



高职高专电气工程类专业“十二五”规划系列教材



电力系统基础

DIANLI XITONG JICHU

■ 主编 李家坤 王春民



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

高职高专电气工程类专业“十二五”规划系列教材

电力系统基础

主 编 李家坤 王春民
副主编 王 涛 王卫卫
肖 俊 应海峰



华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 提 要

本书是高职高专电气工程及自动化类专业的专业课教材,全书共分8章,主要包括电力系统概述、电力系统的等值电路和参数计算、电力系统潮流分析与计算、电力系统有功平衡和频率调整、电力系统无功平衡和电压调整、电力系统故障分析与计算、电力系统经济运行、电力系统运行稳定性。

本书含有典型的例题、思考题与习题,可以提高读者分析和解决实际问题的能力,便于读者自学。

本书在编写过程中充分考虑到高职高专教育的特点,对一些理论性强、计算复杂的内容进行了恰当取舍,强调实践性、应用性,图文并茂,例题、思考题与习题经典,有利于培养高端技能型人才。

本书可作为高职高专电气工程及自动化、发电厂及电力系统、供用电技术、发电厂电气设备等专业的教学用书,也可作为电力系统工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统基础/李家坤 王春民 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2012.7
ISBN 978-7-5609-7881-9

I. 电… II. ①李… ②王… III. 电力系统-高等职业教育-教材 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 069340 号

电力系统基础

李家坤 王春民 主编

策划编辑:谢燕群

责任编辑:熊 慧

封面设计:范翠璇

责任校对:马燕红

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:14.5

字 数:305千字

版 次:2012年7月第1版第1次印刷

定 价:28.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

本书根据《国务院关于大力发展职业教育的决定》、教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》等文件精神,由有丰富经验的老师和电力企业技术人员共同编写,属校企合作共同开发系列教材之一。

为满足高职高专院校电气工程及自动化、电力工程等专业的教学、就业和岗位技能要求,加快高职高专应用型人才的培养,本书在编写过程中注意学生应用能力、分析能力和基本技能的培养,突出高职高专教育的职业性,符合当前高职高专教育的要求。本书特点如下。

(1)顺应教育部面向 21 世纪高职高专教育教学内容和课程体系的改革要求,充分考虑到高职高专教育对象的需求,以实际、实用为原则,体现了高职高专教学的“实用性、应用性”特点。

(2)在内容上,对传统教学内容进行大胆取舍,强调对基本理论的应用和掌握,避免复杂的推理论证,力求通俗易懂。

(3)对基本理论的分析采用图解、图示等方法,并强调电力系统分析基本理论的实际应用。

(4)书中有典型例题,每章后面附有小结、思考题与习题,便于学生总结和复习。

本书由长江工程职业技术学院李家坤、湖北水利水电职业技术学院王春民任主编,中国国电集团公司应海峰,三峡电力职业技术学院王涛、徐金雄,长江工程职业技术学院王卫卫、肖俊任副主编。在编写过程中,参阅了许多同行专家编写的教材和资料,得到了不少启发和教益,在此致以诚挚的谢意!

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,敬请读者指正。

编 者

2012 年 4 月

目 录

第 1 章 电力系统概述	(1)
1.1 电力系统的基本组成和特点	(1)
1.2 电气设备和电力网的额定电压	(3)
1.3 电力网的接线方式及负荷的分类	(5)
1.4 电力线路的结构	(7)
小结	(9)
思考题与习题 1	(10)
第 2 章 电力系统的等值电路和参数计算	(11)
2.1 电力线路的参数及等值电路	(11)
2.2 变压器的参数及其等值电路	(18)
2.3 发电机的参数及等值电路	(26)
2.4 负荷的参数及等值电路	(27)
2.5 电力系统的等值电路	(28)
小结	(32)
思考题与习题 2	(33)
第 3 章 电力系统潮流分析与计算	(35)
3.1 电力网的功率分布计算	(35)
3.2 电力网的电压计算	(42)
3.3 开式网的潮流计算	(44)
3.4 简单闭式网的潮流计算	(51)
3.5 电力网的简化	(58)
3.6 电力系统潮流的计算机算法	(63)
小结	(83)
思考题与习题 3	(85)
第 4 章 电力系统有功平衡和频率调整	(87)
4.1 概述	(87)
4.2 电力系统有功功率平衡	(88)
4.3 电力系统负荷及电源的频率静态特性	(90)

