引的综合优势是明显的,自20世纪50年代以来,铁路牵引动力电气化已成为世界范围内铁路技术革命的方向、铁路现代化的标志。许多大城市的公共交通运输模

式,在经历了多种运输工具的运营实践、比较后,发展城市轨道交通电力牵引,已日益引起人们的广泛重视。

二、我国电气化铁路发展概况

我国第一条电气化铁路是宝成线宝鸡至凤州段,于1961年8月建成,全长94 km。当时的设想是在山区建设电气化铁路以克服机车爬坡的困难,在平原地带仍以蒸汽和内燃牵引为主。1961~1975年仅建成电气化铁路697 km,电气化铁路建设进展缓慢。

20世纪80年代,我国实行改革开放政策,铁路电气化进程加快。1976~1980年间,新建电气化铁路将近1000 km。1983年,铁道部确定以铁路牵引动力以电力机车为主的方针,既有主要繁忙干线相继电气化。1981~1985、1986~1990、1991~1995三个五年计划期间,分别建成电气化铁路2474 km、2800 km和2762 km,1996~2000年共建成电气化铁路约5000 km,电气化铁路得到了高速发展。我国电气化铁路发展历程见表1-1。

表1-1 电气化铁路发展历程表

年 代	建成电气化铁路里程(km)	建成电气化铁路累计里程(km)
1961~1965	94	94
1966~1970	197	291
1971~1975	396	697
1976~1980	974	1661
1981~1985	2507	4168
1986~1990	2787	6955
1991~1995	3012	9917
1996~2000	4783	14750
2001~2005	5382	20132

至“十五”期末(2005年),全国铁路运营里程达75000 km,电气化里程超过2万 km,比“九五”末增长35.6%。根据国家“十一五”规划纲要和《中长期铁路网规划》,明确提出了未来铁路发展的主要目标和重点任务。“十一五”期间,中国铁路发展的主要目标是:建设新线17000 km,其中客运专线7000 km,建设既有线复线8000 km,既有线电气化改造15000 km,全国铁路运营里程超过90000 km,2010年电气化铁路可达35000 km,电化率达45%以上。到2020年,全国铁路营业里程达到100000 km以上,电化率达到50%,我国电气化铁路发展前景辉煌。

三、我国铁路发展电力牵引的适应性和重大意义

我国在确定铁路技术发展的总原则中,明确提出应以提高运输能力为中心,保证运输安全为前提,不断提高运输质量和效益。为此,采取的重要战略措施之一是积极进行牵引动力改革,大力发展电力牵引,合理发展内燃牵引;加速繁忙干线的电气化,逐步提高电力牵引承担运输总工作量的比重,并在各种牵引形式中占主导地位。国家和铁路部门制定的国民经济与社会发展近期及远景规划中,也进一步肯定了上述方针与政策。

我国制定铁路大力发展电力牵引的政策并积极推进实施,是和我国地广人多、地貌复杂

(山区、高原多)、资源分布不均衡,以及铁路网的长度和密度远不能适应国民经济发展,长期以来铁路运输一直成为制约国民经济发展的瓶颈等具体情况密切相关的。按照我国国情和国家的财力、物力,要又快又省地提高铁路运输能力,有效地解决铁路运能和不断增长的运量之间的矛盾,必须从铁路本身的技术改革,首先是牵引动力改革和适当增建新线与改善路网结构两方面着手。根据我国和世界各国铁路技术改革的长期实践证明,大力发展电力牵引,加速繁忙干线电气化,是在最短时间内提高铁路运输能力的一条有效途径。发展电力牵引,对我国铁路的重要意义主要表现在:

1. 提高运输能力和效益,主要取决于对列车重量、密度和速度的优化组合。我国铁路基本上是采用客、货共线的运输模式,在线路固定、设备定型的情况下,运输三要素是相互制约的。一般来说,在扩大铁路输送能力方面,主要依靠提高行车密度和列车重量;在加速客、货列车运行速度和加速机车车辆周转方面,提高行车速度是重要因素。为适应社会主义市场经济的需求,根据不同线路和运输模式的特点,尤其对于客、货共线繁忙的干线铁路,提高客、货列车速度和货物列车重量,积极增加行车密度都是刻不容缓的现实任务。

