



普通高等教育铁道部规划教材

铁路供电技术

黄彦全 主编 金柏泉 主审



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育铁道部规划教材

铁路供变电技术

黄彦全 主 编
金柏泉 主 审

中国铁道出版社

2012年·北京

内 容 简 介

本书较全面地介绍了交流与直流电力牵引供变电技术基本理论、电气设备及电气系统基本工作原理,并详细介绍了供变电工程设计的基本方法、设备选型的基本计算方法、设备运行和维护的基本知识。全书分六章,内容包括:绪论,高压电器、开关设备的工作原理,电气主接线与高压配电装置,牵引变电所控制、信号和监测电路,牵引变电所设计,接地等内容。全书除了对供变电技术一般技术进行分析介绍外,侧重于牵引变电所的相关内容。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化(铁道牵引电气化与自动化)专业教材,也可作为工业自动化、轨道交通、电力系统及其自动化等专业的参考教材,同时供从事铁道牵引电气化、轨道交通电气化、电力系统及其自动化等部门从事设计、运营管理和维护的有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁路供变电技术/黄彦全主编. —北京:中国铁道出版社,2012. 10
普通高等教育铁道部规划教材
ISBN 978-7-113-13746-5

I. ①铁… II. ①黄… III. ①电气化铁道—供电—技术—高等学校—教材②电气化铁道—牵引变电所—技术—高等学校—教材 IV. ①U223. 5②U224. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 214884 号

书 名:铁路供变电技术
作 者:黄彦全 主 编

策 划:阚济存
责任编辑:阚济存 编辑部电话:010-51873133 电子信箱:td51873133@163.com
编辑助理:杜丽君
封面设计:崔丽芳
责任校对:孙 玫
责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.51eds.com>

印 刷:北京新魏印刷厂

版 次:2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:10.75 字数:264千

印 数:1~3 000册

书 号:ISBN 978-7-113-13746-5

定 价:24.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

本书是普通高等教育铁道部规划教材,是由铁道部教材开发领导小组组织编写,并经铁道部相关业务部门审定,适用于高等院校铁路特色专业教学以及铁路专业技术人员使用。本书为铁路牵引供电系列教材之一。

供变电技术是工科院校电气工程专业的一门专业课,为从事供变电工程设计、施工、运营维护的技术人员自身知识结构体系中的重要组成部分。为更新供变电技术教材内容,以适应近年来电气化铁路建设发展的需要,特组织相关教师和工程技术专家编写了这本《铁路供变电技术》教材。

本教材的编写,力求做到深入浅出、通俗易懂、理论结合实际,在强调基本原理、基本方法和基本计算的基础上,适当引进近年来供变电技术研究及应用的新成果,在满足课程教学需要的前提下,兼顾学生阅读和自学的需求。在内容的编排上,力求做到化繁为简、先原则后细节、先静态后动态,引导读者循序渐进地了解 and 掌握相关知识要点。在内容的组织上,力求把基本概念、基本原理和基本方法贯穿其中,注重知识体系的全面性和完整性。

本教材共六章,主要内容为:供变电交、直流高压电气设备的工作原理及技术参数;常见变电所主接线形式及其工作原理;供变电工程设计及配电装置;变电所常规控制、信号、检测电路及操作电源;交、直流牵引变电所设计及设备选型计算方法;牵引供电系统接地系统工作原理及设计。全书除了对供变电技术一般技术进行分析介绍外,侧重于牵引变电所的相关内容。

本书由西南交通大学黄彦全主编,刘承志副主编;铁道部运输局金柏泉主审。本教材各章节的分工为:第一章、第二章、第三章第四节和第十节、附录由西南交通大学黄彦全编写;第三章第一节到第三节由西南交通大学刘承志编写;第三章第五节到第九节由铁道第一勘测设计院李晋编写;第四章由西南交通大学郭蕾编写;第五章由西南交通大学刘淑萍编写;第六章由北京交通大学吴命利编写。

本教材的编写,参考了国内众多的优秀教材、广大工程技术人员对供变电技术的研究及应用成果,得到了很多学术专家、同行的关怀和支持,在此编者一并向他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促,加之作者水平有限,错漏之处在所难免,望广大读者批评指正。

编 者

2011年12月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 变电基础知识.....	1
第二节 电力牵引及其发展.....	1
第三节 牵引供电系统基本组成.....	2
第四节 供变电工程技术的发展.....	4
思考题.....	5
第二章 高压电器、开关设备的工作原理	6
第一节 高压电器的作用及分类.....	6
第二节 交、直流电弧的形成及熄弧原理和方法	6
第三节 高压断路器的基本参数	12
第四节 高压断路器的操动机构	18
第五节 高压隔离开关	22
第六节 高压熔断器和负荷开关	22
第七节 高压互感器	23
思考题	31
第三章 电气主接线与高压配电装置	32
第一节 概 述	32
第二节 电气主接线的基本形式	33
第三节 牵引变电所电气主接线	38
第四节 直流牵引变电所主接线构成、特点及其运行.....	45
第五节 主接线的可靠性分析	48
第六节 主接线的技术经济分析比较	51
第七节 配电装置类型及对其基本要求	59
第八节 户内配电装置	60
第九节 户外配电装置	65
第十节 预装式变电所	72
思考题	73
第四章 牵引变电所控制、信号和监测电路	74
第一节 二次系统概述	74
第二节 高压开关的控制、信号回路.....	83