4.4 电力系统的频率调整	(94)
小结	(99)
思考题与习题 4	(99)
第 5 章 电力系统无功平衡和电压调整	(100)
5.1 电力系统的无功功率电源	(100)
5.2 电力系统无功功率平衡	(103)
5.3 电力系统电压偏移与电压管理	(105)
5.4 电力系统的电压调整措施	(108)
小结	(120)
思考题与习题 5	(120)
第 6 章 电力系统故障分析与计算	(122)
6.1 短路的基本概念	(122)
6.2 标幺值	(125)
6.3 电力系统各主要元器件的电抗	(127)
6.4 计算电路图和等值电路的化简	(129)
6.5 无限大容量电源供电电路内三相短路	(134)
6.6 有限容量电源供电电路内三相短路	(137)
6.7 多电源系统用运算曲线计算短路电流	(141)
6.8 对称分量法在不对称短路计算中的应用	(145)
6.9 元件的序阻抗和系统序网络图的拟制	(150)
6.10 不对称短路时短路点的电流和电压计算	(157)
6.11 电力系统的非全相运行计算	(159)
小结	(162)
思考题与习题 6	(163)
第 7 章 电力系统经济运行	(165)
7.1 概述	(165)
7.2 电力系统的负荷	(166)
7.3 电力网的电能损耗	(170)
7.4 降低电力网电能损耗的措施	(173)
7.5 电力线路导线截面的选择	(177)
小结	(180)
思考题与习题 7	(180)

第 8 章 电力系统运行稳定性	(182)
8.1 简单电力系统的静态稳定性	(182)
8.2 简单电力系统的暂态稳定性	(187)
小结	(193)
思考题与习题 8	(194)
附录 A 电力线路、变压器特性数据表	(195)
附录 B 短路电流运算曲线	(210)
附录 C 短路电流运算曲线数字表	(216)
参考文献	(222)

第 1 章 电力系统概述

1.1 电力系统的基本组成和特点

1.1.1 电力系统的组成

电能是现代社会中最重要、最方便的能源。电能具有许多优点：它可以方便地转化为其他形式的能，如机械能、热能、光能、化学能等；它的输送和分配易于实现；它的应用规模也很灵活。因此，电能被广泛地应用于工农业、交通运输业、商业贸易、通信及人们的日常生活中。通常人们把电能的生产、输送、分配和使用的各个功能环节或部门统称为电力系统。

图 1-1 所示的为一个简单电力系统的电力生产和使用过程示意图。

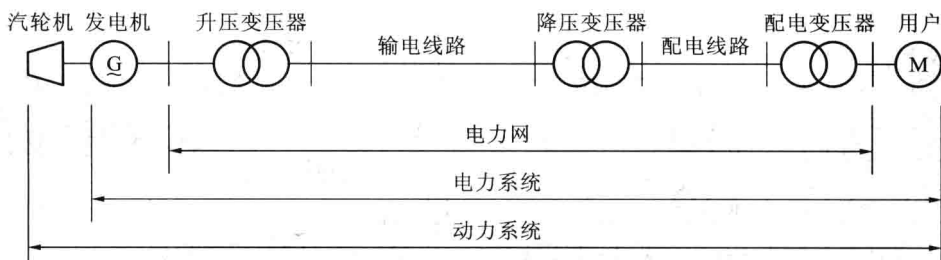


图 1-1 简单电力系统示意图

这些由发电厂、升压变电站、输电线路、降压变电站、配电线路及电力用户所组成的统一整体，称为电力系统。电力系统加上带动发电机转动的动力装置构成的整体称为动力系统。其中，由各类升压变电站、输电线路、降压变电站、配电线路、配电变压器组成的电能传输和分配网络称为电力网。