牵引动力的类型和功率是提高列车重量的主要因素,也是提高行车速度、密度的关键。电力机车不带原动机,机车功率主要受牵引电机绝缘材料和悬挂空间的限制。国产 SS₈ 型客运电力机车最高速度可达 170 km/h,功率为 3 600 kW。目前新型的电力机车运行速度已达 200 km/h。而内燃机车的功率,则因柴油机、交流发电机、整流器和传动、辅助设备体积大,受车体空间限制以及柴油机加工技术要求极高等条件影响,其单节(机)功率不可能做到很大。

在同等牵引重量情况下,列车速度与机车技术特性密切相关。电力牵引的最低计算速度比内燃牵引高一倍以上。电力机车不需加水 and 燃料,机车整备时间短,启动时间短(约 1 min,内燃机车为 2 min)。此外,电力机车具有有效的电气制动手段,能使列车在长大下坡道上高速行驶时,且空气制动的制动力迅速降低的情况下,保证以较高速度保持安全运行。综合上述各项因素,电力机车牵引的列车技术速度、旅行速度都比内燃机车牵引高。

行车密度牵涉的制约因素较多。电力机车牵引力大,行车速度高,有利于减小双线自动闭塞条件下追踪列车间隔时间,以提高行车密度。

从以上分析可知,采用电力牵引对列车重量、密度、速度三者的优化组合十分有利,从而达到提高铁路运输能力的目的。据研究结果表明,我国三大干线铁路,采用电力牵引后运输能力可达到:旅客列车 45~50 对,重车方向年输送能力为 90~120 Mt,并可提高客运速度至 140~160 km/h 及以上。与采用内燃机车牵引相比,运输能力有较大提高。

对于大运量的煤运和客运繁忙区段均采用电力牵引,我国修建了大秦重载运输专线,列车载重量达 10 000 t 以上,在广深段曾开通了速度为 160 km/h 的准高速铁路,目前已提速至 200 km/h。可以预见,随着我国铁路运输的发展和运量的不断增长,电力牵引将发挥日益重要的作用。

2. 铁路电气化为快速、又好又省地缓解我国铁路运输紧张状态提供了有效途径

我国铁路网 2005 年总长为 75 000 km,与国土面积相比较是极不相称的。在短期内要大量投资修建足够的铁路新线是不可能也是不现实的。因为新建铁路要形成运输能力所需周期较长,且新建铁路投资巨大,每公里造价达数千万元。而铁路电气化的全部单位造价约为上述的 1/7~1/10,建成投产的周期一般为 2~3 年,投资回收期为 8~10 年。结合上述电力牵引对提

高运输能力的显著效果,对现有铁路实现电气化和修建电气化新线,其相对投资实际较省,且见效快,综合效益极为有利。

3. 铁路牵引动力电气化适应我国能源资源结构状况,并可大幅度实现节能

铁路牵引动力现代化的决策必须以国家的能源资源结构和能源政策为依据,并应尽量节约能源消耗。我国一次能源资源以水力和煤炭最丰富,原油储量十分有限。我国能源工业的方针是,以发展电力为中心,以煤炭为基础,积极发展新能源,改善能源结构。为此,我国用以发电的能源占一次能源的比重逐年有所增长,其中以火电和水电为主。从能源增长速度看,电力工业一直保持约 10% 的年增长率,而同期内原油的增长速度一直较慢,石油的消耗量却日益增长,供需缺口的趋势逐渐扩大。随着发电用一次能源结构的变化,水电及高热效率火电厂在总发电量中所占比例日益提高,其直接效果是国家宏观的能源利用率增高。对铁路运输采用电力牵引带来的好处是,电力机车总效率可相应提高,节能效果可观。

铁路电气化导致对通信线路干扰,对电力系统产生某些不利影响等缺陷,随着现代技术的不断发展,已经获得或正在寻求有效的解决途径。

四、我国城市公共交通电力牵引发展简况

我国大城市的公共交通运输,最早采用有轨电车和公交汽车,以后发展为公交汽车和无轨电车。从 20 世纪 60 年代初开始,个别大城市修建了少量地下铁道。由于汽车数量激增,成为主导运输工具,造成交通堵塞、空气污染、噪声严重,并日益成为城市的一大公害。