第三节	中央信号系统	87
第四节	测量系统与绝缘监测电路	88
第五节	综合自动化系统简介	95
第六节	交、直流自用电源与操作电源	98
思考题		102
第五章	牵引变电所设计	103
第一节	电气设备的发热与电动力	103
第二节	电气设备选择	109
第三节	母线、电缆和支持绝缘子的选择	112
第四节	开关设备的选择	118
第五节	仪用互感器的选择	121
思考题		128
第六章	接 地	129
第一节	接地基本原理	129
第二节	钢轨电位及其抑制措施	138
第三节	铁路综合接地	142
第四节	接 地 测 量	145
思考题		150
附 录		151
参考文献		163

第一章

绪论

供变电工程,涉及电量参数的调节和电能的分配,涉及对各种高压电器设备的控制、保护和监视以及供电系统的安全和操作便捷。供变电工程的基本工作原理、操作和控制方式、设备选择的基本方法、设计原理等都是在进行供变电工程设计、施工、运营和维护工作中需要了解的基本知识。

第一节 变电基础知识

电能自发电厂生产出来后,需要传输到用户所在地进行使用。在电能的传输和分配过程中,为了尽量减少能量损失和便于输送,需要设置相应的设备,集中地完成对电能的变换和分配,如升压、降压、分配功能;为确保高压电气设备的运行安全、快速区分故障形式和隔离故障设备,还需要配置对高压电气设备或系统进行保护、控制和监视的设备,这些设备可分为高压电气设备、控制保护设备、交直流电源和远程监控设备等四部分,上述设备统称为变电设备并共同构成变电系统,在实际应用中称为供变电工程。

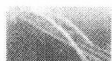
供变电工程的主要功能有:

- (1) 变压,即通过变压器对电气参数进行变换。
- (2) 配电单元的划分与设置。
- (3) 电气参数的采集与处理。
- (4) 通过设备投切改变运行方式或隔离故障设备。
- (5) 保护,通过继电保护系统(装置)完成对高压电气设备的保护。
- (6) 控制,通过控制系统(装置)完成开关分/合操作、调节设备的控制等。
- (7) 监视,通过监控系统(装置)完成对开关设备状态的监视、对变电所运行状态变量的监视、对变电所运行环境参数的监视等。
- (8) 过压保护,通过变电所防雷系统,防止大气过电压、操作过电压对高压设备的损害。

第二节 电力牵引及其发展

电力牵引是一种高效先进的牵引方式。我国早期铁路运输采用的是蒸汽动力牵引方式,为早期的铁路运输发展做出了重要贡献。但由于其能源利用效率低、牵引功率无法满足日益增长的对铁路运输运能的需求,蒸汽动力牵引逐渐被内燃牵引方式所取代。

随着电力系统的发展,电网覆盖的范围也越来越广,为实现电力牵引创造了外部条件。电力牵引具有牵引功率大、能量转换效率高的特点,逐渐成为铁路运输的主要牵引动力形式,作为一种沿途无污染排放的运输形式,电力牵引在我国低碳经济的发展过程中必将显现出巨大



的影响力。

电力牵引制式主要有：直流制、低频单相交流制和工频单相交流制。我国电气化铁路采用的是工频单相交流制，地下铁道、城市轨道交通采用工频交流制或直流制，工矿企业运输系统一般采用的是直流制。低频单相交流制在欧洲部分国家的牵引供电系统中得到一定的应用。

电力牵引制式应用的发展与电力系统的发展息息相关。在电力系统发展初期，直流制是牵引供电采用的制式，直流牵引在牵引调速上具有一定的优势，但受牵引电机功率、电压以及电腐蚀防治等方面原因的限制，应用范围受到了影响。工频单相交流制是一种得到了广泛应用的牵引供电制式。

牵引供电系统的主要供电方式有：直接供电（直供）方式、直供加回流线方式、吸流变压器供电（BT）方式、自耦变压器供电（AT）方式和同轴电缆供电方式等。这些供电方式在牵引供电系统技术发展过程中相继采用，随着供变电技术的不断发展和高速、重载运输及防干扰等要求越来越高，部分供电方式已不再采用。

目前我国电气化铁路主要采用的供电方式是直供加回流线方式和自耦变压器（AT）供电方式。

第三节 牵引供电系统基本组成

供变电工程是牵引供电系统的重要组成部分，图 1-1 为牵引供电系统示意图。

电能从电力系统传输到牵引变电所，经过变压器降压和配电系统分配，把电能输送到牵引网上，电力机车通过受电弓从接触网上获取电能，通过电传动系统把电能转化为机械能，驱动列车运动。