首先在发电厂内，由汽轮机、发电机将其他形式的能源转化为电能，然后通过升压变压器将电压升高，经过高压输电线路将电能输送到配电变电所，由降压变压器使电压下降，再通过电压较低的配电线路输送到各个用电用户。

现代的电力系统都是由许多发电厂、变电站和输电线路相互连接在一起构成联合运行的系统。联合运行的电力系统在技术和经济上比孤立运行的电力系统有很多明显的优势：可以采用大型机组降低造价和燃料消耗；各地方电网之间可以互相调剂、调度、支援电能，从而减少系统备用容量；还可以利用水火电厂之间的调节，达到

错峰和调峰的目的,更加充分合理地利用能源来提高经济效益。图 1-2 所示的为有多个电源的电力系统示意图。

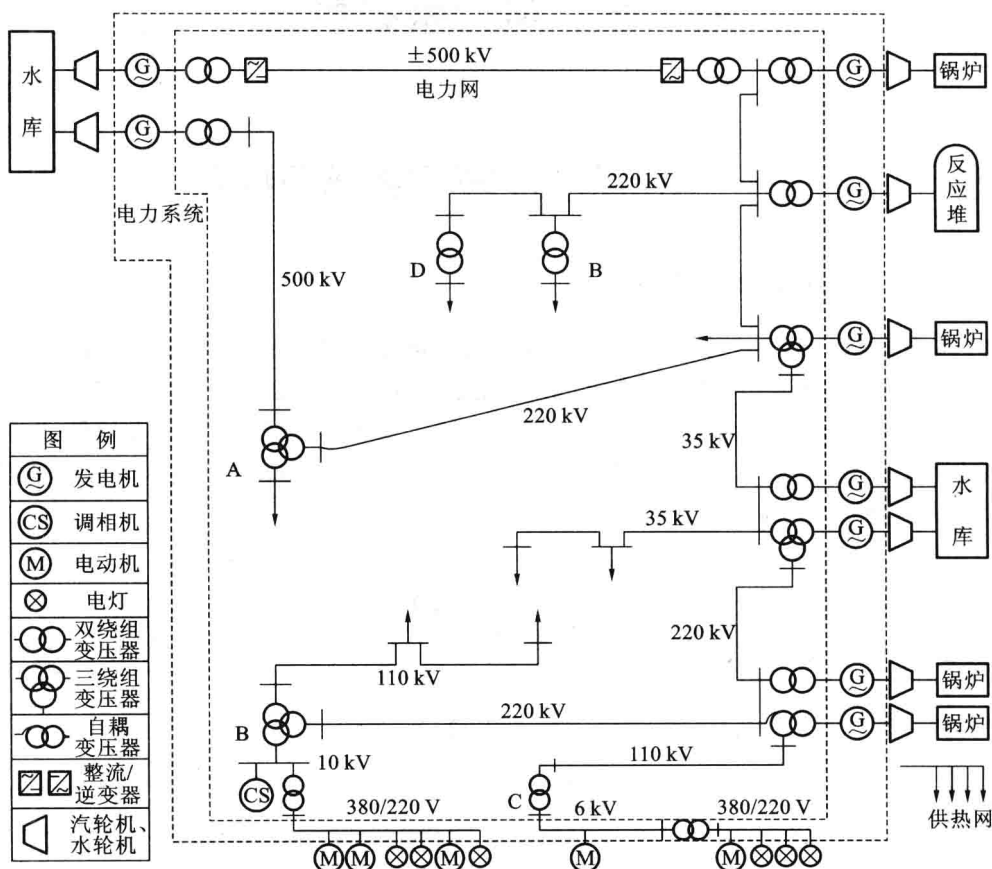


图 1-2 多电源电力系统示意图

1.1.2 电力系统的运行特点

电力系统是由电能的生产、输送、分配和消费的各环节组成的一个整体。与别的工业系统相比较,电力系统的运行具有如下明显特点。

(1) 电能不能大量存储。电能的生产、输送、分配和消费实际上是同时进行的。电力系统中发电厂在任何时刻发出的功率必须等于该时刻用电设备所需的功率与输送和分配环节中的功率损失之和。

(2) 电力系统的暂态过程非常短促。电力系统中各个元件的投切和电能的输送过程几乎都在瞬间进行,即电力系统从一种运行状态到另一种运行状态的过渡极为迅速。

(3)与国民经济的各部门及人们的日常生活有着极为密切的关系。供电的突然中断会带来严重的后果。电能供应不足或中断将直接影响工农业的生产,给人民生活带来诸多不便。

1.1.3 电力系统运行的基本要求

电力系统运行的基本要求如下。

(1)保证安全可靠地发、供电。保证安全可靠地发、供电是对电力系统运行的首要要求。在运行过程中,供电的突然中断大多由事故引起,一旦供电中断,工农业生产就将停顿,社会生活就会混乱,甚至会危及人身和设备安全,造成十分严重的后果。

(2)保证电能质量。电能质量主要由交流电的频率、电压和波形等指标所决定,供给用户的电能必须满足电气设备对电能质量的要求,在规定的额定值允许变化范围之内。

(3)要有良好的经济性。为了提高电力系统运行的经济性,必须尽量地降低发电厂的煤耗率(水耗率)、厂用电率和电力网的损耗率。这就是说,要求在电能的生产、输送和分配过程中减少耗费,提高效率。为此,应做好规划设计,合理利用能源;采用高效率、低损耗设备;采取措施降低网损;实行经济调度等。