近年来,大规模经济建设的迅速发展,大城市结构及其经济布局产生了巨大变化,其辐射城乡的作用日益突出,促使城市流动人口大增,人们出行、活动更为频繁。据统计,个别特大城市每天客运量已突破 1000 万人次,一般大城市主通道高峰期客流量达 1~3 万人次的现象经常出现且已成为大城市普遍存在的公共交通困扰问题。

城市公共交通存在的困扰问题,必须从客运工具革新和运输模式方面加以调整解决。目前,国内外较多采用的公交客运工具有三种:一是大运量的地下铁道,其单向最大小时客运能力为 3~6 万人次;二是中等客运量的轻轨交通运输,其单向最大小时客运能力为 1~3 万人次;三是低客运量的公共汽车、电车,其小时客运能力为 0.4~0.8 万人次。利用这几种运输工具的优化匹配,可因地制宜地构成各种公共交通运输模式,从而达到预期效果。

限于我国的经济条件,地下铁道的造价昂贵,金属、建材消耗量很大,目前只在特大或中心城市兴建,且工期长、工程量大。据研究比较并结合我国国情,一般大城市采用中等运量的轻轨交通方式。由于其造价较低,线路建在地面或高架(也可少量在地下),采用立体交叉,车道为半封闭或全封闭的专用轨道,车辆可单行或联挂编列,运营灵活、安全,是一种既经济,又适应性强,具有发展前景的现代城市交通运输系统。目前国内已有若干大中城市在研究筹建或正进行轻轨交通的设计和组织实施。

城市轨道交通包括地铁和轻轨,均采用电力牵引。

第二节 电力系统简介

随着现代工业的发展,电力工业在现代化的建设中扮演着越来越重要的角色。电能是绝大多数工矿企业现代化设备的动力能源,电能可以十分经济又方便地进行输送和分配;电能可

以很方便地与其他形式的能量互相转换;电能在使用中易于被操作和控制,使得其自动化生产、输送和在各个领域中的普及应用易于得到实现。电能以其极大的优越性,广泛应用于各个领域。

一、电力系统的组成

电能的生产、输送、分配和使用组成了一个系统,称为电力系统,主要由发电厂、电力网、电能用户组成。图 1-1 是电力系统示意图。

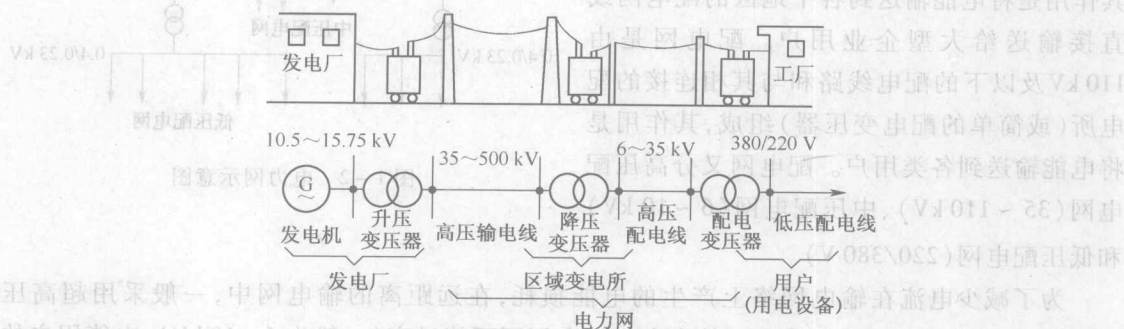


图 1-1 电力系统示意图

1. 发电厂

发电厂是生产电能的工厂,它的生产原材料是煤、水力、核能等能源,它的产品就是电能。也可以说,发电厂就是将煤、水力、核能等一次能源转换为电能——二次能源的工厂。按照发电厂所使用的一次能源不同,发电厂可分为:

(1) 火力发电厂

火力发电厂又称火电站或火电厂。火电厂的能源有煤、石油或天然气。我国火电厂的主要能源是煤。有的火力发电厂除了供应电能外,还向电厂附近的工矿企业或居民区供应热能。这种兼供热能的发电厂称为热电厂。