传统的牵引变电所一般从电力系统中的 110 kV 电压等级获取电能，随着高速电气化铁路的建设，当前牵引供电系统主要从 220 kV 甚至 330 kV 电压等级输电系统中获取电能。

如果牵引供电方式为 AT 方式，输出到接触网系统上的电压为 2×27.5 kV 或 55 kV，如果牵引供电方式为直供加回流供电方式，则输出到接触网系统上的电压为 27.5 kV。通常情况下，AT 供电方式下两座牵引变电所之间距离为 80 km 左右，其他供电方式下两座牵引变电所之间距离为 40~50 km。

地铁或轻轨交通的供电制式为直流制或工频交流制，我国地铁或轻轨交通供电系统常采用的有直流 750 V、直流 1 500 V 或交流 1 500 V 的电压等级。

一、交流牵引变电所

交流牵引变电所是牵引供电系统中的重要环节，在交流牵引变电所中，来自电力系统的电能通过降压、变相进而完成电能的分配，图 1-2 为交流牵引变电所的典型接线图。

不同供电方式的牵引变电所接线的主要差别在于牵引变压器。

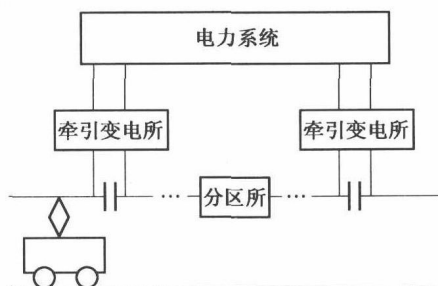
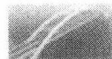


图 1-1 牵引供电系统示意图



二、分区所

复线电气化铁路供电系统中,在两座交流牵引变电所之间,设置一座分区所,分区所的主要功能为:正常工况下,实现接触网末端并联运行以提高接触网末端电压水平;在相邻牵引变电所故障情况下,实现对相邻供电臂的越区供电。图 1-3 为分区所的典型接线图。

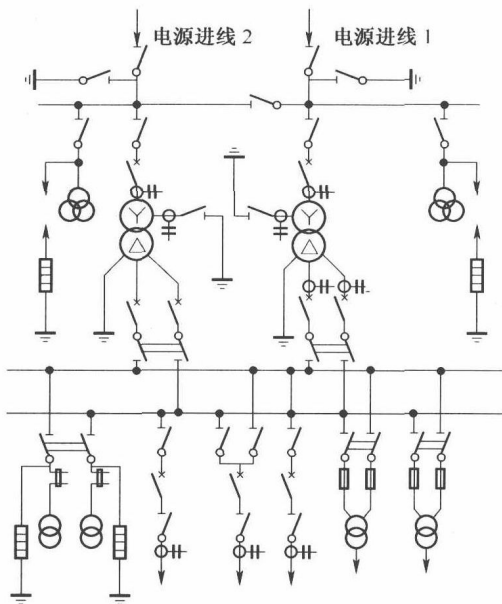


图 1-2 交流牵引变电所的典型接线图

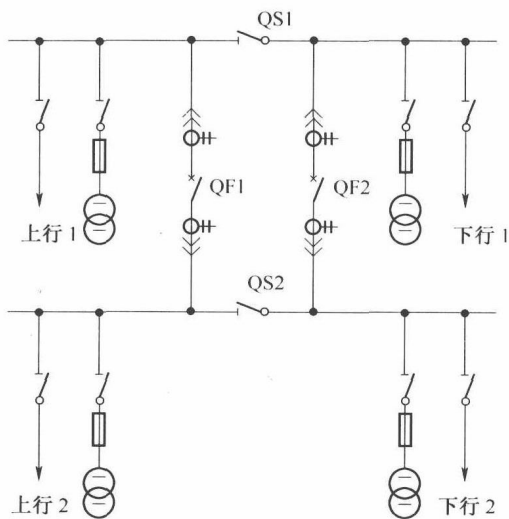


图 1-3 分区所的典型接线图

三、开闭所

牵引供电系统除了为机车提供牵引动力外,还为铁路枢纽、站场、编组站、整备场等负荷供电,需要多回馈线供电,如直接由牵引变电所供电,势必降低牵引供电系统的可靠性,因此,一般由牵引变电所把电能输送到开闭所,由开闭所分别向各负荷馈电。实际上,开闭所是起配电作用的供变电工程。

四、AT 所

在 AT 供电系统的两座牵引变电所之间,每间隔一定距离(约 10~15 km)设置一座 AT 所。自耦变压器的存在,把整个牵引供电系统划分为若干个小网格,降低了牵引电流对电气化铁路沿线的通信干扰,同时改善了牵引供电系统的技术指标。

