



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



DESIGN OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

架空输电线路设计

(第二版)

孟遂民 孔伟 唐波 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

架空输电线路设计

(第二版)

编著 孟遂民 孔 伟 唐 波

主审 刘观起 杨静波



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。本书共分十三章，主要内容包括绪论、架空输电线路基本知识、设计用气象条件、架空线的机械物理特性和比载、均布荷载下架空线的计算、气象条件变化时空架线的计算、均布荷载下架空线计算的进一步研究、非均布荷载下架空线的计算、连续档架空线的应力和弧垂、架空线的断线张力和不平衡张力、架空线的振动和防振、路径选择和杆塔定位以及计算机在输电线路设计中的应用。

本书可作为高等学校相关专业课程的教材，也可供从事输电线路设计、运行、检修等有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

架空输电线路设计/孟遂民, 孔伟, 唐波主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2015. 2

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 6984 - 9

I. ①架… II. ①孟… ②孔… ③唐… III. ①架空线路—输电线路—设计—高等学校—教材 IV. ①TM726. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 308607 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版

2015 年 2 月第二版 2015 年 2 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 453 千字

定价 38.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书第一版于2007年由电力出版社出版以来，得到了广大读者的欢迎，已多次印刷，并入选“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。在此期间，我国输电线路工程迅猛发展，几乎同时出现了1000kV特高压交流和±800kV特高压直流输电线路，且数量持续增加。同时输电线路方面的科学研究取得了丰硕成果，架空输电线路设计的有关主要规范标准也进行了修订。本书第二版力图反映这些新的变化。

本书第二版对有关章节的内容进行了适当调整，并按最新有关规范标准进行了改写。主要是增加了绪论一章，论述了输电技术与输电线路的研究与发展趋势；增加了导线热平衡的详细计算内容；增加了新的绝缘子结构，绝缘配合介绍了考虑有效系数的爬电比距法；风速的计算增加了梯度高度和截断高度，以利于理解不同地面粗糙度之间风速的关系；对孤立档架空线应力弧垂计算举例的计算过程进行了细化，更利于读者学习和理解；增加了施工基面和长短腿的内容，以提高水土保持和环境保护意识；航片、卫片以及遥感影像等已广泛用于输电线路的选线和定位中，最后一章对此和有关设计软件进行了更新介绍。另外，在有关的章节中增加了1000kV线路的相应规定，对有关的练习题进行了完善和补充。

本书第二版第十三章由三峡大学唐波编写，各章例题由研究生秦坤进行了核算，其余内容由三峡大学孟遂民改写。全书由孟遂民统稿。

在本书的修订过程中，参考了有关文献资料，对其作者一并表示感谢。

编 者

2014年10月于三峡大学

第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书介绍了架空输电线路设计方面的有关知识和优化换位方式、紧凑型输电线路等内容，重点阐述了考虑刚度影响、滑轮悬挂等特殊情况下的架空线计算问题，对输电线路 CAD 也作了比较深入的讨论。相关内容曾作为教学讲义在三峡大学、东北电力大学、南京工程学院等学校使用多年，本次出版按照最新国家有关标准和有关研究成果进行了修订。

全书共分十二章。第一章介绍输电线路的基本知识、各组成部分的选用，架空线的排列方式、换位及其优化，紧凑型输电线路以及线路设计的一般内容和步骤。第二、三章介绍线路设计用气象条件和架空线的机械物理特性、安全系数的选取、比载的计算。第四章重点导出均布荷载下的架空线悬链线形式的有关公式，并以此为基础，导出了斜抛物线形式的有关公式，分析了斜抛物线和平抛物线形式有关公式的误差。第五章讲述架空线的状态方程式、临界档距和控制气象条件，研究作图法和列表法判定有效临界档距的原理和方法。第六章对均布荷载下架空线的计算进一步研究，论述刚性架空线的有关计算，给出架空线刚度的测试方法，论述架空线的初伸长及其与时间的关系，介绍常用的初伸长补偿方法，过牵引现象及其计算，水平档距和垂直档距，极大档距和允许档距以及极限档距，研究确定架空线放松系数的方法。第七章研究非均布荷载作用下的架空线计算问题，给出耐张串的比载、水平投影和垂直投影长度的计算公式，分析孤立档施工观测和竣工弧垂的计算特点，讲述判定孤立档控制条件的方法。第八章研究连续档架空线的有关计算，讲述代表档距法和精确算法，并就滑轮悬挂架空线的情况进行比较深入的分析研究，论述连续档架空地线应力的选配方法以及连续倾斜档的架线观测弧垂及线长的调整。第九章研究架空线的断线张力和不平衡张力，给出校验跨越限距时断线档的选取原则，讲述求解断线张力的解析法、图解法以及地线支持力的计算，介绍不均匀覆冰的计算特点。第十章研究架空线的振动和防振，重点讲述架空线振动的基本理论、微风振动的影响因素、微风振动的强度表示和测量方法、微风振动的防振设计。第十一章研究线路路径的选择，介绍对地距离和交叉跨越的有关规定，讲述弧垂曲线模板和杆塔定位方法，重点研究了杆塔定位的校验内容及其方法，并讲述了杆塔中心位移问题。第十二章研究计算机在输电

