

超高压架空线路 机械部分设计

〔苏〕А. С. 泽利琴科
Б. И. 斯米尔诺夫



译 者 的 话

《超高压架空线路机械部分设计》一书是近年来苏联在330~1150kV超高压架空线路建设实践中的经验总结；是在输电线路设计和运行方面具有多年实践经验的、苏联电网设计院的主要专家们编写的。

本书较系统完整地论述了超高压架空线路机械部分设计中的一些主要问题，并详细地介绍了在具体工程中解决这些问题的实用方法，列出了不少有关规范标准数据；还研究分析了超高压架空线路运行的可靠性及其对环境的影响。为适应我国超高压架空线路建设日益发展的需要，电力规划设计院组织进行了翻译，供我国从事线路设计、安装和运行等工作人员参考。

本书由西北电力设计院的同志分工译出：第一、二、三、九章由李广泽翻译；第四、五、八章由叶大斌翻译；第六、七章由冯金耀翻译；第十、十一章由陈巧义翻译。全书由朱树德审核，李广泽统稿整理。华北电力设计院吕全本对全书作了校订。

由于译者水平所限，有错误或不当之处，欢迎读者指正。

译 者

1985.8.14

前 言 (节译)

火力、水力和原子能发电厂的容量增大到4000~6000 MW及以上,这是现代电力事业发展的标志,建立苏联统一电力系统的工作正在继续进行。同时,还在建立包括苏联和欧洲经互会成员国在内的国际联合电力系统。

广泛地建设330kV及以上的超高压线路,对建立联合电力系统具有重要作用。

苏联在世界上首先建成并投入了电压为500kV的交流输电线路(1959年)和电压为800(± 400)kV的直流输电线路(1962年)。

目前苏联已在330~750kV输电线路的设计、施工和运行方面积累了大量的经验,并正在进行西伯利亚—哈萨克—乌拉尔第一条1150kV交流输电线路和埃基巴图兹—俄罗斯中部的第一条1500kV直流输电线路的设计和施工。

在一些主要科研、设计、施工及运行单位的共同努力下,苏联在发展远距离超高压输电方面取得了巨大成就。在这些单位多年理论及试验研究、设计以及施工、调试和运行经验的基础上,有关建设超高压输电线路的所有主要问题均得到解决。

本书的写作目的,是向读者介绍超高压架空线路设计的主要问题。

1974年, H·A·米里尼科夫、C·C·罗克强和 A·H·舍连齐斯等著《330~500kV 架空输电线路电气部分的设计》一

书的第二版问世，其中介绍了超高压线路的电气计算问题。而在本书中，作者的首要目的，主要是尽量使超高压输电线路机械部分设计的问题系统化。关于电气参数的研究，只限于为论证和理解线路各元件的结构方案所必需的程度。

本书的独特之处，是研究了超高压架空线路对环境的影响以及超高压线路各个元件的新颖结构。

凡不属于超高压线路所特有的架空线路机械部分设计的问题，作者在本书中未作深入探讨，仅酌情援引了已版书刊。

作者

1981

目 录

译者的话

前 言

第一章 超高压线路的发展	1
1-1 概论	1
1-2 试验基地	8
第二章 一般要求和设计标准	15
2-1 标准概要	15
2-2 超高压架空线路通过非居民区和居民区	16
2-3 输电线路的相互交叉和接近	21
2-4 超高压线路同铁路交叉和接近	24
2-5 超高压线路同公路交叉和接近	27
2-6 超高压线路沿堤坝通过	29
2-7 超高压线路同管道或索道交叉和接近	29
2-8 对超高压线路的其它标准要求	32
2-9 设计程序	33
第三章 路径选择和气象条件的确定	37
3-1 路径选择	37
3-2 气象条件	40
第四章 相分裂结构及避雷线的选择	53
4-1 相分裂方案的选择及其技术经济比较方法	53
4-2 直流线路电极结构方案选择的特点	73
4-3 导线合理结构的选择及相分裂导线机械计算问题	80
4-4 分裂导线在档距中的固定和间隔棒及其结构	83

4-5	避雷线型号及截面的选择	87
4-6	大跨越导线和避雷线的型式及其结构选择的特点	94
4-7	导线与避雷线的动态问题	96
第五章	绝缘子串和避雷线悬挂方式的选择	108
5-1	绝缘子型式及结构的选择	108
5-2	悬垂线夹选型的论证	123
5-3	悬垂和耐张绝缘子串的结构和组装	125
5-4	避雷线及其在档距中央交叉时插接绝缘子的悬挂 方式	148
5-5	悬垂及耐张绝缘子串和避雷线绝缘子的保护 间隙	152
第六章	杆塔的外部荷载及其间隙尺寸的确定	155
6-1	各种杆塔的计算方式	155
6-2	选择杆塔经济高度和结构的技术经济计算	156
6-3	导线、避雷线及杆塔构件上覆冰和风荷载的确定	161
6-4	杆塔间隙尺寸计算中导线、避雷线及绝缘子串的 偏移	175
6-5	耐张杆塔及换位杆塔上跳线的连接方式	185
第七章	杆塔结构与基础	198
7-1	杆塔与基础的型式及特点	198
7-2	跨越杆塔和基础结构	217
7-3	各种类型杆塔的应用范围——自立式杆塔和拉线 杆塔	222
第八章	防雷保护和接地装置	226
8-1	雷电过电压的防护措施与避雷线的最佳保护角	226
8-2	避雷线接地方式和火花间隙的选择	234
8-3	杆塔接地装置的结构及其选择	246
第九章	输电线路运行可靠性的几个问题	262
9-1	超高压架空线路的可靠性	262