五、直流牵引变电所

电能从电力系统区域变电所传输到降压变电所,再由降压变电所向地铁、城轨交通沿线的直流牵引变电所供电,直流牵引变电所把电能降压后经整流器把交流电能变换为直流电能,向直流牵引网供电。

无论是交流牵引变电所,还是直流牵引变电所,其组成均分为一次系统和二次系统。一次系统由高压电气设备组成,二次系统由辅助服务设备组成。



1. 一次系统

由一次设备组成用于完成电能变换、输送、分配等功能的系统。一次设备可以定义为高电压侧的电气设备,主要包括变压器、断路器、隔离开关、负荷开关、输电线路、母线、绝缘子、避雷器、电压互感器、电流互感器、高压熔断器等。

2. 二次系统

二次系统主要完成对一次设备的控制、监视、保护等功能,二次设备主要包括各种按钮、操作把手、导线、熔断器、继电保护装置、监视仪表、操作电路、交流电源、直流电源等。

3. 其他

除了一次系统和二次系统外,牵引变电所还有用于防止大气过电压和操作过电压对高电压设备造成损害的防雷系统,用于防止电流泄放而导致的电位升高和接触电压过高的接地系统。

第四节 供变电工程技术的发展

随着设计、制造、计算、管理技术水平的提高,供变电工程技术也不断向前发展,同时,随着电力系统规模的不断扩大、电气化铁路运能要求的不断提高也推动了供变电工程技术水平的提高。

在一次系统方面,经历了多个技术发展阶段,其特点为:

(1)断路器种类由单一到丰富。早期的多油断路器已经淘汰,气体绝缘断路器以及气体绝缘组合电器逐渐得到推广,断路器、隔离开关、负荷开关的技术指标也有很大提高。

(2)绝缘材料性能和技术水平有很大提高,绝缘子、母线绝缘、高压电器的内绝缘和外绝缘等绝缘性能都有较大改善。

(3)早期断路器的分/合闸电路要求直流电源有很高的放电倍率,而现有的断路器分/合闸操作通过加装储能机构,降低了对直流电源容量的依赖,高性能的开关操作机构(如永磁操作机构)也逐步得到应用。

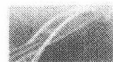
(4)在供变电工程设计方面,随着对电气化铁路牵引供电系统研究的不断深入,绝缘配合、配电装置布置、防雷接地系统的优化、轨道电位和接触电压限制等技术广泛应用于供变电工程,取得了较好的成效。

在二次系统方面,也经历了不同的发展阶段,其特点为:

(1)早期的二次系统为布线逻辑系统,由各种电磁型继电器、机械仪表、按钮、操作把手和金属导线等共同组成系统,随着计算机技术、控制技术和通信技术的发展,二次系统逐渐发展为以网络技术、计算机技术为核心的综合自动化系统,以网络技术为载体、实现数字化信息交换、共享,在功能、智能、可靠性方面的技术指标大大提高。

(2)各种监测技术在高压电器状态监测中得到了广泛应用,如容性设备的绝缘监测、连接件的电接触性能监测、变压器油色谱分析等。

在防雷接地方面,以避雷针构成对大气过电压防护系统,以避雷器构成对感应过电压和操作过电压的防护系统。随着机车功率的不断增大,牵引供电系统在电力系统接入点的短路容量也不断增大,同时,由于轨道结构的变化、信号系统设备的改变,轨道电位和接触电压的分布规律有较大变化,对接地技术提出了更高的要求,当前,综合接地技术得到了较大范围的应用。



本课程教学的主要任务和目的在于通过课堂讲授、课外练习、课程设计、实验及实践教学环节,使学生掌握供变电设备和工程的基本工作原理、供变电系统的基本设计和计算方法、设备选型的基本原理和计算方法,熟悉二次系统的基本工作原理、设计方法,掌握供变电工程技术的发展趋势,为今后从事供变电工程方面的设计、运营管理及科学研究打下必要的理论基础。

思考题

1. 牵引供电系统由哪些部分组成? 各部分功能是什么?
2. 牵引供变电工程有哪些类型? 各种供变电工程的作用是什么?
3. 我国电气化铁路牵引供电的制式是什么?
4. 供变电设备中,哪些属于一次设备? 哪些属于二次设备? 各种设备的主要功能是什么?