(2) 水力发电厂

水力发电厂又称水电站或水电厂。水力发电厂的能源是水。它是将水流的位能通过水轮发电机转换为电能。水电站又分为三类:堤坝式水电站(如长江三峡水电站)、引水式水电站(在具有相当坡度的河段上游筑一低坝,拦住河水,然后用引水道将水直接引到厂房内,通过水轮发电机将水能转换为电能)、混合式水电站(堤坝式和引水式水电站的组合)。

(3) 核发电厂

核发电厂又称核电站或核电厂。它的发电原理和火力发电原理相类似,只是热能的产生方式不同而已。核电站能源是核能燃料铀或钚,它利用原子能燃料裂变产生的大量热能进行发电。

火力发电和水力发电在我国电能生产中占有很大的比例,除此之外,还有风力、地热和太阳能发电等。

2. 电力网

电力网是电力系统的重要组成部分,电力网担负着将发电厂和电能用户连接起来组成系统的任务,它对于电力系统的可靠性和经济性运行有着重要的意义,图 1-2 是电力网组成示

意图。自其开始,随着牵引供电技术的发展,牵引供电系统也逐渐形成了自己的特点。

电力网由各种电压等级的输、配电线路和变(配)电站(所)组成。电力网的任务是将电能从发电厂输送和分配到电能用户。按其功能常分为输电网和配电网两大部分,输电网是由 220 kV 及以上的输电线路和与其相连接的变电所组成,是电力系统的主要网络,其作用是将电能输送到各个地区的配电网或直接输送给大型企业用户。配电网是由 110 kV 及以下的配电线路和与其相连接的配电所(或简单的配电变压器)组成,其作用是将电能输送到各类用户。配电网又分高压配电网(35 ~ 110 kV)、中压配电网(6 ~ 10 kV)和低压配电网(220/380 V)。

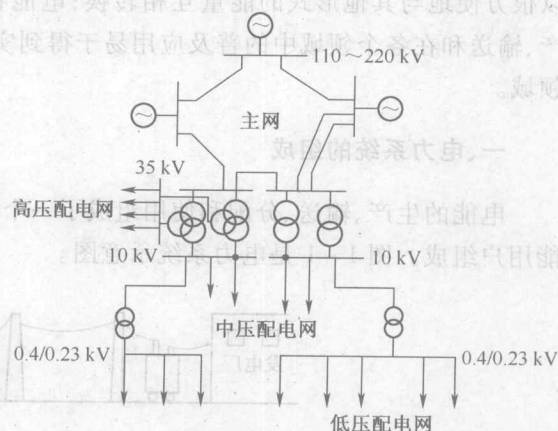


图 1-2 电力网示意图

为了减少电流在输电网络上产生的电能损耗,在远距离的输电网中,一般采用超高压(330 kV 以上)输电方式。发电厂的发电机端电压不可能过高(一般为 6 ~ 10 kV),电能用户的电压也不可能很高(一般为 10 kV 及以下),因此,电力网还担负着改变电压等级的作用,这就是变、配电所(站)。变电所(站)由电力变压器和配电装置组成,它是改变电压和分配电能的场所;将电压升高的称为升压变电所(站);将电压降低的称为降压变电所(站);而配电所(站)只负担分配电能的任务。

3. 用户

电能用户主要包括工矿企业和居民区等。

按用户的重要程度和对供电可靠性的要求,用电负荷可分为三类,负荷等级不同的用户对供电可靠性的要求有所差别。

(1) 一级负荷

一级负荷是用户负荷中对供电可靠性要求最高的负荷,这类负荷中断供电将造成人身伤亡、重要设备严重损坏、重要产品大量报废、生产秩序被打乱并长期不能恢复或使城市生活发生严重混乱,如电气化铁路、铁路自动闭塞信号电源等。对这类负荷,必须有两路以上的独立电源供电。电气化铁路的牵引供电系统即属于一级负荷。

(2) 二级负荷

对二级负荷中断供电将造成产品产量及质量严重下降。对这类负荷,应有两路电源供电,且当任何一路电源失去后,能保证全部或大部分二级负荷的供电。当负荷较小或地区供电条件困难时,才允许由一路 6 kV 及以上的专用架空线供电。