9-2	运行经验总结	264
9-3	覆冰及风荷载情况下线路运行的可靠性	274
9-4	线路在纵向荷载作用下的稳定性	277
9-5	线路可靠性的评价	289
第十章	架空线路对环境的影响	297
10-1	概述	297
10-2	征用土地	298
10-3	线路对环境的影响	302
10-4	电场的影响	310
10-5	可听噪音和无线电干扰	330
10-6	臭氧和氧化氮的分离	336
第十一章	技术经济指标	338
11-1	主要单位指标	338
11-2	设备与材料的耗量	347
11-3	施工费用	351
	参考文献	356

第一章 超高压线路的发展

1-1 概 论

发电厂和整个电力系统容量的增大以及联合电力系统的建立，使输电线路功率潮流增大，也使这些线路的长度增加。所有这一切导致架空输电线路的额定电压必须提高。

五十年代初期，许多国家都开始建设超高压架空输电线路。

在苏联，330kV及以上的电网属于超高压电网，而在其它国家，275kV及以上的电网即属于超高压电网，1000kV及以上的电网通常称为特高压电网。

早在三十年代，美国就已建设了胡佛顿—洛杉矶的287kV线路，在1952年瑞典建设了卡尔斯帕伦盖特—赫尔辛堡第一条380kV线路，而到1953年美国开始建设330~345kV架空线路。1956年，苏联古比雪夫—莫斯科的两条400kV单回线路首次投入运行，线路长度分别为812和890km，而1959~1961年，居世界第一位的两条500kV单回线路—伏尔加格勒（斯大林格勒）—莫斯科线路投入运行，线路长度约各为1000km。美国、加拿大和日本的第一条500kV线路于1964~1967年期间先后投入运行。在1965~1966年，加拿大麦尼夸根—蒙特利尔的735kV架空线路首次投入运行；1967年，科纳科夫—莫斯科的苏联第一条750kV工业性试验线路投入运行，而到1969年，美国第一条765kV线路投入运行，长度为110km。

在最近十至十五年期间，苏联电力发展中的一个明显的趋势，就是大力建设高压电网。在图 1-1 中介绍了苏联超高压输电线路长度的增长情况（文献 1、2）。截止到1980年1月1日，已有35kV及以上架空线路的总长度约为74000 km，其中包括330kV及以上架空输电线路52000km（或者是35kV及以上架空输电线路总长度的7%左右，而1960年约5.5%）。到1985年和1990年，苏联超高压架空线路的比重将会更高。

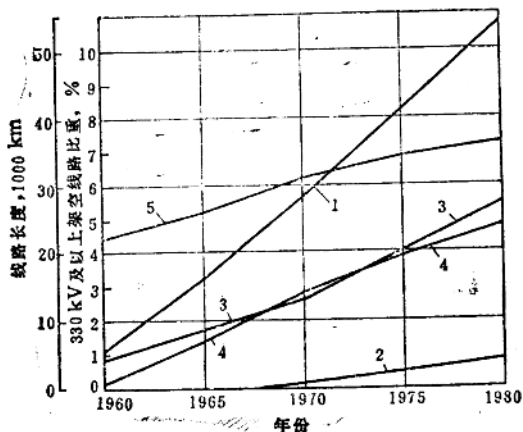


图 1-1 苏联超高压输电线路长度的增长情况

1—330kV及以上架空输电线路；2—750kV架空输电线路；3—400~500kV架空输电线路；4—330kV架空输电线路；5—330kV及以上架空输电线路与35kV及以上所有架空输电线路的长度之比

如果说在苏联联合电力系统发展的最初阶段，330~500 kV架空线路主要是为了送出大型水电厂及火电厂的电能而作为独立的输电工程来建设的，那么现在，则已发展到在西

北地区、乌克兰、白俄罗斯和南方地区建立330kV网络和苏联其它地区建立500kV网络的阶段。在苏联国内，400kV输电线路的长度非常有限，这些线路均接入经互会成员国的国际联合电力系统—苏联、匈牙利、捷克斯洛伐克、罗马尼亚和保加利亚的“和平”电力系统。

在苏联欧洲部分统一电力系统中，系统间交换功率已增加到1500~2500MW，这就要求向更高一级电压过渡并建立750kV网络。在330kV网络的基础上建立750kV网络，这在经济上来说是合理的。