线路设计中的应用，从数据库、3S技术、CAD技术的角度论述输电线路计算机辅助设计，介绍目前流行的三种输电线路CAD软件。

本书第一、三、四章由东北电力大学孔伟编写，其余章节由三峡大学孟遂民编写，全书由孟遂民教授统稿，由华北电力大学刘观起主审。

由于编者水平的局限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2007 年春节

目 录

前言

第一版前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 输电技术与输电线路的发展	3
第三节 架空输电线路设计的一般内容和步骤	9
练习题	12
第二章 架空输电线路基本知识	13
第一节 导线和地线	13
第二节 绝缘子和绝缘子串	21
第三节 常用金具	29
第四节 杆塔	33
第五节 基础	35
第六节 接地装置	36
第七节 导线的排列方式与换位	37
练习题	40
第三章 设计用气象条件	41
第一节 主要的气象参数	41
第二节 气象参数值的选取	42
第三节 设计用气象条件的组合	50
练习题	53
第四章 架空线的机械物理特性和比载	54
第一节 架空线的机械物理特性	54
第二节 架空线的许用应力和安全系数	58
第三节 架空线的比载	59
练习题	64
第五章 均布荷载下架空线的计算	65
第一节 架空线悬链线方程的积分普遍形式	65
第二节 等高悬点架空线的弧垂、线长和应力	66
第三节 不等高悬点架空线的弧垂、线长和应力	69
第四节 架空线弧垂、线长和应力计算公式的简化	75
第五节 架空线的平均高度与平均应力	85

第六节	均布垂直比载和水平比载共同作用下架空线的计算	87
练习题		90
第六章	气象条件变化时架空线的计算	91
第一节	架空线的状态方程式	91
第二节	临界档距	97
第三节	最大弧垂的判定	102
第四节	应力弧垂曲线和安装曲线	104
练习题		109
第七章	均布荷载下架空线计算的进一步研究	111
第一节	考虑刚度影响时架空线的计算	111
第二节	架空线的初伸长及其处理	119
第三节	架空线施工中的过牵引	122
第四节	线路设计中常用的几种档距	124
第五节	架空输电线路的改建	129
练习题		131
第八章	非均布荷载下架空线的计算	132
第一节	架空线悬挂曲线方程的一般形式	132
第二节	非均布荷载下架空线的弧垂、张力和线长	133
第三节	孤立档架空线的弧垂和线长	136
第四节	孤立档架空线的状态方程式	142
第五节	孤立档的控制条件	146
第六节	非均布垂直荷载和水平荷载共同作用下架空线的计算	147
第七节	耐张绝缘子串的水平及垂直投影长度	149
第八节	孤立档架空线应力弧垂计算举例	151
练习题		159
第九章	连续档架空线的应力和弧垂	160
第一节	连续档架空线应力的近似计算——代表档距法	160
第二节	连续档架空线应力的精确计算	164
第三节	采用滑轮线夹时连续档架空线的有关计算	167
第四节	连续档架空地线的应力选配	176
第五节	连续倾斜档的架线观测弧垂及线长的调整	179
练习题		181
第十章	架空线的断线张力和不平衡张力	183
第一节	概述	183
第二节	固定横担固定线夹下单导线的断线张力	184
第三节	分裂导线的断线张力	189
第四节	线路正常运行中的不平衡张力	190
第五节	地线的支持力	191

练习题	193
第十一章 架空线的振动和防振	195
第一节 架空线的振动形式及其产生原因	195
第二节 微风振动的基本理论	198
第三节 微风振动强度的表示方法	202
第四节 用能量平衡原理估算振动幅值	204
第五节 影响微风振动的主要因素	205
第六节 微风振动的防振设计	208
练习题	215
第十二章 路径选择和杆塔定位	217
第一节 输电线路的路径选择	217
第二节 对地距离和交叉跨越的有关规定	222
第三节 杆塔定位	227
第四节 杆塔定位校验	234
第五节 杆塔中心位移及施工基面	245
练习题	247
第十三章 计算机在输电线路设计中的应用	248
第一节 数据库及其在线路设计中的应用	248
第二节 3S 技术及其在线路设计中的应用	251
第三节 输电线路计算机辅助设计	255
附录 A 常用架空导线和地线的规格和性能	265
附录 B 常用杆塔的结构型式和有关尺寸	279
附录 C 公路等级	286
附录 D 弱电线路等级	287
参考文献	288