(4)尽可能减小对生态环境的影响。目前我国火电厂装机容量占总装机容量的70%以上,在今后相当长一段时间内火电发电所用一次能源仍以煤炭为主,煤炭燃烧会产生大量的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、粉尘和废渣等,这些排放物都会对生态环境造成有害影响。因此,限制污染物的排放量,使电能生产符合环境保护标准,也是对电力系统运行的一项基本要求。

总之,对电力系统运行的基本要求可以简单地概括为安全、可靠、优质、经济、环保。

1.2 电气设备和电力网的额定电压

1.2.1 额定电压的概念

各种用电设备及发电机、变压器都是按一定的标准电压设计和制造的。当它们在标准电压下运行时,它们的技术、经济性能指标都将发挥得最好,此标准电压就称为额定电压。规定额定电压也是为了使电力设备能标准化、系列化制造,便于设备的运行、维护、管理等。我国制定的三相交流设备与系统的额定电压的数值列于表1-1中。

表 1-1 电力系统额定电压(线电压)

用电设备与电力网的额定电压/kV	发电机额定电压/kV	变压器额定电压/kV		
		一次绕组		二次绕组
		接电力网	接发电机	
0.22	0.23	0.22	0.23	0.23
0.38	0.40	0.38	0.40	0.40
3	3.15	3	3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6	6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10	10.5	10.5 及 11
35	—	35	—	38.5
60	—	60	—	66
110	—	110	—	121
220	—	220	—	242
330	—	330	—	363
500	—	500	—	550
750	—	750	—	825

1.2.2 电力系统中各元件额定电压的规定

在同一个电压级别下,各种设备的额定电压并不完全相等。为了使各种互相连接的电气设备都能运行在较有利的电压下,各电气设备的额定电压之间有一个相互配合的问题。对电力系统中各元件额定电压的规定如下。