第二章

高压电器、开关设备的工作原理

在供变电工程中,存在大量不同类型和规格的高压设备,这些高压设备的工作原理与供变电工程的功能、工作原理、运行方式、控制方式、保护方式等密切相关,是进行供变电工程设计、运行和维护工作的基础。

第一节 高压电器的作用及分类

高压电气设备通常也称为一次设备,主要包括各种高压开关设备、导线、互感器、避雷器、高压熔断器等。

高压电器分类主要有三种。

(1)根据安装和运行场所的不同,可分为户内型和户外型。户内型设备指安装和运行于建筑物之内的设备,户外型设备指安装和运行于建筑物之外的设备。由于气温、湿度、空气中尘土含量、检修条件等工作条件的不同,户内型设备与户外型设备存在一定的差别。

(2)根据电能制式的不同,可分为直流电器和交流电器。

(3)根据用途不同,可分为开关电器、限制电器、变换电器、组合电器。

开关电器的功能是切断和开合电路,主要包括:断路器,用于开/合正常电路或故障电路,是变电站等进行倒闸操作的主要设备;隔离开关,用于高压设备与带电部分的隔离,方便工作人员对高压设备进行检修;负荷开关,用于开/合电路的一种开关,断路器可以开/合故障电流,负荷开关只能开/合负荷电流;熔断器,熔断器兼有开关设备和保护设备的功能,当流过熔断器的电流超过允许值时,断开电路。

限制电器的功能是限制电路中的电流或电压,主要包括电抗器和避雷器,电抗器用于限制其所串联电路电流值使其不超过某一数值,同时可作为补偿容性电流的设备,而避雷器用于限制电路可能出现的过电压现象(大气过电压和操作过电压)。

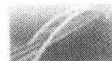
变换电器的功能是把高压、大电流信号转变为低压、小电流信号,这些变换电器主要有电压互感器和电流互感器。

第二节 交、直流电弧的形成及熄弧原理和方法

一、电弧的产生及物理过程

用开关切断电流通过的设备时,在开关的动静触头分离的瞬间,在动静触头之间常常出现电弧,这种出现了电弧的间隙也称为弧隙,随着动静触头的分离,电弧逐渐拉长直至熄灭。在动静触头之间存在电弧时,电路尚未断开,只有电弧熄灭后,电路才算是真正地被切断。

电弧的产生、发展过程较为复杂,受很多不确定性因素的影响,为有助于了解开关电器设



备的工作原理,把电弧的产生和发展简单划分为以下几个过程:

1. 电弧的产生

在动静触头刚分离时,触头间隙很小,触头之间的电场强度很高,当电场强度超过一定数值时,阴极触头的自由电子将在强电场的作用下从阴极发射出来成为触头间隙之间的自由电子,触头间隙中的自由电子在电场力作用下加速向阳极运动,在运动途中,有可能与介质中的中性粒子(原子或分子)发生碰撞,如果运动的电子具有足够的动能,即有可能使中性粒子游离为正离子和自由电子,新产生的电子将和原有电子一起在电场力作用下加速向阳极运动,而正离子在电场力的作用下加速向阴极运动,在自由电子的运动过程中,有可能出现多次碰撞。

连续的碰撞游离,使得触头间隙中充满了电子和正离子,电子自阴极向阳极运动、正离子自阳极向阴极运动,相当于在触头间隙中存在着电流,这就形成了触头间的电弧,碰撞游离过程如图 2-1 所示。

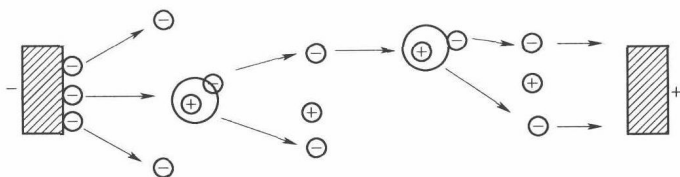


图 2-1 碰撞游离过程示意图

2. 电弧的发展

电弧电流具有电流密度大、低电压降的特点,电弧形成后,电弧温度极高,同时伴随着有强光的出现,高温会使得触头间隙的中性粒子中电子的自由能增加,易于脱离原子核的束缚而逸出成为自由电子,同时在高速电子与低速的中性粒子之间发生的碰撞也更容易把电子从中性粒子中碰撞出来;电弧的强光也会使中性粒子中的电子逸出而成为自由电子;高温电弧也使得触头表面发生烧蚀而产生金属蒸汽,高温、强光和金属蒸汽使得电弧得到了发展。

3. 电弧的稳定

电弧发展到一定程度后,达到了稳定燃烧的条件。在电弧发展过程中,也存在一些抑制电弧发展的因素,推动电弧发展的过程,称为游离,而抑制电弧发展的过程,称为去游离。

电子在从阴极向阳极运动的过程中,可能与中性粒子发生碰撞而导致碰撞游离,也可能被低速的正离子俘获而使正离子转化为中性粒子,这种电子与正离子结合成为中性粒子的情况称为复合,复合将降低触头间隙中的带电粒子浓度。

电弧中充满了电子、正离子,其质量极小,由于电弧柱内温度很高,而周围的介质温度则相对低一些,因此,电弧柱中的带电粒子将向电弧柱周围介质扩散。

4. 电弧的熄灭

游离的主要方式是碰撞、热发射和光发射,去游离的主要方式是复合和扩散。当去游离过程大于游离过程时,电弧电流将继续增大达到新的平衡;反之,电弧电流将继续减小达到新的平衡,甚至出现电弧熄灭的情况。

