

[苏]Г.Н.亚历山大罗夫 等著



超高压 送电线路的设计

Г.Н.Александров, В.В.Ершенич, С.В.Крылоє,
Т.В.Лисочкина, Ю.И.Лысков, Б.П.Новгородцев,
И.М.Носов, М.Л.Фельдман
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
Ленинград ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ Ленинградское Отделение
1982

超高压送电线路的设计
(苏) Г.Н. 亚历山大罗夫 等著

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 15印张 330千字
1987年6月第一版 1987年6月北京第一次印刷
印数0001—6670册 定价3.05元
书号 15143·6234

内 容 提 要

本书叙述了交流超高压送电线路主要参数的选择问题，列出了导线和绝缘悬挂体系的选择和计算方法，阐明了超高压架空线路绝缘选择、线路的防雷保护、杆塔和基础结构的选择及其计算方法等问题。书中还介绍了提高架空送电线路额定电压的前景及保障生态安全的途径。

本书的主要读者对象是从事电力系统和设计部门工作的工程技术人员。也可供有关从事送电专业的施工、运行、科研人员及大专院校师生参考。

译 者 的 话



《超高压送电线路的设计》一书是近年来苏联在330~1150kV超高压线路设计和建设实践中的经验总结，是由从事设计和建设超高压线路的一些主要单位的有经验的专家们编写的。

本书详细叙述了超高压和特高压线路主要参数的选择问题，其中包括气象条件、内过电压、绝缘配合、电晕、金具连接、导线分裂根数及截面、杆塔和基础以及经济比较等。每一部分均有综合介绍、设计方法、规范标准和数据、计算公式。同时对提高送电线路额定电压的前景及保证生态安全等问题也进行了探讨。

本书是为适应我国超高压送电线路建设及发展的需要，由水电部电力规划设计院组织进行了翻译，以供我国从事电力系统和设计部门工作的有关工程技术人员参考。

本书由东北电力设计院同志分工译出：前言、序、第一、二、七章由倪宗德翻译，第三、四章由张洞明翻译，第五章由马绍驳翻译，第六章由汤伯兰翻译，第八章及附录由孙鼎翻译。全书由翁之盛校译及统稿。

水利电力部科学技术情报研究所胡维新对全书进行了审阅，并提出许多宝贵意见，特此表示感谢。

由于译校者水平有限，有错误和不当之处，欢迎读者不吝指正。

前 言(节译)

超高压架空送电线路的设计势必要解决许多问题, 这些问题的复杂性随着送电线路电压等级的增高而增加。属于这些问题的首先有: 线路相导线结构的选择, 绝缘子串结构和导线绝缘悬挂体系的选择, 绝缘距离的选择, 线路的防雷保护, 线路对生态安全的影响等等。这些问题是相互联系的, 将这些问题的研究和探索加以概括是合理的, 正如 H.A. 麦利尼科夫、C.C. 罗科强和 A.H. 石林蔡斯 在《330~500kV 架空送电线路电气部分设计》一书中所分析的那样。

设计超高压送电线路所要解决的问题的复杂性以及这些问题的特殊性, 要求对采用的任何一种解决办法作详细论证。由于这个原因, 作者从阐述超高压送电线路设计的科学根据的必要性出发, 来收集本书所需的资料。

为了能对各部分的阐述有权威性, 在作者成员中包括了积极从事超高压送电线路建设方面一些单位的专家。序和第一章由 B.B. 叶尔谢维奇编写, 第二章由 Ю.И. 雷斯科夫编写, 3-1 节由 Б.П. 诺夫戈罗德切夫编写, 3-2 节由 Г.Н. 亚历山大罗夫和 М.Л. 费利德曼编写, 3-3 节由 С.В. 克雷诺夫编写, 3-4 节由 Г.Н. 亚历山大罗夫编写, 3-5 节由 Ю.И. 雷斯科夫编写, 第四章由 Г.Н. 亚历山大罗夫、Т.В. 列索金娜和 Б.П. 诺夫戈罗德切夫(第 4-1 和 4-7 节)编写, 第五章由 Г.Н. 亚历山大罗夫和 М.Л. 费利德曼(第 5-6 节)编写, 第六章由 С.В. 克雷洛夫和 И.М. 诺索夫(6-5 节)编写, 第七

目 录

译者的话

前言 (节译)