(1)对发电机额定电压的规定。发电机一般接在线路的首端,发电机的额定电压与系统的额定电压为同一等级时,规定发电机的额定电压比系统的额定电压高 5%。

(2)对电力线路额定电压的规定。电力线路的额定电压与系统的额定电压相等,有时把它们称为网络的额定电压。电力系统中,电力线路的额定电压规定为 220 V、380 V,以及 3 kV、6 kV、10 kV、35 kV、63 kV、110 kV、220 kV、330 kV、500 kV 和 750 kV。

(3)对变压器额定电压的规定。变压器是将一种电压变换成另一种电压的设备,与其他设备不同的是,变压器本身就具有两个或两个以上的电压等级,所以实际上变压器中的每个绕组都有额定电压,变压器额定电压的规定略为复杂。根据变压器在电力系统中传输功率的方向,规定变压器接受功率一侧的绕组为一次绕组,输出功率一侧的绕组为二次绕组。一次绕组的作用相当于受电设备,其额定电压与系统的额定电压相等,但直接与发电机连接时,其额定电压则与发电机的额定电压相等。二次绕组的作用相当于供电设备,考虑其内部电压损耗,规定额定电压比系统的额定电压高 10%,如果变压器的短路电压小于额定电压的 7%或变压器直接(包括通过短距离线路)与用户连接,则规定其额定电压比系统的额定电压高 5%。为了适应电力系统

运行调节的需要,通常在变压器的高压绕组上设计制造有分接抽头。分接抽头用百分数表示,即表示分接头电压与主抽头电压的差值为主抽头电压的百分之几。对同一电压等级的变压器,升压变压器和降压变压器,即使其分接头百分值相同,分接头的额定电压也不同。

1.2.3 电力线路的平均额定电压

电力线路的平均额定电压等于电力线路首末两端所连接的电气设备额定电压的平均值,即

$$U_{av \cdot N} = \frac{U_N + 1.1U_N}{2} = 1.05 U_N$$

式中: U_N 为电力线路的额定电压。

目前我国电力网平均额定电压规定为 3.15 kV、6.3 kV、10.5 kV、37 kV、63 kV、115 kV、230 kV、345 kV、525 kV 和 800 kV。

1.3 电力网的接线方式及负荷的分类

1.3.1 电力网的接线方式

电力系统的接线方式对于保证安全、优质和经济地向用户供电具有非常重要的作用。电力系统的接线包括发电厂的主接线、变电所的主接线和电力网的接线。电力网的接线方式一般分为无备用接线和有备用接线两类。

(1)无备用接线。无备用接线网络中,每一个负荷只能靠一条线路取得电能,单回路放射式、链式和干线式网络即属于这一类。这类接线的特点是,其网络结构非常简单,设备投资较少,运行维护方便。其缺点是,供电的可靠性比较低,任一段线路发生故障或检修,都将使一部分用户断电,供电的可靠性较差,因此这类接线一般只适合向不太重要的负荷供电。无备用接线如图 1-3 所示。

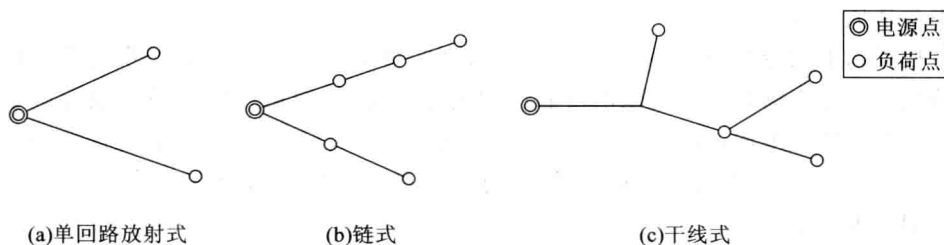


图 1-3 无备用接线示意图

(2)有备用接线。在有备用接线方式中,最简单的一类是在上述无备用网络的每一段线路上都采用双回路,包括双回路放射式、干线式和链式网络,以及环式和两端供电网络。显然,这类接线同样具有简单和运行方便的特点,而且供电可靠性和电压质量都有明显的提高,每一个负荷都能从两个方向取得电能,当其中一条线路发生故障时,用户都能从另一个方向获得电能,从而避免了供电的中断。其缺点是,设备费用增加很多。几种常见的有备用接线如图 1-4 所示。

