

ELECTRIC POWER
SYSTEM ENGINEERING

滕福生 熊国本 编著



电力系统工程

成都科技大学出版社

电 力 系 统 工 程

滕福生 熊国本 编著

成都科技大学出版社

一九八八年八月·成都

内 容 提 要

本书叙述了电力系统的构成, 原动机, 发电机和输配电设备的工作原理和类型, 还介绍了电力系统用的潮流、短路和稳定的分析计算理论和方法。最后部分进述了电力系统的测量、保护和自动装置, 可作为为大专院校电工类有关专业的教学用书和工程技术人员参考书。

电 力 系 统 工 程

滕福生 熊国本编著

成都科技大学出版社出版、发行
四川省新华书店经销
成都科技大学印刷厂印刷
开本: 787×1092 16/1 印张: 13.5
1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷
印数: 1—1500 字数: 329千字
ISBN7-5616-2/TM·8(课)

定价: 2.28元

前 言

我国的电力工业，解放以来有了很大的发展。装机容量从1949年的 185 万千瓦，增加到近亿千瓦。到2000年，为了适应社会主义建设和人民文化、生活用电的需要，预计装机容量可达 2 亿千瓦以上。

电力的生产过程，是由发电厂、变电站和输配线路组成的电力系统来进行。电力系统是一个规模大，分布地域广的系统工程。发电厂的类型有水电厂、火电厂和核电厂。我国的水力资源非常丰富，到本世纪末，水电的比重约占三分之一。核电约占百分之四，其余则为火电。水电将建成长江中、上游，黄河上游梯级，红水河梯级，雅砻江二滩等大型水电厂。火电重点建设山西、内蒙、河南、安徽等火电基地；并在交通方便的用电中心，建设一批大型火电厂。为了把电厂发出的大量电能送往各地，相应建设大量的 500、330 和 220 千伏的交流超高压输电线路，和一些 500 千伏的直流输电线路。把现在的华北、东北、华东、华中、陕甘青和西南等六大区域电力网，联结成联合电力系统。

为了使我国的电力系统从设计、建设开始，直到建成投入运行，都符合技术经济上的要求。因此，需要大量的专业技术人员担负这些工作。由于电力系统是一综合性的系统工程，需要的专业门类很多，各类专业人员在为电力系统而工作时，除了通晓本专业外，还应了解和熟悉电力系统工程，以便更好地把各专业的知识，用于电力系统的建设和运行。本书正是为此目的而编写的一本教学和参考用书。

目 录

前 言

第一篇 电力系统及其设备	(1)
第一章 电力系统的构成.....	(1)
§1-1 电力系统.....	(1)
§1-2 电力系统的接线和电压等级.....	(3)
§1-3 电力系统负荷.....	(4)
§1-4 电力系统线路的结构.....	(6)
第二章 电力系统的输配电设备.....	(8)
§2-1 电力系统的参数和等值电路.....	(8)
§2-2 变压器参数和等值电路.....	(19)
§2-3 开关电器.....	(29)
§2-4 室内室外配电装置.....	(34)
第三章 原动机、同步电机和异步电机.....	(38)
§3-1 水力发电厂.....	(38)
§3-2 火力发电厂.....	(39)
§3-3 同步发电机的工作原理和基本结构.....	(40)
§3-4 同步电机的暂态参数.....	(42)
§3-5 同步电机的各种运行方式.....	(45)
§3-6 异步电机功率、转矩和运行特性.....	(40)
第二篇 电力系统的分析计算	(55)
第四章 电力系统短路.....	(55)
§4-1 概述.....	(55)
§4-2 标么值的应用与网络简化.....	(56)
§4-3 电力系统三相短路的分析计算.....	(62)
§4-4 对称分量法.....	(68)
§4-5 系统元件的各序阻抗.....	(71)
§4-6 不对称短路分析计算.....	(75)
§4-7 短路电流的计算机算法.....	(80)
第五章 潮流计算.....	(84)
§5-1 概述.....	(84)
§5-2 电力线路电压降落的计算.....	(84)
§5-3 电力线路功率损耗和电能损耗的计算.....	(86)