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、输电线路及其任务

输送电能的线路通称为电力线路。电力线路分为输电线路和配电线路。由发电厂向电力负荷中心输送电能的线路以及电力系统之间的联络线路称为输（送）电线路，架设于变电站（开关站）与变电站之间。由电力负荷中心向各个电力用户分配电能的线路称为配电线路。

发电厂发出的电能，通过升压变电站升压后，由输电线路输送到电力负荷中心附近，再通过降压变电站降压后，由配电线路传输到各电力用户的用电设备消耗掉。发电厂、输电线路、升降压变电站以及配电线路和用电设备构成了电力系统。其中，输电线路、升降压变电站和配电线路称为电力网。

目前我国火电和水电发电量合计约占全国发电量的 95%，火电仍基本依靠燃煤发电。而地球上的煤炭和水力等动力资源的分布是自然决定的，通常远离电力负荷中心。火力发电厂可以建在煤炭能源基地，也可以建在负荷中心附近，这取决于远距离输电经济还是运送燃料经济。一座 300 万 kW 的现代化燃煤发电厂，其年耗标准煤约 800 万 t，这么多原煤燃烧必会产生一定程度的污染，而负荷中心往往人口密集。因此从技术上、经济上和环境污染等方面比较，现代化的大型火电厂宜建在煤炭能源基地。水力发电厂则只能建在水力资源处。这些电厂发出的电能通过输电线路向负荷中心输送。

电能的生产和消费须在同一时间内完成，必须时刻保持平衡。发电能力需要满足高峰用电需求。为了减少系统的备用容量，错开高峰负荷，实现跨区域跨流域调节，增强系统的稳定性，提高抗冲击负荷的能力，在电力系统之间采用高压输电线路进行联络（联网）。电力系统联网，既提高了系统的安全性、可靠性和稳定性，又可实现经济调度，使各种能源得到充分利用。起系统联络作用的输电线路，可进行电能的双向输送，实现系统间的电能交换和调节。

因此，输电线路的任务就是输送电能，并联络各发电厂、变电站使之并列运行，实现电力系统联网。

二、输电线路的分类

(1) 按电压等级，输电线路分为高压、超高压和特高压线路。35~220kV 的线路为高压 (HV) 线路，330~750kV 的线路为超高压 (EHV) 线路，750kV 以上的是特高压 (UHV) 线路。一般地，输送电能容量越大，线路采用的电压等级就越高。相邻的电压等级通常相差 2~3 倍。根据 GB/T 156—2007《标准电压》，我国交流输电线路的电压等级有 35、66、110、220、330、500、750kV 和 1000kV。

(2) 按架设方式，输电线路分为架空线路和电缆线路。架空线路由于结构简单、施工简便、建设费用低、施工周期短、检修维护方便、技术要求较低等优点，得到广泛的使用。但是架空线路设备长期露置在大自然环境中，易受各种气象条件（如大风、覆冰、气温变化、雷击等）的侵袭、化学气体的腐蚀以及外力的破坏，出现故障的几率较高。电缆线路受外界

环境因素的影响小,但需用特殊加工的电力电缆,费用高,施工及运行检修的技术要求高,目前仅用于城市居民稠密区和跨海输电等特殊情况。

(3) 按电流性质,输电线路分为交流线路和直流线路。最常见的是三相交流线路。在输电线路的送端,交流电经换流站内的换流变压器送到整流器,将高压交流电变为高压直流电后送入直流输电线路;直流电通过输电线路送到受端换流站内的逆变器,将高压直流电又变为高压交流电,再经过换流变压器将电能输送到交流系统。与交流线路相比,在输送相同功率的情况下,直流线路需要的投资较少,主要材料消耗低,线路的走廊宽度也较小;作为两个电网的联络线,改变传送方向迅速方便,可以实现相同频率甚至不同频率交流系统之间的不同步联系,能降低主干线及电网间的短路电流。通常,±600kV 及以下电压等级的线路称为高压直流(HVDC)输电线路,±600kV 以上电压等级的线路称为特高压直流(UHVDC)输电线路。按 GB/T 156—2007《标准电压》的规定,我国高压及以上直流输电线路的电压为±500、±800kV。

(4) 按杆塔上的回路数,输电线路分为单回路、双回路和多回路线路。除架空地线外,单回路杆塔上仅有一回三相导线,双回路杆塔上有两回三相导线,多回路杆塔上有三回及以上的三相导线。