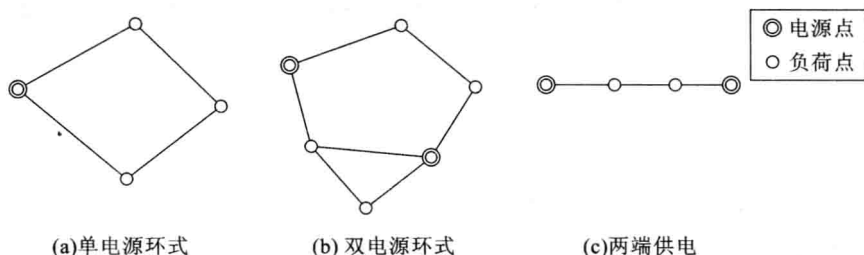


图 1-4 常见的有备用接线示意图

1.3.2 负荷的分类

电力网的接线方式与负荷的性质有着密切的联系,为了保障向用户提供不间断的供电,根据用户对供电可靠性的不同要求及负荷的重要程度,目前我国将负荷分为以下三级。

(1)第一级负荷。对这一级负荷中断供电的后果是极为严重的。例如,可能发生危及人身安全的事故;使工业生产中的关键设备遭到难以修复的损坏,以致生产秩序长期不能恢复正常,造成国民经济的重大损失;使市政生活的重要部门发生混乱等。

(2)第二级负荷。对这一级负荷中断供电将造成大量减产,使城市中大量居民的正常活动受到影响等。

(3)第三级负荷。不属于第一、二级的,停电影响不大的其他负荷都属于第三级负荷,如工厂的附属车间、小城镇和农村的公共负荷等。对这一级负荷的短时供电中断不会造成重大的损失。

根据以上的分类可见,对于以上三个级别的负荷,可以根据具体情况分别采取适当的技术措施来满足它们对供电可靠性的要求。通常,对第一级负荷应设置两个或两个以上的独立电源,要求电源间能够自动切换;对第二级负荷也应设置两个独立电源,由于第二级负荷允许短时停电,因此电源间可以采用手动切换;对第三级负荷一般采用单电源供电。

1.4 电力线路的结构

在电力系统中,电力线路主要承担传送电能的功能,按其结构可分为架空线路和电缆线路两大类。架空线路裸露在空气中,容易受外界环境的影响,如易遭受雷击、空气的氧化作用等,但它具有投资节省、施工和维护检修方便的优点,电力网中大多数的输电线路采用架空线路。电缆线路的投资较大,但电缆线路埋设在地下,可避免外界环境和外力的影响,而且具有供电可靠性高、可跨海送电等优点,可根据具体工程需求采用电缆线路。