§5-4	幅射形电网的潮流分布计算	(92)
§5-5	闭式电网的潮流分布计算	(97)
§5-6	潮流计算的计算机算法	(103)
第六章	电力系统的稳定	(107)
§6-1	概述	(107)
§6-2	电力系统的静稳定性	(107)
§6-3	电力系统的动稳定性	(111)
§6-4	稳定破坏的后果和改善稳定性的方法	(115)
§6-5	稳定计算的计算机算法	(118)
第七章	主结线图和设备的选择	(121)
§7-1	概述	(121)
§7-2	主结线图的选择	(121)
§7-3	设备的发热和电动力	(124)
§7-4	选择设备的一般条件	(126)
§7-5	低压电器的选择	(127)
第三篇	电力系统的测量、控制和保护	(130)
第八章	电流互感器和电压互感器	(130)
§8-1	概述	(131)
§8-2	电流互感器	(131)
§8-3	电磁式电压互感器	(134)
§8-4	电容式电压互感器	(136)
§8-5	发电厂和变电站互感器配置	(139)
第九章	测量系统	(141)
§9-1	电力系统的二次回路	(141)
§9-2	电力系统常用电测仪表	(144)
§9-3	发电厂、变电站测量仪表配置和接线	(151)
§9-4	测量仪表的校验	(151)
第十章	保护设备	(153)
§10-1	继电保护的基本知识	(153)
§10-2	电力网的电流保护	(154)
§10-3	距离保护	(157)
§10-4	高频保护	(160)
§10-5	发电机保护	(162)
§10-6	变压器保护	(167)
第十一章	自动控制设备	(171)
§11-1	概述	(171)
§11-2	断路器控制及其信号回路	(171)
§11-3	电力系统有功功率和频率的调整	(174)

§11-4	电力系统无功功率平衡和电压调整.....	(177)
§11-5	自动重合闸装置.....	(179)
§11-6	变电站运行的自动监控.....	(182)
第十二章	防雷和接地.....	(185)
§12-1	概述.....	(185)
§12-2	输配电装置受入侵雷电波的保护.....	(186)
§12-3	旋转电机的防雷保护.....	(187)
§12-4	发电厂和变电站的防雷保护.....	(188)
§12-5	接地装置.....	(190)
附录1.	练习题.....	(194)
附录2.	各种设备元件参数表.....	(201)
2.1	钢芯铝绞线的架结构及主要参数.....	(201)
2.2	钢芯铝绞线的架空输电线路的电纳.....	(202)
2.3	钢芯铝绞线的架空输电线路的电阻和感抗.....	(202)
2.4	汽轮发电机的参数.....	(203)
2.5	水轮发电机的参数.....	(204)
2.6	110, 220千伏三相双线圈变压器的主要参数.....	(205)
2.7	220千伏三相自耦变压器的主要参数.....	(206)
2.8	110, 220千伏三相三线圈变压器的主要参数.....	(206)
2.9	少油断路器的主要参数.....	(207)

第一篇 电力系统及其设备

第一章 电力系统的构成

§ 1-1 电力系统

现代的电力系统一般是由若干个发电厂、变电站、输电线和各种用电设备联接在一起组成的统一整体，它包括了从发电、输电、配电直到用电这样一个全过程，这个统一整体称为电力系统。

在电力系统中，由变电站和不同电压等级输电线组成的部分称为电力网。除电力系统外，加上火电厂热力部分和水电厂水能部分则称为动力系统，它们联系和区别示于图1-1中。

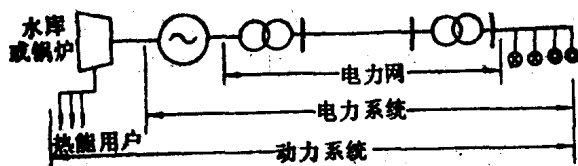


图1-1 电力网、电力系统、动力系统联系和区别

图1-2为一中型电力系统的接线图，它由具有较大容量水力发电厂，火力发电厂和热电厂组成。水电厂由于容量较大、输电距离较远，所以把电压升高，用220KV的线路输出。热电厂除了发电外，还兼向附近工厂供热，所以一般建在负荷中心，除用10KV线路向附近地区用户供电外，还通过升压变压器与110KV系统相联，以进行功率交换。220KV线路和110KV线路形成环形电网，在环网中任一回输电线被切断，都不会破坏系统主要部分之间的联系。变电站1采用二台三线圈变压器，将系统的220KV、110KV和35KV三个不同电压等级的线路联系在一起，处于联系电力系统各部分的中枢位置，地位重要，称它为枢纽变电站。变电站2只是供给一个局部地区的负荷，称它为终端变电站，变电站3为中间变电站，它除了起系统功率交换的作用，使长距离输电干线分段运行外，还降压供给地区用电。