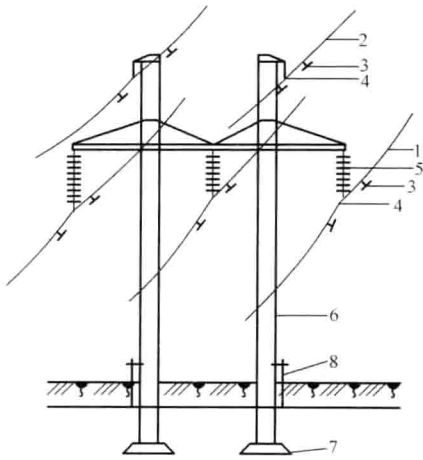


图 1-1 架空输电线路的组成

- 1—导线; 2—地线; 3—防振锤; 4—线夹;
5—绝缘子(串); 6—杆塔;
7—基础; 8—接地装置

(5) 按相导线之间的距离,输电线路分为常规型线路和紧凑型线路。紧凑型输电线路是与常规型线路相比较而提出来的。在保证安全运行的前提下,紧凑型线路尽量缩小相间距离,增加相导线的分裂数和间距,优化导线排列,可大幅度提高线路的自然输送功率。

本书重点论述常规型架空交流输电线路设计的有关问题。

三、架空输电线路的组成

架空输电线路主要由导线、地线、绝缘子(串)、线路金具、杆塔和拉线、基础以及接地装置等部分组成,如图 1-1 所示。

1. 导线

导线用以传导电流,输送电能。它通过绝缘子串悬挂在杆塔上。导线常年在大气中运行,长期受风、冰、雪和温度变化等气象条件的影响,承受着变化拉力的作用,同时还受到空气中污物的侵蚀,因此除应具有良好的导电性能外,还必须有足够的机械强度和防腐性能,并要质轻价廉。

2. 地线

地线的全称为架空地线,又称避雷线,是悬挂在导线上方的一根或两根金属线。它的主要作用是防止雷电直击导线,同时在雷击杆塔时起分流作用,对导线起耦合和屏蔽作用,降低导线上的感应过电压。

3. 绝缘子(串)

绝缘子(串)用来支持或悬挂导线和地线,保证导线与杆塔间不发生闪络,保证地线与

杆塔间的绝缘。绝缘子长期暴露在自然环境中，经受风、雨、冰、霜及气温突变等恶劣气候的考验，有时还受有害气体的污染，因此绝缘子必须具有足够的电气绝缘强度和机械强度，还应具有一定的抗污能力，并应定期检修。

4. 线路金具

线路金具是输电线路所用金属部件（除杆塔外）的总称。线路金具种类繁多，用途各异，常用的有线夹、接续金具、连接金具、保护金具以及拉线金具等。线路金具通常承受较大的荷载，需要有足够的强度。与导线相连的金具，还必须具有良好的电气性能。金具质量的好坏，使用和安装是否正确，对安全输电有很大的影响。在设计线路时，应尽量选择标准金具。

5. 杆塔和拉线

杆塔用来支持导线、地线及其他附件，使导线以及地线之间彼此保持一定的安全距离，并保证导线对地面、交叉跨越物或其他建筑物等具有允许的安全距离。目前常用的杆塔有钢筋混凝土杆塔和铁塔两种。在线路总投资中，杆塔部分约占40%，因此设计时应尽量做到结构简单、材料消耗量少、机械强度高、便于施工安装和维护。

拉线用来平衡杆塔的横向荷载和导线张力，减少杆塔根部的弯矩。使用拉线可减少杆塔材料的消耗量，降低线路的造价。

6. 杆塔基础

杆塔基础的作用是支承杆塔，传递杆塔所受荷载至大地。杆塔基础的型式很多，应根据所用杆塔的型式、沿线地形、工程地质、水文和施工运输等条件综合考虑确定。

7. 接地装置

接地装置的作用是导泄雷电流入地，保证线路具有一定的耐雷水平。

第二节 输电技术与输电线路的发展

一、发展历史与现状

人们最早应用的是直流电，主要用于照明。1882年爱迪生（Edison）建立了第一座商业化发电厂和直流电力网，能发660kW的电力。随后，社会对电力的需求急剧增大。由于对用户的电压不能太高，因此要输送一定的功率，就要加大电流。而电流愈大，输电线路发热就愈厉害，损失的功率就愈多，同样损失在输电导线上的电压也大，离发电厂愈远的用户得到的电压也就愈低。直流输电的弊端，限制了电力的应用。

为了减少输电的电能损失，只能提高电压。在发电端将电压升高，到用户端再把电压降下来，达到低损耗情况下的远距离送电。而直流输电改变电压困难，只有采用交流输电。1882年前后，英国的费朗蒂（Ferranti）改进了交流发电机，提出了交流高压输电的概念。1888年，伦敦泰晤士河畔的大型发电厂开始交流输电。1889年，俄国的多利沃—多布罗沃利斯基（Dolivo-Dobrovolsky）制成第一台三相交流发电机。1891年德国劳芬电厂安装了第一台三相100kW交流发电机，通过第一条三相交流输电线路送电到法兰克福，线路总长175km，电压为15.2kV。

自发明三相交流输电以来，输电技术朝着高电压、大容量、远距离的目标不断进步。1952年瑞典首先建立了380kV输电线路，采用双分裂，距离960km。1956年前苏联建成