1.4.1 架空线路

架空线路是将裸露的导线架设在电线杆塔上来进行电能传输的,它由避雷线、导线、杆塔、绝缘子和金具等元件组成,如图 1-5 所示。

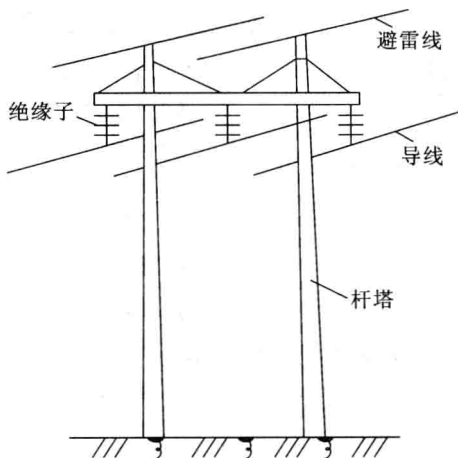


图 1-5 架空线路示意图

(1) 避雷线和导线。导线是架空线路的主要组成部分,其主要功能是传输电能,传导电流。避雷线架设在导线的上方,通过杆塔与大地相连,故又称为架空地线,其主要功能是将雷电引入大地,使电力线路免受雷电侵袭。由于导线和避雷线都裸露并架设在空气中,要受到自身张力及各种恶劣天气条件的影响,所以导线和避雷线都应具有较高的机械强度和抗腐蚀的能力。

导线一般采用导电性能良好的金属材料,如铝、钢、铜、铝合金等材料。避雷线要求有较高的机械强度,一般采用钢线。

导线常采用铝材,截面形状要满足散热性能良好,截面系数大,集肤效应小,安装检修简单和连接方便等要求,在实际工程应用中多采用矩形、双槽形、圆管形截面。

(2) 杆塔。架空线路杆塔的主要功能是用来支撑导线和避雷线,以使导线之间、导线与避雷线之间保持一定的电气安全距离。杆塔的种类很多,按照所使用的材料可分为木杆、混凝土杆和铁塔;按照导线在杆塔上的排列方式可分为:单回线采用三角形、上字形和水平排列方式,双回线采用伞形、倒伞形、干字形和鼓形等排列方式。

杆塔按不同用途又可分为直线杆、耐张杆、转角杆、终端杆和特种杆。

(3) 绝缘子。绝缘子是母线结构的重要组成部分,是用来支撑或悬挂固定导线,并使导线和杆塔之间保持一定绝缘距离的组件,因此绝缘子应具有足够的绝缘强度和机械强度,并有较好的耐热耐潮和防污性能。

绝缘子按其作用分为电站用绝缘子、电器用绝缘子和线路绝缘子;按其材料不同可分为陶瓷绝缘子、钢化玻璃绝缘子和硅橡胶合成绝缘子等;按其形状不同可分为悬式绝缘子、针式绝缘子和棒式绝缘子。绝缘子外形如图 1-6 所示。

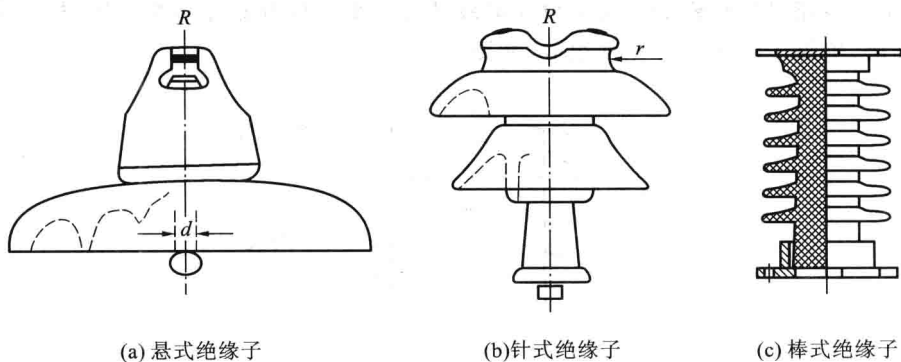


图 1-6 绝缘子外形图

(4) 金具。架空线路中,用来连接、固定、保护导线及绝缘子的各种金属零件,统称为金具。金具按其用途可分为线夹、连接金具、接续金具、保护金具等几大类。

1.4.2 电缆线路

电缆主要由导体、绝缘层和保护层三部分组成,如图 1-7 所示。电缆线路一般直接埋设在地下,也可敷设在沟道中。在电力工程中,电力网中绝大多数输电线路都采用架空线路,只有在受环境限制不能采用架空线路的地方(如大城市的人口密集区、过江跨海的地方、严重污染区等),才采用电缆线路。目前随着城市负荷密度的增大,对供电可靠性要求的增加,电缆线路在城市电网中的使用越来越广泛。