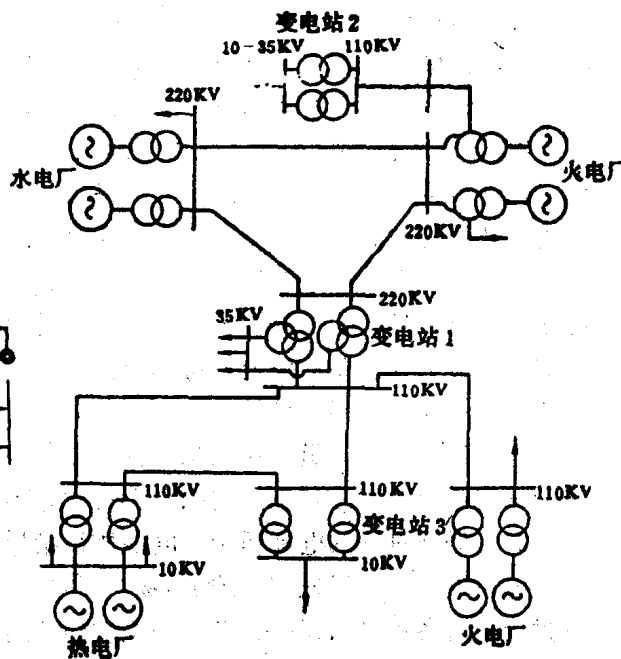


图1-2 电力系统接线图

图，它由具有较大容量水力发电厂，火力发电厂和热电厂组成。水电厂由于容量较大、输电距离较远，所以把电压升高，用220KV的线路输出。热电厂除了发电外，还兼向附近工厂供热，所以一般建在负荷中心，除用10KV线路向附近地区用户供电外，还通过升压变压器与110KV系统相联，以进行功率交换。220KV线路和110KV线路形成环形电网，在环网中任一回输电线被切断，都不会破坏系统主要部分之间的联系。变电站1采用二台三线圈变压器，将系统的220KV、110KV和35KV三个不同电压等级的线路联系在一起，处于联系电力系统各部分的中枢位置，地位重要，称它为枢纽变电站。变电站2只是供给一个局部地区的负荷，称它为终端变电站，变电站3为中间变电站，它除了起系统功率交换的作用，使长距离输电干线分段运行外，还降压供给地区用电。

电能的生产、输送、分配及使用和其它工业不同，有下述特点：

1. 电能不能大量储存。电力系统中，电能的生产与消耗是同时进行的，发电厂所发电量等于用户消费和输送分配中电能损耗之和，即发电量和用电量随时应平衡，因而任何一个元件产生故障，都将影响到系统的正常工作。

2. 过渡过程非常迅速。电力系统正常运行时，负荷在不断变化，发电量也相应变化，发电机、变压器、电力线路及电动机的投入或切除，都在瞬间完成。当系统发生异常状态，如短路、过电压、发电机失去稳定等过程都是在非常短暂的时刻进行，只靠人工操作处理是不可能的，因而必须采用各种自动、运动装置和计算机进行处理，迅速准确地完成各项调整和操作任务。

3. 与国民经济各部门息息相关。现代工业、农业、交通运输、通讯及人民日常生活等都广泛使用电能进行生产和生活，电能的不足或因故障停电，都直接影响各部门的生产和生活，且电气化程度愈高，损失愈为严重。

根据以上特点，对电力系统的基本要求是：

1. 保持连续地和可靠地满足用户用电需要。由于供电的中断，将使生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备的安全。停电给国民经济带来的损失，远远超过电力系统本身停电的损失，因而要求电力系统安全发供电。

在当前，要绝对防止事故的发生是不可能的，也并非所有的负荷都绝对不能停电。为了保证重要用户持续供电，一般都将负荷分为三类：第一类用户、即最重要的负荷。对这类负荷的中断供电，将会造成人身事故，设备损坏或使企业长期不能恢复，以及造成极坏影响和大城市生活混乱。因此，这类负荷至少应有两个以上的电源供电，以保证在任何情况下供电的可靠性。第二类用户属于重要负荷。对这一类负荷供电中断，要造成减产，对人身设备的安全威胁不大。第三类用户为一般负荷。为工厂辅助车间，小型手工业和小城镇等用电负荷。

电力系统运行人员，都应认真分析负荷的重要程度，以便必要时根据情况区别对待，保证重要负荷，特别是特殊负荷可靠地不间断供电。

2. 保证良好的电能质量。电能质量指标有：

电压偏移不超过额定值的 $\pm 5\%$ ；频率偏移不超过 $\pm 0.2 \sim 0.5$ 赫芝。电压和频率偏移过大，对各类负荷用电设备的安全和经济运行有很大影响。为了保证电能质量，需要采取一定措施。要保证电压质量合乎标准，首先要满足系统无功需求和采取有效的调压措施；要保证频率变化范围不超过规定值，首先维持系统有功功率平衡和采取相应的调频措施（详见第十一章3、4节）。