400kV 输电线路, 1964 年美国建成 500kV 输电线路, 1965 年加拿大建成 765kV 输电线路。20 世纪 70 年代, 欧、美各国对交流 1000kV 级特高压输电技术进行了大量研究, 1985 年苏联建成第一条 1150kV 工业性线路, 日本也在 20 世纪 90 年代初建成 1000kV 线路。

在交流超高压输电技术发展的同时, 高压直流输电技术也进入了工程实用阶段。1962 年前苏联建成 $\pm 400\text{kV}$ 工业性试验线路, 随后又建设 $\pm 750\text{kV}$ 长距离直流线路; 1970 年美国第一条 $\pm 400\text{kV}$ 直流线路建成, 1985 年升压到 $\pm 500\text{kV}$; 加拿大于 1990 年建成 750kV 级直流线路并向美国延伸。巴西伊泰普水电站用 $\pm 600\text{kV}$ 直流线路送出电能。欧洲、非洲、日本、印度、新西兰等地区 and 国家的直流线路也相继投入运行。

此外, 高自然功率的紧凑型线路以及灵活交流输电等多种多样输电新技术的研究也取得很大进展, 有的已进入工程实践。

在我国, 1882 年上海建设了一条低压输电线路。1936 年出现了万伏电压以上的输电线路, 电网初步形成。1937 年日本帝国主义侵略我国, 刚刚发育的我国电网遭受了严重破坏。新中国成立后, 我国电网建设进入了一个统一有序的发展阶段。1952 年自主建设了 110kV 输电线路, 逐步形成了京津唐 110kV 输电网。1954 年建成了吉林丰满水电站至辽宁抚顺李石寨变电站的 220kV 输电线路, 全长 369km。1972 年建成第一条 330kV 刘家峡水电站至关中的超高压线路, 全长 534km。随后 330kV 线路延伸到陕甘宁青 4 个省区, 形成西北跨省联合电网。1981 年第一条 500kV 输电线路——平(平顶山)武(武昌)线投入运行, 该线路全长 595km, 启动了我国跨省、超高压电网建设的进程。2005 年 9 月, 由青海官亭至甘肃兰州东的“西北 750kV 输变电示范工程”投入运行, 该线路是我国第一条世界上海拔最高的输电线路。2009 年 1 月 6 日, “1000kV 交流特高压试验示范工程”晋东南—南阳—荆门输电线路工程正式投入运行, 该工程起自晋东南 1000kV 变电站, 经南阳 1000kV 开关站, 止于荆门 1000kV 变电站, 全长约 654km。我国成为当今世界商业化交流输电电压等级最高的国家。

1987 年我国自主设计、设备全部国产化的 $\pm 100\text{kV}$ 舟山直流输电工程建成。1989 年 9 月我国首条 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路——葛(葛洲坝)上(上海)线单极建成投运, 1990 年实现双极运行, 该线路长 1045km, 双极容量 120 万 kW, 实现了华中—华东电网的区域直流联网, 拉开了我国跨大区联网的序幕。2009 年 12 月云南—广东 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程单极投运, 2010 年 6 月实现双极运行, 线路长 1500km, 输电容量达 500 万 kW。2011 年 12 月 9 日, 世界最高海拔、高寒地区建设规模最大、施工难度最大的输变电工程——柴达木至拉萨 $\pm 400\text{kV}$ 直流输电工程投入试运行, 线路长 1038km, 输送容量 120 万 kW。我国目前是当今世界直流输电电压等级最高的国家。

1990 年以前, 我国主要以 220kV 为地区骨干网架; 2000 年以后, 除西北等电网外, 基本以 500kV 为各省主网架。同时, 交直流 500kV 线路成为跨省区输电的重要线路。

自 20 世纪 90 年代初起, 我国开始研究并陆续建成了一些紧凑型输电线路。北京安定至河北廊坊的 220kV 紧凑型输电线路, 是我国第一条紧凑型输电线路, 全长 23.6km, 1994 年建成投运。北京昌平至房山的 500kV 紧凑型输电线路, 全长 83km, 1999 年建成投运。2004 年 4 月 26 日江苏政平—宜兴 500kV 同塔双回紧凑型线路建成投运。

同塔多回路技术也已得到普遍应用。德国在其高压和超高压线路中, 同塔四回为常规型线路。日本东京电力公司 110kV 及以上的线路多数为同塔四回, 最多回路数为同塔并架八

回。国内第一条同塔多回线路建于 1990 年，为蓟门—清河的 220、110kV 各二回的同塔四回线路。2007 年江苏利港电厂至梅里输电线路建成，为世界首条 500kV 同塔四回输电线路；同年，全国第一基同塔六回钢管塔（ $4 \times 220\text{kV} + 2 \times 110\text{kV}$ ）成功通过了测试。