(3) 三级负荷

三级负荷是指不属于一级负荷和二级负荷的其他负荷,这类负荷对供电可靠性要求不高,可以允许非连续性供电,这类负荷通常用一路电源供电。

二、电能质量指标

电力设备都是在一定频率的电压下工作的。电源的频率或电压偏差,都会影响用电设备

的寿命和效率,甚至会直接损坏用电设备,供电部门应保证供电质量。电能的质量指标主要包括以下方面。

1. 供电频率

我国国标规定工业用交流电的额定频率为 50 Hz,这也是国际电工学会规定的工业用交流电的标准频率,简称工频 50 Hz。当电力系统的有功功率电源不足或缺乏备用容量时,往往会造成低周波运行。当供电频率低于额定频率运行时,将会造成很大的危害:影响发电厂的安全运行,使电动机转速下降,影响企业产品的质量、影响电钟行走的准确性等,为此国家《供用电规则》规定:电网容量在 300 万 kW 及以上者,供电频率允许偏差 ± 0.2 Hz;300 万 kW 以下者,允许偏差 ± 0.5 Hz;电力系统非正常状况下,供电频率允许偏差不应超过 ± 1.0 Hz。

为了不影响生产,大部分企业供电系统采用了低周减载的保护装置,当系统出现低于要求频率运行状态时,保护装置将自动切除部分负荷,以提高系统供电频率,保证系统供电电能的质量。

2. 电压偏差

我国国家标准,规定额定电压等级分为三类。就是发电机、变压器和电气设备等在正常运行时具有最大经济效益时的电压。国家规定了标准电压等级系列,有利于电器制造业的生产标准化和系列化,有利于设计的标准化和选型,有利于电器的互相连接和更换,有利于备件的生产 and 维修等,应选择最合适的额定电压等级。国家标准规定的电压如表 1-2 至表 1-4 所示。

表 1-2 第一类额定电压(V)

直流	交流	
	三相(线电压)	单相
6	6	6
12	12	12
24	24	24
	36	36
48	48	48

表 1-3 第二类额定电压(V)

用电设备			发电机		变压器			
直流	三相交流		直流	三相交流	交流			
	线电压	相电压		线电压	三相		单相	
					一次线圈	二次线圈	一次线圈	二次线圈
110	/	/	115					
220	/	/	230	(230)	(220)	(230)	220	230
/	380	220	/	400	380	400	(380)	

表 1-4 第三类额定电压(kV)

电网和用电设备额定电压	交流发电机电压	变压器线圈电压	
		一次线圈	二次线圈
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6

续上表

电网和用电设备额定电压	交流发电机电压	变压器线圈电压	
		一次线圈	二次线圈
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
13.8、15.75、18、20	13.8、15.75、18、20	13.8、15.75、18、20	
35	35	35	38.5
66	66	66	72.6
110	110	110	121
220	220	220	242
330	330	330	363
500	500	500	550

注：铁道供电接触网额定电压为 25 kV；地下铁道直流畅网额定电压为 1500 V（如：广州地铁、上海地铁）、750 V（如：北京地铁）。此两种电压等级是行业特殊电压等级。

第一类额定电压是指 100 V 以下的电压，属于安全电压。主要用于安全照明、蓄电池组、直流控制、操作电源和实验室使用等。

第二类额定电压是指 100 V ~ 1000 V 的电压，称为低压。主要用于动力和照明设备。

第三类额定电压是指 1000 V 及以上电压，称为高压。主要用于发电、变电、输电、配电和高压用电设备。

当电流流过电力线路或变压器时将产生电压降和电能损耗，使受电端电压较送电端电压低一定的数值，在一般情况下，距离电源越远的用户受电电压越低。为了提高线路末端的电压，可采用提高送电端的电压，使送电端的运行电压高于其额定电压。由于负荷随时间不断变化，同一用电设备的受电电压也随时间而变化，即电压波动。电压的过分升高或降低都将影响设备的运行。