绪论 1

第一章 超高压输电的接线、状态和输送能力 10

1-1 苏联统一电力系统及其发展远景 10

1-2 330~500kV电网的发展 15

1-3 750和1150kV电网的发展 17

1-4 1150kV以上电压等级的选择 21

1-5 超高压输电的状态 23

1-6 送电线路的输送能力和负荷及提高输送能力的措施 34

1-7 变电所的接线和主设备 39

第二章 内过电压和自动重合闸 44

2-1 总则 44

2-2 准稳态过电压 47

2-3 短时 (操作) 过电压 59

2-4 内过电压的限制 68

2-5 内过电压可能值的估计 84

2-6 三相和单相自动重合的保证 93

第三章 架空送电线路的运行条件 107

3-1 (气象条件、大气影响和降雨) 107

3-2 绝缘的污秽和受潮 113

3-3 架空送电线路导线的振荡 121

3-4 电晕放电、电晕损失和无线电干扰特性 129

3-5 超高压线路对生态的影响 139

第四章	超高压线路的导线	146
4-1	导线结构及其力学与电气特性	146
4-2	分裂导线及分裂导线线路的参数	153
4-3	分裂导线表面场强分布及起始电晕电压	166
4-4	按折算费用最小的标准选择导线和超高压线路的 经济参数	173
4-5	相导线的最优结构	186
4-6	超高压架空线路导线在空间的最优布置及最优的 导线分裂半径	189
4-7	导线和地线的力学计算及经济档距的选择	194
第五章	超高压架空线路的绝缘	207
5-1	架空线路的绝缘类别、线路绝缘子及其特性	207
5-2	超高压架空线路绝缘子串的电压分布和根据电气条 件选择金具	220
5-3	工作电压下绝缘子串的电气特性及根据安全运行 条件选择绝缘子串的方法	239
5-4	在工频电压及过电压作用下超高压架空线路空气 间隙的电气强度特性	244
5-5	按工作可靠、运行及线下通行安全等条件选择超 高压架空线路的绝缘	263
5-6	雷击时超高压架空线路绝缘上的过电压	272
第六章	导线绝缘悬挂体系及结构问题	281
6-1	导线绝缘悬挂体系的结构方案	281
6-2	直线杆塔分裂导线悬挂体系的稳定性	287
6-3	导线绝缘悬挂体系的可靠性	298
6-4	绝缘子串的结构及其在正常和事故状态下的工作条件	302
6-5	悬挂分裂导线用的悬垂线夹及悬挂装置	316
6-6	金具重量和导线结构及分裂半径的关系	331
6-7	耐张转角塔的引流跳线	338

6-8	导线振动的防护方法	349
第七章	架空线路的结构部分	364
7-1	杆塔计算方案和计算荷载	364
7-2	铁塔、钢筋混凝土杆及基础结构	371
7-3	杆塔计算方法	387
7-4	杆塔在土壤中固定的计算	392
7-5	特殊型式的杆塔	399
第八章	超高压送电线路的技术经济指标及其参数	
	优选	402
8-1	架空送电线路参数优选的判据和方法	402
8-2	超高压输电的技术经济指标	408
8-3	架空送电线路额定电压和回路数的选择	429
附录 1	苏联一些平原地区各种天气持续时间(五年平均值)	440
附录 2	使用于超高压线路的钢芯铝绞线(ГОСТ-839-80)的主要计算数据	444
附录 3	导线空间最优排列计算程序框图	445
附录 4	线夹结构对绝缘子串电压分布影响的计算	447
附录 5	第一类 $K(k)$ 和第二类 $E(k)$ ($k = \cos \alpha$) 全椭圆积分	451
附录 6	选择电网绝缘的统计法原理	453
附录 7	随机变量正态分布函数	463
	参考文献	464

绪 论

电力系统及其联网的发展与掌握更高等级的输电电压密切相关。在这里输电这个术语是输送电能的线路、终端和中间变电所、开关站和补偿站的总称。

按照全俄电气化委员会的计划，苏联在二十年代开始了电厂联网并建设第一批电力系统（文献89）。全俄电气化委员会的计划规定建设大型电厂和电网集中供电，并不断地把这些电厂连接到区域和区域间电力系统中。苏联的第一批电力系统是利用以110kV电压的送电线路为基础建设起来的。这级电压的第一条送电线路在1922年投入运行，用于输送同年在莫斯科首先投运的卡希拉区域发电厂的电能。