除台湾地区外，目前全国已形成东北、华北、华东、华中、西北、南方、西藏等 7 个区域电网，实现了华中电网与华北、华东、西北、南方电网互联，华北电网与东北电网互联，西北电网与西藏电网互联。

二、发展趋势

1. 特高压交流输电

我国能源和电力负荷分布极不均衡，西部水力和煤炭资源丰富，用电则大多集中在东南沿海，客观上需要远距离、大容量、跨区域输电，大规模、大范围优化配置资源，“西电东送、南北互供”是必然选择。特高压交流输电具有以下优点：

(1) 输送容量大。输电线路的输电能力与电压的平方成正比，1000kV 特高压交流线路的自然输送功率是 500kV 超高压交流线路的 4~5 倍；在采用同型杆塔条件下，单位走廊宽度输送容量约为 500kV 超高压交流线路的 2.5 倍。

(2) 线路损耗小。输送相同功率时，电压越高、电流越小，线路的损耗就小。在导线总截面积和输送容量相同的情况下，1000kV 线路的电阻损耗约是 500kV 线路的 1/4。

(3) 稳定性好。输电电压越高，从电源侧发电机端看去，电路的阻抗就越小，在输电系统中，输电线路和发电机之间同步运行的稳定性就越高。

(4) 经济指标高。输送容量在 1000 万~1500 万 kW，输送距离 2000km 以上，用特高压输电比超高压输电要经济。当需要输送容量 1000 万 kW，采用 500kV 超高压输电需约 10 回线路，投资估计 370 亿元；而采用 1000kV 特高压输电时，仅需二回线路，投资估计 240 亿元。

我国发展 1000kV 特高压交流输电，主要定位于更高一级电压等级的国家骨干网架建设和跨大区域的联网。

2. 特高压直流输电

直流输电与交流输电相比，具有以下特点：

(1) 输送相同功率时，线路造价低。直流输电采用两线制，与采用三线制三相交流输电相比，在输送同样功率时，考虑到趋肤效应和各种损耗，直流输电所用的线材几乎只有交流输电的一半。另外，直流输电的杆塔结构比同容量的三相交流输电简单，线路走廊占地面积也少，这些减少了大量的运输、安装费。即使换流站的建设费用比变电站要高，在超过一定距离后，直流输电的整体造价还是更经济。直流输电线路与交流输电线路的总投资与线路距离的关系如图 1-2 所示。

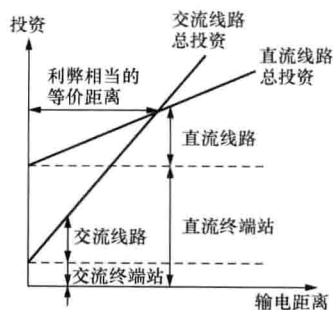


图 1-2 直流输电线路与交流输电线路的总投资与线路距离的关系

(2) 没有电容电流产生，线路损耗小。在一些特殊场合，必须用电缆输电，例如城市中心地带采用地下电缆，海岛输电要用海底电缆。由于电缆芯线与大地之间构成同轴电容器，在交流高压输电线路中，空载电容电流极为可观；在直流输电线路中，由于电压波动很小，基本上没有电容电流加在电缆上。

(3) 可实现不同频率交流系统之间的不同步联系, 系统更稳定。远距离交流输电时, 电流在交流输电系统的两端会产生显著的相位差。并网的各系统交流电的频率虽然规定统一为 50Hz, 但实际上常产生波动。这两种因素引起交流系统需要用复杂庞大的补偿系统和综合性很强的技术, 保证其同步运行, 否则就可能在设备中形成强大的循环电流, 损坏设备或造成不同步运行的停电事故。而直流输电线路互连时, 两端的交流电网可以用各自的频率和相位运行, 不需进行同步调整。

(4) 输送功率调节方便, 能限制系统的短路电流。两个交流系统用交流线路互连, 当一侧系统发生短路时, 另一侧要向故障一侧输送短路电流, 有可能超过原有断路器的遮断容量, 这就要求更换大容量的设备, 增加大量的投资。若用直流输电将两个交流系统互连, 由于采用可控硅装置, 电路功率能迅速、方便地进行调节。直流输电线路向发生短路的交流系统输送的短路电流不大, 故障侧交流系统的短路电流与没有互连时几乎一样。

(5) 输电可靠性更高。在直流输电线路中, 各极是独立调节和工作的, 彼此没有影响。所以, 当一极发生故障时, 只需停运故障极, 另一极仍可输送不少于一半功率的电能。利用该特点, 直流输电线路可安排分期建设。而在交流输电线路中, 任一相发生永久性故障, 必须全线停电。