当电压过低时，照明设备不能正常发光。如白炽灯的运行电压低于其额定电压 5% 时，其发光效率将降低 18%，当运行电压低于其额定电压 10% 时，其发光效率将降低 35%。电动机运行电压低于其额定电压时，将使电动机的转矩下降，可能导致工厂产品报废。电压过低，造成电动机启动困难；运行中的电动机电压过低，绕组中电流增大温升超过允许值，加速了绝缘老化，甚至烧毁电动机。电压过低将增加电网中的电能损耗，且电气设备的容量不能被充分利用。当电力系统的电压下降 30% 左右时，因为电压下降可能引起系统解列，造成大面积停电，是电力系统最严重的事故。

而当电力系统电压升高超出规定范围时，同样会造成严重的后果：加速设备绝缘老化，缩短设备寿命，甚至直接烧毁设备。

因此国家规定了电压幅值波动偏差的要求：

①35 kV 及以上高压供电用户，电压偏差不得超过额定值的 $\pm 10\%$ ；

②10 kV 及以下的三相用户，电压偏差值不超过 $\pm 7\%$ ；

③220 V 单相供电的用户，电压偏差值不超过 $+7\% \sim -10\%$ ；

④铁路自动闭塞信号变压器的二次端子，其电压偏差值不超过额定电压的 $\pm 10\%$ ；

⑤在电力系统非正常情况下，用户受电端的最大偏差值不应超过额定值的 $\pm 10\%$ 。

3. 电压的不对称性和波形的非正弦性

电力系统中的用电负荷,有很大一部分是冲击性负荷和单相负荷(如电力机车等)它们除引起电压偏移和波动外,还造成三相电压的不对称,而引起三相系统的零点偏移现象,直接影响电气设备的运行。例如:电气化铁路采用单相牵引制,导致电力系统三相不对称运行。

理想状态的电力系统电压是 50 Hz 严格的正弦波,但系统中大量非线性电力元件(大型整流设备、荧光灯等气体放电灯等)的存在,导致高次谐波的出现,使得电压电流波形产生畸变,严重影响电气设备的运行。高次谐波已经成为公共电网的一大“公害”,国家对公共电网中的谐波也有明确的规定。

4. 供电的可靠性

供电中断将导致生产停顿和人们正常秩序生活被打乱,供电可靠性的衡量指标是以年平均供电小时占全年小时数(8760 h)的百分数表示的。如有一企业全年停电时间为 8.76 h,停电时间占全年小时数的 0.1%,则其可靠性为 99.9%,负荷等级不同的用户对供电可靠性的要求有所差别。

第三节 三相电力系统的中性点运行方式

三相电力系统的发电机和变压器,当采用星形接线时,存在中性点的运行方式问题,电力系统的中性点运行方式主要表现为中性点是否接地及如何接地,一般有两种状态:

1. 中性点非直接接地系统,又称为小电流接地系统。中性点非直接接地系统分为中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统。
2. 中性点直接接地系统,又称为大电流接地系统。中性点直接接地系统分为中性点直接接地和中性点经电抗器接地系统。

电力系统的中性点运行方式是一个比较复杂的综合性技术经济问题,对于电力系统供电的可靠性、绝缘设计、继电保护及自动装置的整定等有决定性的意义。当系统发生接地短路(特别是单相接地短路)时,中性点运行方式对系统有明显的影响。

一、中性点非直接接地的三相电力系统

1. 中性点不接地的三相电力系统

中性点不接地的三相电力系统接线原理如图 1-3 所示。由于任何两个相互绝缘的导体之间都存在着一定的电容,因此三相导线之间和各相对地之间,沿线路全长有分布电容存在。在电压的作用下将有附加电容电流流过。由于三相导线型号、规格相同,各相对地电压的有效值相同,故认为三相沿线路对地分布电容量相等。为了讨论方便,沿线路导线对地均匀分布电容,以集中的等效对地电容 C 代替,而导线间的电容较小,略去不计。