3. 保证系统运行的经济性。系统运行的经济性，用三个经济指标来衡量，即：第一、生产每一千瓦时（一度电）所耗用燃料公斤/度；第二、生产每度电所耗用的厂用电；第三、每供给用户一度电在电网中引起的电能损耗。

实践证明，将各个孤立电厂联结成一个统一的电力系统，和将各个地区系统组成联合的电力系统，能最大地满足对电力系统的基本要求。从供电的可靠性来看，多电源比单电源可靠性更高。从保证电能质量来看，个别负荷在系统总负荷中所占比重的减小，它的波动对系统电能质量影响将减小。从提高系统经济性来看，组成联合电力系

统，可以充分利用动力资源。在丰水期尽量多发水电以节约燃料，在各发电厂间合理分配负荷，使全系统电能成本最小。此外，组成系统后由于系统综合最大负荷常小于各个发电厂或小系统单独供电时各最大负荷的总和；综合负荷的降低，相应减少系统的总装机容量，同时可以减少因设备故障引起供电中断需设置的备用容量。所以，现代电力系统都向更大的联合电力系统方向发展。从减小投资，加快建设进度，节约燃料和降低发电成本以及提高劳动生产率出发，都尽可能采用大机组和大容量的发电厂。新建的绝大部分机组都采用200~600兆瓦，发电厂容量1200~2700兆瓦。由于电厂容量大，电能输送距离从数百公里至上千公里，就需要超高压送电。所以近十年来，超高压输电技术发展很快，目前我国已运行的最高电压为500KV，国际上正处在实验阶段的有1150~1500KV。

§ 1-2 电力系统的接线和电压等级

电力系统的接线图有两种：即电力系统电接线图和电力系统的地理接线图。电接线图如图1-2所示。从图中可以清晰地看出系统中各主要元件之间相互电的联系，各发电厂、变电站在系统中地位和作用，以及整个系统联系的强弱，供电的可靠程度等；但不反映各发电厂和变电站的相对地理位置。电力系统的地理接线图如图1-3所示。

在地理接线图上，发电厂、变电站的相对地理位置和电力线路的路径都按照一定比例反映出来，和电接线图配合使用，是电力系统规划设计和运行工作中不可缺少的文件。

电力系统的接线图还应反映电力系统的各种电压等级的情况。我国国家标准规定了电网的各种标准电压，一般称为额定电压。各种用电设备只有在额定电压下运行时，才具有最好的技术经济性能。在图1-2所示系统中，各部分的电压等级不同，这是因要适应一定输送功率和距离综合考虑的结果。由三相功率

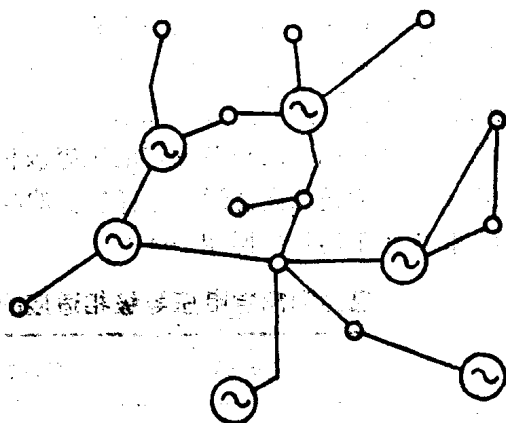


图 1-3 电力系统地理接线图

$$S = \sqrt{3} VI$$

当输送功率一定时，电压愈高，电流愈小，要求导线的截面积愈小，投资可减小；但是电压愈高，绝缘的要求愈高，断路器、变压器和杆塔等因提高绝缘的费用也愈高。综合考虑这些因素后，在一定输送功率和距离情况下，应选择一最合理的线路电压。为了使电力工业和电工制造业的生产标准化、系列化和统一化，世界上许多国家和组织，制订了标准电压的条例。我国制定的1000伏以上电压等级的额定电压标准如表1-1所示

额定电压标准

表 1-1

用电设备额定电压KV	交流发电机额定电压KV	变压器额定电压 KV	
		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
10	10.5	10及10.5	10.5及11
35	—	35	38.5
110	—	110	121
220	—	220	242
330	—	330	363

表中的用电设备, 发电机、变压器的额定电压不一致, 它们与线路额定电压之间有下列关系:

1. 发电机的额定电压较用电设备的电压高出 5 %, 这是由于用电设备的容许电压偏移 $\pm 5\%$, 而沿线路的电压降落一般为 10 %, 这就要求始端电压为额定值的 105 %, 以保证其末端电压不低于额定值的 95 %, 而发电机往往接在线路始端, 因此发电机额定电压为线路额定电压的 105 %;