(6) 直流换流站比交流变电站的设备多、结构复杂、造价高、损耗大、运行费用高。

(7) 直流输电工程在单极大地回路方式下运行时, 入地电流会对附近的地下金属体造成一定腐蚀, 窜入交流变压器的直流电流会使变压器噪声增加。

(8) 直流输电线路的污秽比交流输电线路严重, 变压不方便, 换流器在整流和逆变过程中的谐波较大。

(9) 若要实现多端输电, 技术比较复杂。

高压直流输电具有线路输电能力强、损耗小、两侧交流系统不需同步运行、发生故障时对电网造成的损失小等优点, 特别适合用于长距离点对点大功率输电, 而采用交流输电便于向多端输电。交流与直流输电配合, 将是现代电力传输系统的发展趋势。

3. 紧凑型输电

紧凑型输电是通过对导线的优化排列, 缩小相间距离, 增加相分裂根数, 降低电抗和增大电容, 减少波阻抗, 大幅度提高自然输送功率, 有效压缩线路走廊的一项输电技术。

紧凑型输电线路主要具有如下特点:

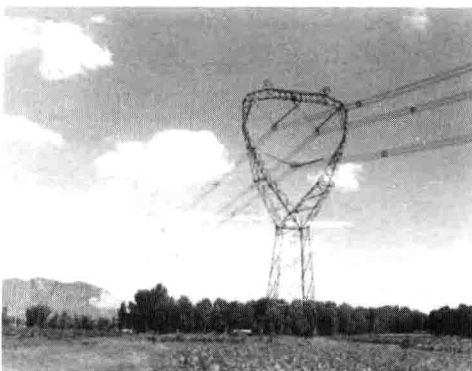


图 1-3 昌房 500kV 紧凑型输电线路

(1) 结构紧凑, 线路走廊占地少。紧凑型输电线路, 为减小波阻抗, 相间距离大幅缩小; 采用封闭式铁塔, 杆塔尺寸缩小; 为限制导线风偏, 多采用“V”形绝缘子串悬挂导线, 必要时使用相间绝缘间隔棒。这些使得线路结构紧凑, 走廊减小, 减轻了对环境的影响和污染。如昌房(北京昌平—房山) 500kV 紧凑型输电线路(见图 1-3), 线路走廊比常规线路缩小约 18m。在线路走廊紧张的地区, 紧凑型输电线路具有无比的优越性。

(2) 自然输送功率增大。输电线路相间距离

的减小对线路波阻抗和自然功率有明显的影响。当大幅度减小相间距离,改变传统布置为紧凑布置时,线路波阻抗明显降低,导线的表面强度、电荷分布趋向均匀一致,最大工作场强可尽量接近允许场强,自然输送功率大幅度提高。如 220kV 安廊线(北京安定—河北廊坊大屯)自然输送功率比常规型线路提高了 60%,500kV 昌房线自然输送功率比常规型线路提高 34.4%。

(3) 综合成本低。紧凑型线路虽因采用 V 形绝缘子串、相间绝缘间隔棒以及特殊型式的杆塔等,使投资增大,但由于线路走廊窄降低了占地费用,自然输送功率大充分发挥了输送能力,从而使得线路的综合成本降低。与常规型线路相比,500kV 昌房线紧凑型线路的输送单位自然功率造价降低约 21.2%,220kV 安廊线紧凑型线路降低约 29.6%。因此在长距离输电工程中,紧凑型输电线路可取得更大的经济效益。

(4) 导线表面平均场强高,电晕损失、无线电干扰较大。与常规型线路相比,紧凑型线路电晕损失高 1.7~3.8 倍,大雨下无线电干扰水平高 1~10dB 左右。

(5) 带电作业的要求提高。紧凑型线路由于结构紧凑,相间距离较小,带电作业必须详尽考虑杆塔的结构,分析带电作业间距,并提出更高的带电作业要求。

紧凑型与常规型输电线路的自然输送功率和走廊宽度的比较见表 1-1。

表 1-1 紧凑型与常规型输电线路的自然输送功率和走廊宽度的比较

电压等级 (kV)	常规型输电线路		紧凑型输电线路	
	功率 (MW)	走廊宽度 (m)	功率 (MW)	走廊宽度 (m)
220	180 (100%)	26~38	300 (167%)	17~29
330	370 (100%)	38~45	550 (149%)	24~33
500	1000 (100%)	45~60	1370 (137%)	28~43

4. 多回路输电

多回路输电将多条线路共架在同一个铁塔上,以提高单位线路走廊的输送能力。在电厂出线端、换流站或变电站出入端以及线路走廊狭窄、土地有限等情况下,不同送电方向或者不同电压等级线路局部采用同一通道架设的同塔多回路输电,是解决线路走廊问题的有效技术。多回路输电线路设计主要解决以下问题:

(1) 导线的布置形式。导线的布置可采用水平、垂直和三角排列,杆塔的横担可以是 3 层、4 层和 6 层等,回路间可以是同相序、逆相序或异相序布置。与单回线路相比,同塔多回线路下的电磁场强度、无线电干扰、噪声等都有所增大。提高杆塔的高度虽然可以降低地面附近的电磁场强度和噪声,但会导致耐雷水平的下降。同塔多回线路的导线间距较小,相互之间的电磁和静电耦合较强,会使线路参数的不对称加大,造成线路的不平衡电流增大。因此,应综合考虑电压等级、回路数量、所处地理环境、气象条件的情况,对各种导线布置形式和相序排列方式,进行工频电磁场、无线电干扰、噪声、不平衡电流等的计算分析,通过比较确定最优导线布置形式。

(2) 耐雷水平和防雷措施。同塔多回线路的杆塔高,雷击的可能性增大。若遭雷击后多回线路同时跳闸,则后果更严重,因此应提高同塔多回路的耐雷水平。在进行塔头布置时,尽可能减少横担层数,降低塔高,减少雷击次数;减小地线保护角,降低绕击率;考虑加挂耦合地线、加装消雷器等防雷措施;采用平衡高绝缘,提高总体耐雷水平;同层横担不同回

路导线,采用不同类型绝缘子(串),即采用差异化绝缘,降低同时跳闸率。

(3)塔型规划与设计。多回路铁塔导线根数多,所受荷载大;导线截面、电压等级的不同组合,其荷载差异也很大,使铁塔在选型、断面选择、节点构造等方面的难度加大。通常多回路铁塔主材用单角钢已不能满足要求,需采用拼合角钢(双拼或四拼)或钢管。钢管断面中心轴对称,风阻系数较小,使得多回路钢管塔的应用越来越广。

5. 灵活交流输电

灵活交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)又称柔性交流输电,是基于电力电子技术,对交流输电系统实施灵活、快速调节控制的交流输电方式。它由美国 N. G. Hingorani 于 1986 年提出,是现代电力电子技术与电力系统相结合的产物。其主要思想是:采用具有单独或综合功能的电力电子装置,对输电系统的主要参数(如电压、相位差、电抗等)进行灵活快速的适时控制,以期实现较大范围地控制潮流,使输送功率合理分配;保证输电容量接近输电线路的热稳定极限,在控制区域内传输更多的功率,减少发电机的热备用;依靠限制短路和设备故障的影响来防止线路串级跳闸,阻尼电力系统振荡,大幅度提高系统的稳定性和可靠性;降低功率损耗和发电成本。目前已成功应用或正在研发的 FACTS 装置有十几种,主要是:

(1)静止无功补偿器(SVC)。SVC 使用晶闸管,快速调整并联电抗器的大小及投切电容器组,维护系统电压水平,消除电压闪变、平息系统振荡等。SVC 可以静态或动态地使电压保持在一定范围内,从而提高电力系统的稳定性。

(2)静止调相器(Statcon)。Statcon 由三相逆变器构成,整个装置的无功功率大小或极性均由通过它的电流来调整,其整体功能类似于同步调相机,可视为 SVC 的改进装置。但其调节无功的能力比 SVC 强,因为 Statcon 的输出无功取决于输出端的电流和电压乘积,而 SVC 的无功量由电压平方除以阻抗决定。因此,在发生事故、电压降低的情况下,Statcon 比 SVC 可提供更大的无功支持能力,具有一定的事故过载能力。

(3)超导蓄能器(SMES)。SMES 由电力电子器件(SCR 或 GTO 等)控制的一个大容量超导蓄能线圈组成,放电/充电的效率在 95% 以上,造价昂贵。作为蓄能器,SMES 可快速提供几秒的备用电力,瞬时产生同步或阻尼功率以提高输电的静态和暂态稳定性,提高远距离输电的输送能力,延长发电设备寿命,提供无功功率以改进电压稳定性,提高电压质量等。

(4)固态断路器(SSCB)。采用晶闸管型的断路器,只能在交流第一次过零时断开,其开断延时将达几毫秒。如果采用电力电子元件的固态断路器,则电流可瞬时被切断,效果将大为提高。美国生产的 SSCB 样机,已达到 15kV、600A,可在 $4\mu\text{s}$ 内完成开断。

(5)可控串联电容补偿(TCSC)。TCSC 具有潮流控制、阻尼线路功率振荡、提高暂态稳定性、抑制次同步振荡等功能。TCSC 可以连续改变线路电抗,因此可用来进行潮流控制,改变电网中的潮流分布。由于系统阻尼不足或由于系统大扰动引起低频功率振荡时,TCSC 可以阻尼线路功率振荡。在系统受到大的冲击时,TCSC 可迅速调整晶闸管的触发角,改变串联电容的补偿度,提高系统的暂态稳定性。当系统发生次同步振荡(SSR)时,TCSC 可迅速调整串联电容器容抗至最小值,呈现出感抗,从而对 SSR 起到很强的阻尼作用。

随着电力电子技术的飞速发展,灵活交流输电技术的发展前景不可估量。

6. 分频输电

分频输电系统(fractional frequency transmission system, FFTS)利用较低的频率(如