(1) 三相系统正常运行状态

在系统正常运行时,三相系统是对称的,则各相对地电压 $\dot{U}_U$ 、 $\dot{U}_V$ 、 $\dot{U}_W$ 对称,中性点 O 对地电位为零,各相对地电压等于相电压。电源各相电流 I_U 、 I_V 、 I_W 分别等于各相的负载电流 I_{LU} 、 I_{LV} 、 I_{LW} 与各相对地电容电流 I_{CU} 、 I_{CV} 、 I_{CW} 之和,即: $I_U = I_{LU} + I_{CU}$, $I_V = I_{LV} + I_{CV}$, $I_W = I_{LW} + I_{CW}$ 。由于三相电压对称,三相线路对地电容相等,则三相电容电流对称,其矢量和等于零,故地中无电流流过。

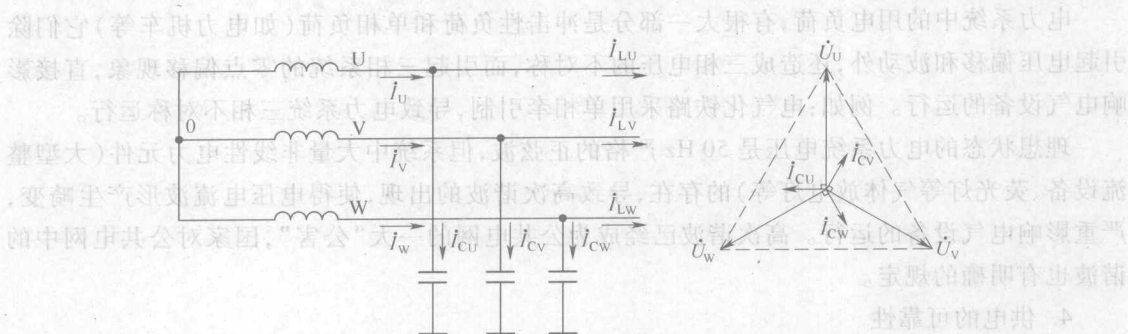


图 1-3 中性点不接地的系统示意图

要即(2)系统发生单相接地

当网络的绝缘被破坏,发生单相接地时,将引起各相对地电压和电流产生变化。为了分析的方便,认为系统运行在空载情况下发生单相短路,此时短路情况最严重。图 1-4 是单相(W相)接地电流电压相量图。

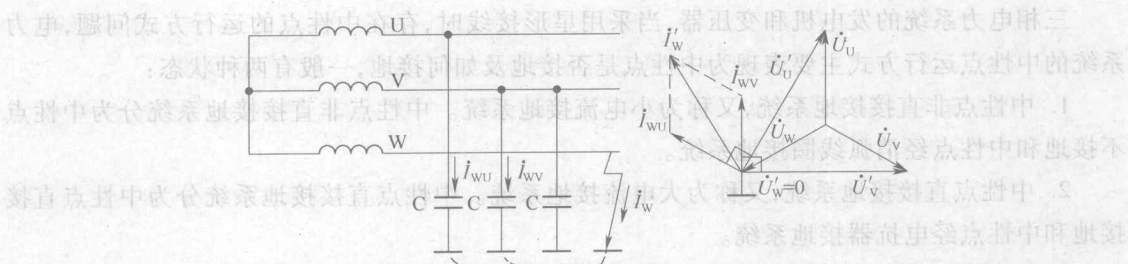


图 1-4 W 相接地电流电压相量图

①各相电压的变化

接地相(W相)对地电压为零,中性点对地电压不为零,而变为 $(-\dot{U}_w)$,而非接地相(U、V相)对地电压,变为该相相电压加上中性点对地电压 $(-\dot{U}_w)$,即:

$$\begin{aligned} |\dot{U}_w'| &= |\dot{U}_w + (-\dot{U}_w)| = 0 \\ |\dot{U}_v'| &= |\dot{U}_v + (-\dot{U}_w)| = |\dot{U}_v - \dot{U}_w| = \sqrt{3}U_v \\ |\dot{U}_u'| &= |\dot{U}_u + (-\dot{U}_w)| = |\dot{U}_u - \dot{U}_w| = \sqrt{3}U_u \end{aligned}$$

经分析得:三相相间电压对称关系没有改变,故障相对地电压为零,非故障相对地电压为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

②电流的变化

接地相(W相)对地电容被短接,非故障相对地电容上所加的电压为原来所加电压的 $\sqrt{3}$ 倍,所以,非故障相(U、V相)对地电容电流 I_{wv} 、 I_{wu} 为原来对地电容电流的 $\sqrt{3}$ 倍。