2. 变压器的一次侧接电源, 相当于用电设备, 二次侧向负荷供电, 相当于发电机。从表上数据可见, 变压器二次侧的空载额定电压要比用电设备的额定电压高出 10 %, 而额定负荷下变压器内部的电压降落约为 5 %, 即正常运行时, 变压器二次侧电压较线路额定电压高出 5 %, 只有当线路不长或二次侧直接与用电设备相联的变压器, 二次侧额定电压才较线路额定电压高 5 %。

电力网额定电压的选择, 关系到电力系统建设费用的高低, 运行是否方便, 设备制造是否经济合理的一个综合性问题, 一般在作规划设计时, 就需要论证和选择, 表 1-2 中列出根据经验确定的与各额定电压等级相适应的输送功率和输送距离。一般说来, 传输功率愈大, 输送距离愈远, 选择较高的电压有利。220KV 以上电压等级相适应的传输功率和传输距离可参照图 1-4

电力网额定电压等级相适应的输送功率和输送距离

表 1-2

额定电压KV	输送功率KW	输送距离KM
3	100~1000	1~3
6	100~1200	4~15
10	200~2000	6~20
35	2000~10000	20~50
110	10000~50000	50~150
220	100000~500000	200~300
330	200000~1000000	200~600

§ 1-3 电力系统负荷

电力系统中, 一切用电设备消耗电能的总和统称为“负荷”。这个负荷是由许多不

同性质的负荷综合而成。各种用户的用电规律往往千差万别，随时都在不断的变化；因此，电力系统的负荷也是随时在变化。为了保证电力系统可靠供电和经济运行，必须充分研究各种负荷特性，掌握其变化规律，通常把负荷随时间变化的规律画成曲线叫做负荷曲线。负荷曲线分为两类：

1. 日负荷曲线。日负荷曲线表示一天24小时内负荷随时间变化的规律。负荷一般用最大负荷的百分数表示，日负荷曲线的形状，随负荷的性质而不同。钢铁工业为三班制的连续生产型，因而负荷曲线平坦；食品工业多为一班制生产型，因而负荷曲线变化幅度较大；农副业加工负荷往往每天只是持续一段时间；而市政生活用电的最大特点具有明显的照明高峰。尽管不同行业的负荷曲线有较大的变化幅度，而系统的负荷曲线相对很平坦，这是由于各行业负荷曲线的高峰，不可能在同一时刻出现，即负荷曲线上的最大值小于各行业曲线上最大值之和。几种不同行业的有功日负荷曲线如图1-5所示。