复合过程只有在离子运动速度较低时才能完成,电弧温度是影响离子运动速度的因素之一,电弧温度越高,离子运动也越快,反之则较慢,因此,降低电弧温度是促成去游离的有效手段。



二、直流电弧的特性及熄灭

发生于直流电路中的电弧称为直流电弧,稳定燃烧的直流电弧特性可用沿弧长的电压分布及伏安特性来表示,如图 2-2 所示。

图 2-2(a)中沿弧压降分为三部分:阴极区压降、弧柱压降和阳极区压降,阴极区和阳极区的长度都很短,而弧柱的长度随着间隙的变化差别较大。阴极区聚集了大量的正离子,其电位存在急剧的变化,阴极压降基本上为常数,与电极材料及电极间隙的介质存在一定的关系,阳极区的压降比阴极区的压降低,在电弧稳定燃烧的情况下,弧柱压降与电弧长度成正比。

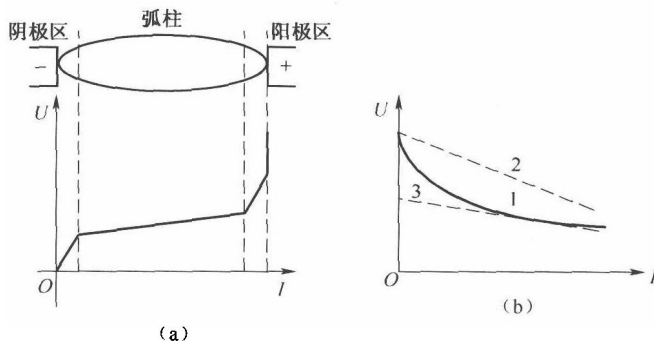


图 2-2 电弧沿弧长的分布及伏安特性
(a)电弧沿弧长的分布;(b)直流电弧的伏安特性

图 2-2(b)中直流电弧伏安特性中的曲线 1 为电弧电流稳定情况下的伏安特性,称为静态特性,曲线 2 和曲线 3 则是电弧的动态伏安特性,当电流突然增大时,游离作用滞后于电流的变化,其伏安特性为曲线 2,当电流突然减小,去游离作用滞后于电流的变化,其伏安特性为曲线 3。

只有几毫米长的电弧称为短弧,长达几厘米以上的电弧称为长弧。短电弧压降主要由阴极区压降和阳极区压降组成,电弧压降基本上为常数,当施加在电极两端的电压小于电弧压降时,电弧的燃烧就无法维持以致熄灭。长弧压降主要决定于弧柱压降,为了使外部施加在电弧上的电压低于电弧压降,常用的措施是把长电弧用物理的方法分割为若干的短电弧。

电弧与电路紧密联系在一起,电路参数直接影响电弧的产生、发展、熄灭过程,当开关开断的是由电阻和电感串联的电路时,如图 2-3 所示,其电压方程为

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + u_{arc} \quad (2-1)$$

式(2-1)可以改写为

$$L \frac{di}{dt} = U - iR - u_{arc} \quad (2-2)$$

由式(2-2)可以看出,当电弧稳定燃烧时,其电流没有变化,即 $\frac{di}{dt} = 0$,因此式(2-1)变为

$$U = iR + u_{arc} \quad (2-3)$$

显然,维持电弧稳定燃烧的条件就是电极外部施加的电压为电阻上压降与电弧压降之和。一般来说,电路中的电阻是常数,可以认为在电弧燃烧的过程中没有变化,因此,影响电弧熄灭的主要因素有施加在电极上的电源电压和电弧压降的变化。

当 $U > iR + u_{arc}$ 时,电弧电流增大,直至达到新的平衡,当 $U < iR + u_{arc}$, 电弧电流减小,直至达到新的平衡甚至导致电弧熄灭。根据条件 $U < iR + u_{arc}$, 熄灭直流电弧的一般方法有:

(1) 冷却电弧或拉长电弧

冷却电弧或拉长电弧,都会使电弧压降增加,从而使电弧电流逐渐减小。除了加快动静触

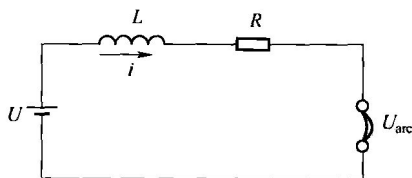
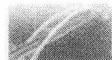


图 2-3 直流电弧开断等效电路



头分离的速度外,利用外力改变电路的路径,达到拉长电弧的目的,在拉长电弧的同时,还可以冷却电弧,达到增强去游离的作用。

(2)增大电路电阻

在熄弧过程中,在电路中串入电阻,增大电阻上的压降,从而降低电弧压降,使之逐步熄弧。

(3)把长电弧分割成短电弧

短电弧的压降主要为阴极压降和阳极压降之和,在同样的几何距离下,把长电弧分割为若干段短电弧,将使电弧压降增加,从而达到电弧压降大于外部电源电压的目的,使电弧熄灭。

三、交流电弧的特性及熄灭

交流电弧与直流电弧存在一定差别,原因是施加在电极两端的电压是交变的,因此电弧的电流也随时间的变化而变化,由于交流电弧电流变化快,弧柱的热惯性起了很大作用,因此交流电弧的伏安特性都是动态特性。