到二十年代末，用于将电厂能量输给用户并使电厂并列运行的110kV线路的长度约为1000km。

到1935年，苏联已有六个年发电量各超过十亿kW·h（度）的电力系统投入运行。其中莫斯科系统约四十亿kW·h（度），列宁格勒、顿巴斯和第聂伯系统大于二十亿kW·h。这时110kV电网线路长度增长到差不多2000km。莫斯科系统的容量达900MW，列宁格勒系统达650MW。

为了输送开始发电的第聂伯水电厂的电能，掌握了用154kV电压输电的技术。

220kV电压级的输电与下述电力系统发展阶段有关：把电网与邻近的电力系统联合起来出现了第一批联合系统。在1933年为了将下斯维尔斯克电厂的功率（100MW）输送到列宁格勒，建设了全苏第一条220kV线路，长240km。实行

俄罗斯电气化计划经过二十年，建成了连接南部两个最大电力系统的第聂伯—顿巴斯220kV送电线路后，在1940年，创立了苏联第一个有统一调度机构的联合电力系统。不久，还有一个为罗斯托夫区域国民经济服务的大电力系统接入这个联合电力系统。

到1940年底，220kV电网的线路长度达1107km。在1942年，为了有效的管理用220kV线路连接起来的斯维尔德洛夫斯克、切利亚宾斯克和佩尔姆斯克三个并列运行的电力系统，建立了乌拉尔联合调度局。这个调度局给乌拉尔联合电力系统打下了基础。

在1945年，为了管理莫斯科电力系统和同样利用220kV输电的上伏尔加河三个电力系统（雅罗斯拉夫尔、伊凡诺沃和高尔科夫）的并列运行，组织了中央联合调度局。

在1956~1959年期间，苏联第一批500kV超高压远距离输电工程：古比雪夫—莫斯科、古比雪夫—乌拉尔（最初设计和初期运行的线路电压是400kV）和伏尔加格勒—莫斯科线路投入运行。这就保证了中部、乌拉尔、中伏尔加河流域和下伏尔加河流域系统的联合。这个期间应看作是形成国家统一电力系统的第一阶段。

大约在上述同一时期开始发展330kV电网。五十年代末期，在第聂伯电力系统投运了第一批330kV线路，这是苏联南部和西部地区强化普及这级电压网络的开端，在此之前这些地区形成了110(150)kV电网。在苏联南部地区，然后在西部地区采用330kV电网，加速了在这个领域内形成能源联合的进程。330kV送电线路开始成为南部和西北部联合电力系统中的骨干电网。此后外高加索和许多北高加索电力系统也用这一级电压联合。

同时西北联合电力系统接入统一电力系统也采用330kV电压。

过去和现在均以广泛使用500kV输电为基础形成苏联统一电力系统和加强苏联东部系统之间的联系。

1978年初，鲁勃佐夫斯克—巴尔瑙尔500kV输电工程的投运是实现苏联统一电力系统走向完成的重要阶段—大型联合电力系统之一的西伯利亚联合系统接到统一电力系统。此时，苏联统一电力系统发电量的比重由70%增加到90%。

在孤立运行的中亚细亚联合系统中建立了500kV电网，为了将它连接到苏联统一电力系统，设计了500kV输电工程，在远东联合电力系统中建立了第一条500kV线路。

750kV电压于1974~1976年开始采用，而且已与新区域接入苏联统一电力系统无关。这级电压输电的任务是：加强统一电力系统西部区域的主网以便更全面实现电力系统并列运行的效益和输出原子能电厂单台容量为1000~1500MW的功率。

在第11个五年计划开始时，苏联超高压线路的长度约53000km，其中330kV为24000km，400~500kV为26000km，750kV为2900km。

为了大大加强苏联统一电力系统东部地区区域间极脆弱和长距离的联系，输送埃基巴斯图兹和坎斯—阿钦斯克煤电联合企业的大容量电厂的功率，已着手1150kV输电工程的建设工作，并对更高电压1500~2500kV输电建设的技术可能性和经济合理性进行研究。