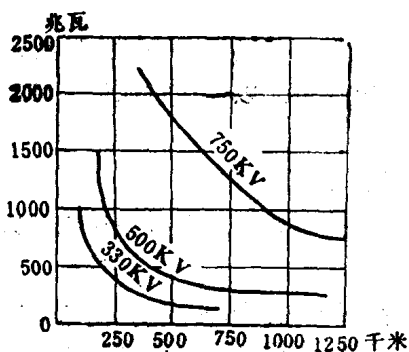


图 1-4 220KV以上电压等级相适应的输送功率和输送距离

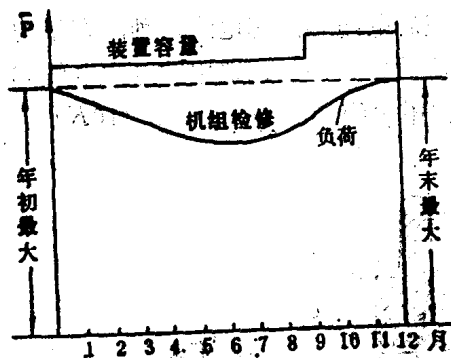


图1-6 电力系统有功功率年负荷曲线

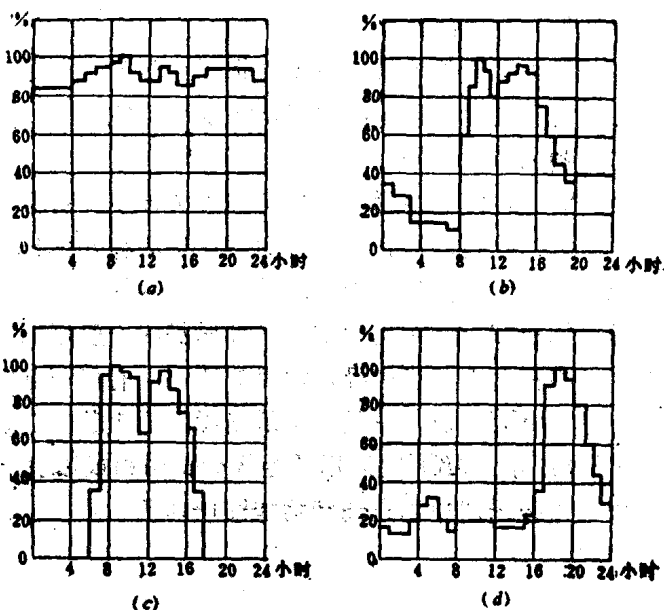


图1-5 几种行业的典型有功功率日负荷曲线
(a)钢铁工业负荷； (b)食品工业负荷；
(c)农副业加工负荷； (d)市政生活负荷

2. 年负荷曲线。它是一年内每月最大有功功率负荷变化的曲线，它反应了从年初到年终，一年内逐月综合最大负荷的变化规律，它为系统提供发电设备检修计划，决定整个系统装机容量和扩建新发电厂的依据，有功功率的年负荷曲线示于图1-6中。

需要指出，上述电力系统有功功率综合日负荷曲线，是系统中千万个用电设备消费功率的总和，加上网络中传输损耗，就是系统中各发电厂应供应的功率，一般称为电力系统供电负荷。供电负荷再加上各发电厂本厂用电消耗的功率，就称为电力系统的发电负荷。

§ 1-4 电力线路的结构

电力线路按照结构可以分为架空线路和电缆线路两类。

架空线路如图 1-7 所示，它由导线、避雷线、杆塔、金具和绝缘子等组成，它的作用分别是：

1. 导线的作用是传导电流，输送电能；
2. 避雷线的作用是把雷电电流引入大地，以保护线路免遭雷击过电压的侵袭；
3. 绝缘子用以使导线和杆塔之间保持良好的绝缘状态；
4. 金具用来支持、连接、保护导线和避雷线，以及将绝缘子固定在杆塔上；
5. 杆塔支持导线和避雷线，使导线与导线，导线与大地，导线与避雷线之间保持一定距离。

电缆线路因价格较架空线路为高，电压愈高这个差别愈大。一般用在一些特殊场合，如发电厂、变电站由于地势狭窄出线困难，大城市配电线路，以及穿过江河、海峡等往往采用电缆线路。

电力电缆线的结构主要包括三个部分，即导体、绝缘层和保护层。

1. 电缆的导体：通常用多股铝绞线组成，导线的截面除圆形外，多数采用扇形以充分利用其总面积；

2. 电缆的绝缘层：材料的种类很多，有橡胶、沥青、聚乙烯、黄麻、绸、浸渍纸；

3. 电缆的保护层：分为内保护层和外保护层两部分。内保护层由铝或铅作成，用以保护绝缘不受外力损伤，并防止水分的侵入和绝缘油外流，而外保护层的作用，防止外界机械损伤和化学腐蚀，外保护层一般用钢带铠装。

根据电力电缆中导体数目的不同，有单芯电缆、三芯电缆和四芯电缆几种，在结构上，10KV 及以下一般采用纸绝缘，三个芯线分别绝缘后铅包外加钢带铠装的电力电缆如图 1-8 所示，35KV 则采用纸绝缘分相用铝或铅包钢带铠装电缆如图 1-9 所示，110KV 及以上电缆采用单芯充油结构如图 1-10 所示。