在电弧燃烧过程方面,交流电弧每半个周波将过零一次,在交流电弧电流过零时,电弧将暂时熄灭。在电弧暂时熄灭后,弧隙的介质强度将逐渐恢复,因此,交流电弧能否可靠熄灭的关键是弧隙介质强度恢复速度是否足够快,以防止电弧重燃。

随着电弧电流过零点的到来,电弧电流逐渐减少,弧隙温度也在逐步下降,弧隙的游离过程减弱,弧隙电阻增大。当电流过零时,输入弧隙的能量为零,而弧隙的散热过程依然在进行,导致其温度继续下降,但弧隙温度从高温下降到正常温度仍需要一定的时间。

由于电弧熄灭后,弧隙在一定时间内依然存在一定的带电粒子,因此介质的击穿场强将低于首次击穿的场强,随着时间的推移,弧隙的带电粒子逐渐稀少,介质的临界击穿场强也逐渐提高。当施加在断路器的外部电压上升后,弧隙的电场强度逐步增强。在电流过零时,电弧将熄灭,一方面是弧隙的介质强度逐渐恢复,由于动静触头之间的运动,动静触头之间的距离也在变长,另一方面,施加在动静触头之间的电压在上升。

当动静触头的运动速度快,介质强度恢复速度快于触头之间电场强度的上升速度时,电弧在电流过零熄灭后将无法重燃,反之将出现动静触头之间电弧重燃的现象。

影响介质强度恢复的因素有很多。

(1)近阴极效应

介质强度的恢复是一个复杂的过程,电流过零前,在弧隙存在大量的带电粒子,电流过零后,由于动静触头之间的极性发生了变化,带电粒子的运动速度和运动方向在变化了的电场作用下也会发生变化,电子的质量小,在变化了的电场作用下,其运动方向将向新的阳极运动,而带正电的离子则由于惯性较大,将在新的阴极附近形成一个正电荷区域,导致新阴极附近区域的电场强度降低,因此,需要外加一定的电压提升该区域的电场强度后才可能从新阴极发射出新的电子,这种阴极附近区域聚集正电荷而导致介质强度增强的现象称为近阴极效应。

在电流过零后,弧隙在一个很短的时间内,能出现 150~250 V 的介质强度,具体数值与弧隙温度有一定的关系,温度低,该介质强度低,反之则高,这种因近阴极效应而出现的介质强度,称为起始介质强度。

(2)弧隙的冷却

介质强度的恢复与弧隙的冷却及电弧电流大小有关,电弧电流越大,弧隙温度也就越高,而弧隙温度越高,越不利于介质强度的恢复,良好的弧隙冷却条件可使弧隙温度迅速下降,从



而加快介质强度的恢复。

(3) 介质的特性

介质强度的恢复还与介质特性有关,绝缘强度高的介质、提高绝缘气体的压力、利用真空作为绝缘介质等,都可以有效地提高电流过零后弧隙的介质强度。

(4) 其他

断路器触头的分离速度也可以影响到介质强度的恢复,分离速度越快。介质强度的恢复越快。

在介质强度恢复的同时,弧隙电压也在发生变化。如果弧隙电压恢复速度高于弧隙介质强度恢复速度,则电弧在其电流过零后不再重燃,反之则发生电弧重燃。弧隙电压的恢复速度主要与电路参数、负荷性质有关。

受电路参数和断路器参数的影响,在电压恢复过程中,首先出现在弧隙两端的电压具有过渡过程的特性,存在着非周期分量和高频振荡分量,持续时间约几十微秒到几毫秒之间,这种电压称为瞬变恢复电压。在瞬变电压衰减后,弧隙两端的电压由外部工频电源决定,称为工频恢复电压。图 2-4 为分析断路器弧隙电压恢复过程的等值电路,图中 R 为系统等值电阻, L 为系统等值电感, C 为系统等值对地电容, r 为断路器触头之间等值电阻。