从图 1-4 可知,W 相接地电流 $\dot{I}_w' = -(\dot{I}_{wv} + \dot{I}_{wu})$,而 $\dot{U}_v'$ 与 $\dot{U}_u'$ 相位差是 60° ,则 $\dot{I}_{wv}$ 与 $\dot{I}_{wu}$ 同样相差 60° ($\dot{I}_{wv}$ 超前 $\dot{U}_v'$ 90° , $\dot{I}_{wu}$ 超前 $\dot{U}_u'$ 90°)。所以, $I_w = \sqrt{3}I_{wv}$ 接地相(W相)接地电流

上升为原对地电容电流的 3 倍。

③结论

对于中性点不接地的三相电力系统,当发生单相接地时,系统的相间电压对称关系没有改变,对三相负载无影响,因此允许系统继续运行。但由于非故障相对地电压为原来对地电压的 $\sqrt{3}$ 倍,故障相接地电流上升为原对地电容电流的 3 倍,如系统仍长期运行,可能引起非故障相对地绝缘薄弱处的绝缘被破坏而接地,导致两相接地短路故障,故只允许短期运行(有关规程规定:中性点不接地三相电力系统发生单相接地故障时可继续运行 2 h)。但此时系统应向值班人员发出警告。

当系统发生单相接地时,故障相接地电流上升为原对地电容电流的 3 倍,导致可能出现持续电弧或间歇电弧。持续电弧会引起相间短路,而间歇电弧会引起网络过电压。对于 6 ~ 10 kV 网络,当单相接地电流 I_c 大于 30 A 时,其持续电弧较大不易熄灭,容易造成相间短路,而间歇电弧造成的危险并不显著;但对于 20 kV 以上的网络,当 I_c 大于 10 A 时就会引起接地电弧。故一般当线路额定电压为 110 kV 以下、接地电流 I_c 在 10 A 及以下;线路额定电压为 6 ~ 10 kV,接地电流 I_c 在 30 A 及以下的网络,常采用中性点不接地的方式。

2. 中性点经消弧线圈接地的三相电力系统

当网络的线间电压为 110 kV 以下,单相接地电流又大于上述的数值时,为了防止单相接地时产生电弧,尤其是间歇电弧,应采取减少接地电流的措施。此时常采用中性点经消弧线圈接地的运行方式。图 1-5 为这种接地方式发生单相(图中为 W 相)接地时的系统图和电流相量图。

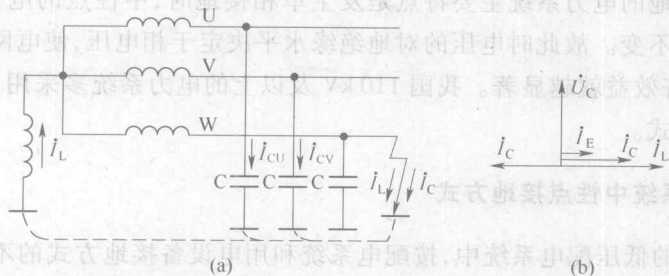


图 1-5 中性点经消弧线圈接地的系统单相接地示意图

(1)工作原理

正常工作时,中性点 0 对地电压为零,消弧线圈中无电流流过,当发生单相(U 相)接地时,此时消弧线圈两端的外加电压是 U_c ,流过电流 I_L , I_L 滞后 $U_c 90^\circ$,而接地电流 I_c 超前 $U_c 90^\circ$,故 I_L 与 I_c 方向相反。选择合适的消弧线圈,可使 I_L 与 I_c 相等,使接地电流 $I_E = I_c - I_L = 0$ 。这种原理称为电流补偿。

(2) I_L 与 I_c 的补偿关系

根据 I_L 与 I_c 的补偿关系,消弧线圈对接地电流的补偿分为三种。

①全补偿关系 当 $I_L = I_c$ 时,即 $\frac{1}{\omega L} = 3\omega C$,此时系统单相接地电流为零,称为全补偿。从消弧的观点来讲这种方式是最好的,但此时 $X_L = X_c$,容易引起系统串联谐振产生谐振过电压,故不采用这种补偿方式。