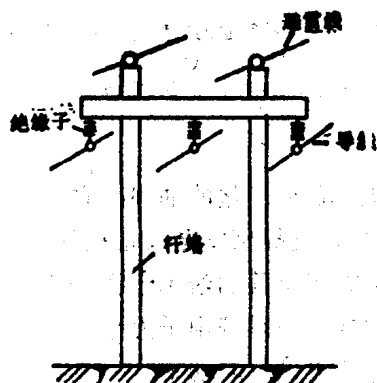


图1-7 架空线

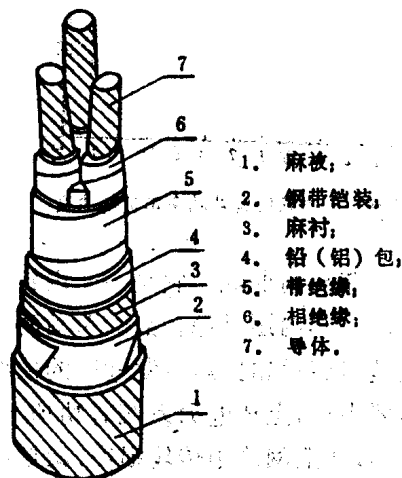


图1-8 三芯纸绝缘铅包带铠装电缆

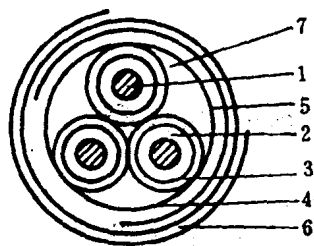


图1-9 三芯纸绝缘分相铝(铅)
包裸钢带铠装电缆

1. 导体;
2. 相绝缘;
3. 铅(铝)包;
4. 带绝缘;
5. 麻衬;
6. 钢带铠装;
7. 填麻。

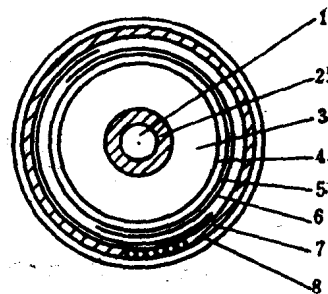


图1-10 铅包铜带加固粗钢丝
铠装充油电缆

1. 油道;
2. 导体;
3. 绝缘;
4. 铅包;
5. 内衬层;
6. 铜带加固;
7. 粗钢丝铠装;
8. 外被层。

第二章 电力系统的输配电设备

§ 2-1 电力线路的参数和等值电路

电力线路的基本电参数有电阻、电抗、电纳和电导。本节着重对用铝线的架空线路的参数进行定量分析，它是计算电能传输过程中，产生的功率损耗，电能损耗以及电压降的基本数据。

线路的电阻，要引起电力线路的有功损耗和电能损耗，以及线路的电压降。

单位长度导线的电阻 R_0 欧/千米用下式计算：

$$R_0 = \frac{\rho}{F} \quad (2-1)$$

式中， ρ 为导体材料电阻率（欧·毫米²/千米）；

F 为导体的额定截面积（毫米²）。

电阻率的数值在交流情况下大于直流电阻率，这是因为：

1. 集肤效应的影响，导线中的电场强度和磁场强度及电流密度，在导体表面场量最大，愈深入导体内部场量愈小，这种现象称为集肤效应，因而使电流趋于表面。

2. 临近效应，若干根载有交流电流的导体，彼此靠得较近时，每根导体不仅处于本身的时变电场中，同时还处于相邻导体的时变电场中，因而导体电场分布与单独存在的导体不同。

此外，由于绞线每股实际长度略长于导线长度，约增加2~3%，因而电阻率增加2~3%。绞线的实际截面比额定截面积小，

因而也要使电阻率增大。

表2-1给出常用的铝线和铜线的电阻率。用表中的数据计算出的电阻值，或查表（见附录）查得的电阻值，是温度在20℃时的数据。当温度改变后，可按下式进行修正。

计算用电阻率 表 2-1

导体材料	直流电阻率 欧·毫米 ² /千米	交流电阻率 欧·毫米 ² /千米
铜	17.2	18.8
铝	29	31.5

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (2-2)$$

式中， R_t 、 R_{20} 分别是当温度为 t 和20℃时的电阻值；

α 为电阻温度系数，铜为 $\alpha = 0.00382$ ，铝为 $\alpha = 0.0036$ 。

在电力传输过程中，除了因电阻使导体发热产生有功损耗外，还由于绝缘不够完善，沿绝缘子表面产生泄漏电流，和由于电场强度超过一定值时，空气电离放电（电晕放电现象）产生热、光、声和电磁场辐射而产生的能量损耗。沿绝缘子泄漏通常很小，可以略去；而电晕损耗则不能忽略。电晕损耗主要与线路电压有关，因当导线表面的电场强

度超过一定值时才会发生电晕，这个电压称为临界电压，用 V_{LJ} 来表示。计算电导时，一般先计算临界电压。当临界电压大于线路电压，则不产生电晕放电，电导损耗可不考虑。

临界电压的计算式：

$$V_{LJ} = 84 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{\bar{D}}{r} KV \quad (2-3)$$

式中， m_1 为导线表面不光滑系数，对于多股绞线， $m_1 = 0.8 \sim 0.83$ ；

m_2 为天气系数，干燥晴朗天气 $m_2 = 1$ ，恶劣天气 $m_2 = 0.8$ ；

δ 为空气相对密度。在 25°C 且 $b = 76$ 厘米， $\delta = 1$ ，在其它温度时，用

$$\delta = \frac{3.92b}{273+t} ;$$

$\bar{D}$ 为三相导线平均几何距离： $\bar{D} = \sqrt{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}}$ ；