在国外和苏联一样，保证由大电力系统向工业和居民区集中供电，发挥各类电厂并列运行在技术经济上的优越性，是电力部门公认的原则。在八十年代初，世界各国几乎有90%的

电厂容量集中在完全形成的国家电力系统中，这些系统实际上包括了所在国家全部适于居住的领土，如美国、日本、加拿大和欧洲国家。建立巨大的国家间联合电力系统的有：北美、西欧、东欧，其容量以几亿 kW 计。在世界的其它地区，形成国家电力系统和国家间联合电力系统的积极过程正在进行（文献62）。电力系统间和电力系统内各个枢纽间联络线的数量和输送能力继续增大，并且不同电压的联络线往往并列运行。更高电压电网继续加入现有电网的过程，不局限于掌握 765~800kV 电压设备，而还要建立试验装置和着手建设 1000~1200kV 电压的工业性输电，以及开展研制更高电压的交流设备的科学研究工作。

为了扩大直流输电的使用范围，需提高直流输电的额定电压和输送能力。在电力系统中利用直流输电的主要方面是：远距离电力的输送，具有不同额定频率电力系统间和频率相同但具有不同调整方法的电力系统间的联系（插入直流或零长度的线路），将线路深入到大城市和跨越海峡。鉴于变电所的整流器的工作状态有无惯性调节的可能性，研究了利用直流输电来提高交流电网控制能力的问题。现有直流输电的最高额定电压是 500kV，最大输送能力大约是 2000MW。应该提出，虽然有些专家对建立直流电网的技术可能性有许多乐观的声明，但直到目前为止仅建设了只有两个终端变电所的直流输电工程。

电力生产继续在集中。世界上容量最大的各类电厂是：美国的大古力水电厂，容量为 6200MW；日本的福岛原子能电厂，容量为 4700MW；日本的鹿岛火电厂，容量为 4400MW。

随着系统元件的合并，加剧了由于元件切除引起的扰

动。这使事故后的状态和暂态过程加剧，使串级切除几个元件的概率提高。因此关于电力系统及其各个元件（包括超高压输电）的可靠性，是重要的问题。

要求限制带电物体对周围环境有害影响的呼声越来越高，这对电力系统发展有重要影响，提高了对电厂的生态要求。首先必须压缩电厂的占地面积，使电厂布局复杂化；其次造成电厂远离用电中心。这个结果同样也使超高压线路建设数量增多。由此得出新的技术方案：广泛普及多回路送电线路（同塔架设不同电压的四至六回路），研究提高架空线路的输送能力，采用六氟化硫绝缘设备，扩大高压电缆的应用。这就明显改变了电网设施的造价指标及其造价构成，并对电网结构发生直接影响。例如扩大电缆的应用，作为电力系统主网的元件，由于电缆电感很小和电容很大，要求补充装设并联电抗器，采取限制短路电流的措施，装设横向调压装置，以保证电缆和架空线路间潮流达到可以接受的分配。

各大洲超高压输电的情况介绍如下。

西欧各国电力系统总装机容量为4.5亿kW，遍布各国的所有领土，并以作为最高额定电压的400kV电网并列运行。发电容量构成的显著差别决定了建立国家间电网联络的合理性，联络线交换总发电量的5~6%，因相对距离不大，不需采用高于400kV的电压连网。虽然为满足国家电力系统内的需要以及为了加强国家电力系统间联络，在许多国家（例如法国、意大利、西德、瑞典）早已研究采用750和1200kV电压等级的合理性问题，但引入更高一级额定电压的前景直到目前为止仍不明确。

东欧国家（经互会成员国）电力系统组成“和平”联合电力系统并列运行，由位于布拉格的中心调度局执行总的调

度。1981年初欧洲国家——经互会成员国（除苏联外）和南斯拉夫——电厂的总容量约大于1亿kW，近年来总的能量交换约为总容量的5~6%（苏联统一电力系统欧洲部分电厂的容量大于1.7亿kW）。在1978年，为了加强现有苏联统一电力系统220和400kV电压网与其它国家（经互会成员国）间的联系，建设了苏联—匈牙利国家间的750kV线路；设计了苏联—波兰和苏联—罗马尼亚—保加利亚的750kV线路；按照专门完成的研究共同决定，将750kV电压作为所有欧洲国家（经互会成员国）电力系统的下一个电压等级。