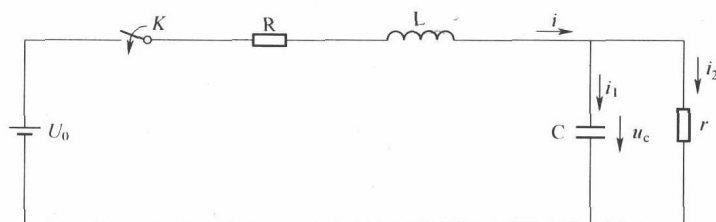


图 2-4 电力系统发生短路时的等值电路

由于电压恢复过程可以在很短的时间内完成,因此,可认为在电压恢复期间等值电路的电源电压不变,即电源电压为 U_0 时,直流电路的暂态过程,分析弧隙恢复电压即等值电容两端电压的变化过程,当开关 K 闭合时,有

$$Ri + L \frac{di}{dt} + u_c = U_0 \quad (2-4)$$

$$\text{又因为} \quad i = i_1 + i_2 = C \frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{r} \quad (2-5)$$

$$\text{所以有} \quad LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + (RC + \frac{L}{r}) \frac{du_c}{dt} + (\frac{R}{r} + 1) u_c = U_0 \quad (2-6)$$

$$\text{式(2-6)的通解为} \quad u_c = \frac{U_0 r}{R + r} + C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t} \quad (2-7)$$

式中, C_1 和 C_2 为积分常数, $\alpha_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 - \frac{1}{LC}}$ 。

$$\textcircled{1} \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 > \frac{1}{LC}$$

当 $t=0$ 时, $i=0$, 电容电压等于弧隙电压, 即 $u_c = -u_{\text{arc}0}$ 。因此, 弧隙的恢复电压为

$$u_c = \frac{U_0 r}{R + r} + \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_2 e^{\alpha_1 t} - \alpha_1 e^{\alpha_2 t}) (u_{\text{arc}0} + \frac{U_0 r}{R + r}) \quad (2-8)$$



一般情况下, $R \ll r$, $|\alpha_1| \ll |\alpha_2|$, $|\alpha_1 e^{\alpha_2 t}| \ll |\alpha_2 e^{\alpha_1 t}| R \ll r$, $|\alpha_1| \ll |\alpha_2|$, $|\alpha_1 e^{\alpha_2 t}| \ll |\alpha_2 e^{\alpha_1 t}|$, 因此式(2-8)可简化为

$$u_c = U_0 - (u_{\text{arc0}} + U_0) e^{\alpha_1 t} \quad (2-9)$$

在电弧熄灭时, 由于 $u_{\text{arc0}} \ll U_0$, $|u_{\text{arc0}}| \ll |U_0|$, 因此式(2-9)可进一步简化为

$$u_c = U_0 (1 - e^{\alpha_1 t}) \quad (2-10)$$

忽略电阻 R , 则有

$$\alpha_1 = -\frac{1}{2rC} + \frac{1}{2rC} \sqrt{\left(1 - \frac{4r^2 C}{L}\right)} \quad (2-11)$$

当 $r < \frac{1}{4} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 式(2-11)可进一步简化为

$$\alpha_1 = -\frac{1}{2rC} + \frac{1}{2rC} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{4r^2 C}{L}\right) = -\frac{r}{L} \quad (2-12)$$

因此, 在电流过零时的恢复电压上升率为

$$\left. \frac{du_c}{dt} \right|_{t=0} = \frac{r}{L} U_0 \quad (2-13)$$

由式(2-13)可知, 电阻 r 对于恢复电压上升速度有重要影响。

$$\textcircled{2} \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 < \frac{1}{LC}$$

同样地, 有

$$u_c = \frac{U_0 r}{R+r} + \left(u_{\text{arc0}} + \frac{U_0 r}{R+r} \right) + \left(\frac{\beta}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \cos \omega_0 t \right) e^{\beta t} \quad (2-14)$$

式中, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2}$ 为电路固有振荡频率,

$\beta = -\frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)$ 为衰减系数。

考虑到 $R \ll r$ 和 $U_{\text{arc0}} \ll U_0$, 则式(2-14)可简化为

$$u_c = U_0 \left[1 + \left(\frac{\beta}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \cos \omega_0 t \right) e^{\beta t} \right] \quad (2-15)$$

对于一般交流电路, $\frac{1}{4} \left(\frac{R}{L} \right)^2 \ll \frac{1}{LC}$, 因此有 $\frac{\beta}{\omega_0} \approx 0$ 和 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, 从而

$$u_c = U_0 (1 - \cos \omega_0 t) e^{\beta t} \quad (2-16)$$

略去衰减系统的作用, 即 $\beta = 0$, 因此式(2-16)可改写为

$$u_c = U_0 (1 - \cos \omega_0 t) \quad (2-17)$$

显然, 式(2-17)代表的是一个周期性振荡过程, 恢复电压的最大值可达到 $2U_0$ 。

除了电路参数和断路器参数对恢复电压有影响外, 负荷性质对恢复电压也存在一定影响。

当断路器切断的是阻性负载时, 在电流过零时, 施加在断路器上的外部电源电压也在过零, 这将导致弧隙电压恢复速度较低。

当断路器切断的是容性负荷或感性负荷时, 在电流过零时, 将是外部电压处于最大值的时刻, 这将使弧隙电压恢复速度较高, 易引起电弧重燃。

四、高压断路器常用的熄弧方法

交流断路器能否把其中的电弧熄灭, 取决于电流过零时介质强度的恢复速度和电极间隙