r 为导体半径，厘米。

对于分裂导线：

$$V_{LJ} = 84 m_1 m_2 \delta r f_{..} \lg \frac{\bar{D}}{r_D} \quad (2-4)$$

式中， $f_{..}$ 为与分裂根数 n ，间距 S 有关的函数，

$$f_{..} = \frac{n}{1 + 2(n-1) \frac{r}{S} \sin \frac{\pi}{n}} ;$$

r_D 为导线的等值半径， $r_D = \sqrt[n]{r \bar{S}^{n-1}}$ ；

$\bar{S}$ 为分裂各导线间的几何均距。

从式中可以看出：

因公式中的 $\bar{D}$ 在对数符号内，因而对 V_{LJ} 影响不大，即不能靠增大导线间距离来降低 V_{LJ} 。导线半径 r ，近似与 V_{LJ} 成正比。导线截面小，则导线表面电场强度高；增大导线截面是提高临界电压的有效办法，为提高临界电压，对不同电压等级的线路，导线直径 d 都有一定要求，如对于 $110KV$ 的线路， $d \leq 9.6$ 毫米， $220KV$ 的线路， $d \leq 21.3$ 毫米， $330KV$ 的线路， $d \leq 33.2$ 毫米。

当线路实际电压高于临界电压时，代表电晕的电导为：

$$g_1 = \frac{\Delta P_e}{V^2} 10^{-8} \quad \text{西门/千米} \quad (2-5)$$

式中， ΔP_e 为实测三相电路电晕消耗总功率千瓦/千米；

V 为线电压，千伏。

如无实测电晕损耗总功率时，也可以按下列经验公式计算：

$$\Delta P_e = \frac{0.18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (V - V_{LJ})^2 \quad \text{千瓦/千米} \quad (2-6)$$

线路的电抗是由于导线中有交流电流流过，在导线周围要产生交变磁场而产生电抗。当三相输电线排列对称，虽不对称但经完全换位时，每相输电线的单位长度电抗，可按下式计算：

$$x_1 = \omega L_1 = 2\pi f (4.6 \lg \frac{\bar{D}}{r} + 0.5 \mu_r) \times 10^{-4} \quad \text{欧/千米} \quad (2-7)$$

式中， x_1 为导线单位长度的电抗 欧/千米；

r 为导线半径厘米；

$\bar{D}$ 为三相导线间的平均几何均距，厘米 $\bar{D} = \sqrt{D_{aa} D_{bb} D_{cc}}$ ；

μ_r 为导线材料的相对导磁系数，对有色金属， $\mu_r = 1$ 。

将 $f=50$ ， $\mu_r=1$ ，代入上式则简化为：

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{\bar{D}}{r} + 0.0157 \quad \text{欧/千米} \quad (2-8)$$

从上式可见， r 和 $\bar{D}$ 与 x_1 之间存在对数关系，即导线在杆塔上的布置和导线截面积的大小，对电抗没有显著影响。架空输电线的电抗一般都在0.4欧/千米左右，所以在近似计算时，取 $x_1=0.4$ 。

为了提高超高压输电线的电晕临界电压，要求导线的截面很大，极不经济。这可以用改变导线周围的电场分布，等效增大导线半径以达到减低电晕损耗和电晕干扰；在220KV以上的线路，广泛采用分裂导线，等效地增大导线半径，从而提高临界电压，相应也就减小每相电抗。采用分裂导线的线路，电抗按下式计算：

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{\bar{D}}{r_D} + \frac{0.0157}{n} \quad \text{欧/千米} \quad (2-9)$$

式中， r_D 为导线的等值半径， $r_D = \sqrt[n]{r S^{(n-1)}}$ ；

r 为导线半径；

$\bar{S}$ 为分裂导线间的几何均距。

线路的电纳是由导线与导线间，和导线与大地间的电容所决定，三相输电线排列对称，虽不对称但经完全换位后，每相导线单位长度的电容可用下式计算：

$$C_1 = \frac{0.024}{\lg \frac{\bar{D}}{r}} \times 10^{-6} \quad \text{法/千米} \quad (2-10)$$

其相应的电纳：

$$b_1 = \omega C_1 = 2\pi f C_1 = 2\pi \times 50 \times \frac{0.024}{\lg \frac{\bar{D}}{r}} \times 10^{-6} = \frac{7.58}{\lg \frac{\bar{D}}{r}} \times 10^{-6} \quad \text{西/千米} \quad (2-11)$$

式中， b_1 为每相导线单位长度的电纳；西/千米；

r 为导线等值半径，厘米或毫米；

$\bar{D}$ 为三相导线的几何均距，厘米或毫米。

和线路的电抗特性相似，架空线路的电纳值，对不同的 r 和 $\bar{D}$ 也变化不大，其值一