亚洲（不包括苏联）电厂的总容量大约2.8亿kW，其中大约有一半在日本电力系统，值得提醒的是日本的发电量在美国和苏联之后居世界第三位。苏联亚洲部分电力系统的容量为8千万kW。在日本，尽管岛屿间有很宽海峡，而且东部（包括东京）电力系统频率为50Hz，而其余系统为60Hz，但是不久前完成了联合各个电力系统（日本有九个大电力公司）为国家统一电力系统。为了这些区域的联络，建设了输送能力各为300MW的两个直流输电工程。主网最高电压等级是500kV。鉴于新线路路径特别困难，日本专家除了研究采用高压电缆和提高500kV线路的输送能力（用耐热导线）以提高所占走廊的利用之外，还进一步研究掌握1000kV的输电技术。亚洲大陆的发电装机容量（不包括苏联）大约30%在中国和印度；还有约10%集中在南朝鲜、朝鲜民主主义人民共和国、伊朗、土耳其和菲律宾五个国家，电站容量分别从400~800万kW。剩下10%在其他国家。

亚洲的印度、土耳其、伊拉克和伊朗等许多国家采用400kV电网。巴基斯坦和中国开始建设500kV电网；还有一些330kV线路。

美国的电力工业决定了整个北美洲动力经济，其电能生产是世界上最大的，它是由分布在整个国家的各个电力系统组成，装机总容量超过6亿kW。目前组成电力系统的主要是345和500kV电网。过去的十年期间在最高电压为345kV的地区，建设了一些750kV线路。在最高电压为500kV的地区，建设电压为1200kV输电的工作正在进行。在美国北部与加拿大有强大的电力联系，包括几条通过东部边境的750kV线路和几条通过西部边境的500kV线路。

美国南部与墨西哥有电力联系。墨西哥的装机容量比美国小得多，小于2000万kW。

加拿大电厂的装机容量大约是8000万kW，并且主要集中在国家南部，在其东部区域有发达的750kV电网，在西部区域有500kV电网。依据输送圣劳伦斯河上梯级水电厂容量和世界上最大水电厂之一（容量为520万kW）的丘吉尔河上丘吉尔瀑布水电厂电能以及向美国输出电能的条件，决定了加拿大750kV电网的发展。500kV电网连接大电厂和西部各省工业区的用电枢纽。

墨西哥的主网电压为400kV。

南美洲运行电厂的总容量约6000万kW。电网最高电压是500kV（巴西和阿根廷），委内瑞拉采用400kV；在巴西，为了输送伊泰普大型水电厂1260万kW的功率，正在建设800kV线路。

非洲发电厂的总容量大约4000万kW以上，其中几乎有一半集中在南非共和国，10%多一些在埃及。虽然电力容量集中在不大的范围内，且其布置很不均衡，但非洲电力系统广泛采用的最高额定电压为：埃及为500kV，南非共和国为400kV，尼日利亚、赞比亚和津巴布韦为330kV。

澳洲电厂的总容量接近2500万kW。发展330kV(代替现在采用的275kV电网)和500kV超高压电网,分布在相对不大的澳洲南部地区,这些地区集中了大部分居民和工业。

到1979年初,全世界超高压架空送电线路的总长度大约30万km,见表B-1。

表 B-1

国 名	线路长度 (km)	国 名	线路长度 (km)	国 名	线路长度 (km)
315~345kV线路		丹 麦	550	瑞 典	8500
巴 西	6200	西 班 牙	5900	南斯拉夫	2800
加 拿 大	10000	意 大 利	4400	500kV线路	
中 国	540	印 度	1500	巴 西	3100
苏 联	22400	墨 西 哥	3700	埃 及	1600
美 国	50400	荷 兰	900	加 拿 大	5000
380~400kV线路		挪 威	600	苏 联	23200
奥 地 利	600	葡 萄 牙	450	美 国	24000
英 国	9300	苏 联	550	日 本	2500
保加利亚	600	土 耳 其	3400	750~800kV线路	
巴 西	3200	芬 兰	3000	匈 牙 利	270
匈 牙 利	900	法 国	8200	加 拿 大	6100
民主德国	3400	西 德	7300	苏 联	1950
希 腊	900	瑞 士	1100	美 国	2500

研究上述在苏联和全世界电力系统发展的趋势表明,超高压输电的作用变得极为重要,其建设规模将要增大。超高压输电兴建速度将高于较低电压的电网。在苏联,近十年期间35~220kV电压网的长度增加70%,而在此期间330~750kV电压网的长度几乎增加了1倍。

超高压电网的迅速发展,自然就导致采用各种各样的技

术方案。同时应该注意到超高压输电固有的特性，即在设计时解决超高压输电结构和接线问题是极为复杂的。另一方面，超高压输电很高的造价和由于路径选择条件的复杂化而造价有明显上涨的倾向，因此要求深入地研究各种技术方案和探索新的、更经济的结构。