电缆的绝缘层是使各导体之间及导体与包皮之间绝缘的部分,使用的材料有橡胶、聚丁烯、棉麻、浸油纸和矿物油等,一般多采用浸油纸。

电缆的保护层是用来保护绝缘层不受外力损伤的,同时还有防止水分侵入或浸剂外流的作用。电缆的保护层可分为内护层和外护层,内护层由铅或铝制成,外护层

由内衬层、铠装层和外被层组成。

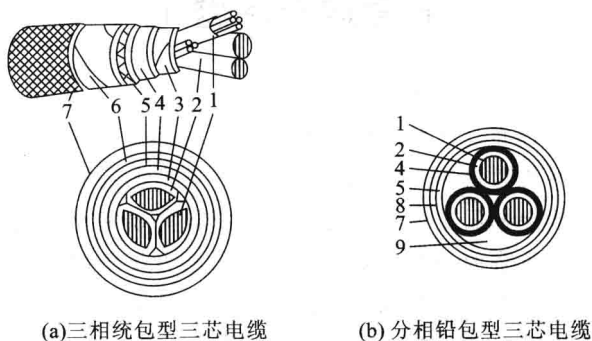


图 1-7 电缆结构示意图

1—导体；2—相绝缘；3—纸绝缘；4—铅包皮；5—麻衬；
6—钢带铠甲；7—麻被；8—钢丝铠甲；9—填充物

小 结

本章主要介绍电力系统的一些基本概念和基本知识,要求重点掌握电力系统、电力网的概念及电力系统各主要元件额定电压的规定,了解电力网的接线分类及特点,了解架空线路和电缆线路的基本结构。

电力系统是由发电机、变压器、输电线路、配电线路和用户电器等各种电气设备连接在一起而形成的生产、输送、分配和消耗电能的整体。动力系统则是电力系统加上动力部分。电力网是由各种电压等级的变压器和输电、配电线路所构成的。电能生产过程的最主要特点是,电能的生产、输送和消费在同一时刻实现。

现代的电力系统都是联合运行的系统,在技术和经济上有许多明显的优越性。对电力系统运行的基本要求可概括为“安全、可靠、优质、经济、环保”。

电力系统中各种电气设备的额定电压和额定频率必须同电力系统的额定电压和额定频率相适应。要了解电源设备和用电设备的额定电压同电力网的额定电压等级的关系。各种不同电压等级的电力线路都有其合理的供电容量和供电范围。

电力网的接线方式反映了电源与电源之间、电源与负荷之间的连接关系。不同功能的电力网对其接线方式有不同的要求。电力网的接线方式一般分为无备用接线和有备用接线两类。无备用接线供电的可靠性稍差,一般只适宜于向不太重要的负荷供电。有备用接线可靠性较高,一般用于供电要求较高的负荷。

电力线路按结构不同可分为架空线路和电缆线路两大类。架空线路投资、维护检修比较方便,其导线材料一般采用钢芯铝绞线,部分导线还可采用扩径导线、分裂导线等。电力电缆的结构主要包括导体、绝缘层和保护层。电缆可靠性较高,但投资较大。

思考题与习题 1

- 1-1 动力系统、电力系统、电力网的定义各是什么？
- 1-2 电力系统运行有什么特点？对电力系统运行的基本要求是什么？
- 1-3 何谓电力网的额定电压？我国电力网的额定电压有哪些？
- 1-4 发电机的额定电压是如何确定的？变压器的额定电压又如何确定？
- 1-5 什么是电力线路的平均额定电压？我国电力线路的平均额定电压有哪些？
- 1-6 电力网有哪些主要的接线方式？各有什么特点？
- 1-7 架空线路由哪些部件构成？各部件有什么作用？
- 1-8 电缆线路的主要结构是什么？