在科纳科夫—莫斯科的第一条750kV工业性试验线路设计和施工经验的基础上，于1971~1973年期间建立了苏联顿巴斯—第聂伯河—文尼察的第一条750kV工业输电线路，该线路长度约为750km。这条线路从东到西穿过乌克兰加盟共和国，将5个区域电力系统联为一体。这条输电线路的下一段工程，文尼察—西部乌克兰变电所线路段已经建成。然后进入匈牙利，连接阿里拜尔契什的750kV变电所，这就保证了苏联电力系统同经互会成员国“和平”联合电力系统的可靠联系。

1975年建成了科纳科夫—列宁格勒750kV架空输电线路，长为525km，这条线路保证并加强了俄罗斯中部和西北联合电力系统间的电气联系。现在苏联正在设计和建设更多的750kV架空输电线路，例如：库尔斯克原子能发电厂—钢铁公司；库尔斯克原子能发电厂—勃良斯克，勃良斯克—斯摩棱斯克原子能发电厂，契尔诺贝尔原子能发电厂—西乌克兰，列宁格勒原子能发电厂—列宁格勒，还有许多其它线路，在此不再一一列举。

为了加强电气联系，在苏联东部地区和乌拉尔，除了

500kV架空线路以外，还必须建设1150kV特高压线路。现在正在建设从伊塔特国营区域电厂至诺沃库兹涅茨克，长272km的第一条1150kV工业性试验线路和由埃基巴斯图兹国营区域电厂至乌拉尔的工业线路，这些线路首段输送能力达5000~5500MW。

在采用铁塔建设超高压架空输电线路的同时，苏联在世界上首先推广采用离心式钢筋混凝土杆建设330~500kV架空输电线路。例如，1975年采用钢筋混凝土杆的，在330kV架空输电线路中已达65%，在400~500kV架空输电线路中也有6%。现在采用钢筋混凝土杆的330~500kV线路的比重不断增长，这样就可以节约大量的钢材。

应当指出，在西欧、美国、加拿大、日本及其它国家，也在极力发展超高压电网。

在西欧建立了400kV电压的网络，这些网络不仅用来保证在各个国家的范围内输送电能，而且可用于保证不同国家系统间的联系，从而达到既能节约投资，又能增加对用户供电的可靠性。在法国正在进行向735kV电压过渡的研究和设计工作，其中正在设计的新的双回400kV线路，将来可以升压到750kV。在英国、西德、瑞士和意大利也在进行建立750kV网络的研究工作。在埃及，阿斯旺—开罗的两回500kV输电线路已投入运行，长度各为800km。日本在东京周围建立了采用双回路杆塔的500kV环形线路。但是，设计和建设超高压线路最快的是苏联、美国和加拿大三国。其特点是，这些国家的电力系统所包括的范围很大，并具有超高压输电线路的分支结构。例如，在美国，1970年运行中的500kV输电线路长达12000km，1975年已达到22000km。1975年，仅在美国电力公司电力系统建设的765kV线路的总长度

就为1850km；加拿大1975年735kV架空输电线路的长度约为6000km。

建设超高压线路的还有非洲的发展中国家：赞比亚、扎伊尔（330kV），南非共和国（257~300kV），澳大利亚（275、330及500kV）；南美洲的巴西（330kV及500kV），墨西哥（400kV），阿根廷（500kV）等诸国。

所有上述线路，都是以交流运行的输电线路。在许多国家还在进行建立直流输电线路的工作。在输送功率相等的条件下，同交流线路比较，直流输电线路需要的投资较少，每公里架空输电线路主要材料耗量的单位技术经济指标大大提高，线路的走廊宽度也较小。因此，随着换流技术的不断完善和换流站造价的降低，直流超高压输电线路必将获得更加广泛的应用。

1962年苏联建设了伏尔加格勒（斯大林格勒）—顿巴斯国内第一条800（±400）kV超高压工业性试验线路，长473km，设计输送功率为720MW。该线路于1965年以额定参数投入运行。现在苏联正在进行埃基巴斯图兹—俄罗斯中部长2414km的1500（±750）kV超远距离直流输电工程的设计和建设。这条输电线路的输送功率为6000MW。

美国第一条800（±400）kV直流超高压架空线路于1970年投入运行。这条线路的长度约为1410km，而输送功率为1440MW。

1977年美国投入一条电压为500（±250）kV的直流输电线路，额定电流为1000A，长度为734km，用于送出建设在北达科他的火力发电厂的电力。建设在该地区的另一条直流线路，电压为±400kV，额定电流为2500A。目前加拿大有5条直流架空输电线路在运行。美国正在运行和建设的直流

线路有 5 条，还有几条线路正在设计中。超高压直流线路在新西兰、西欧、南非、日本及其它国家也已投入运行。

在文献 4 中，对许多国家的超高压输电线路的长度作了介绍。

在很多人口稠密的国家和地区，为发展超高压架空输电线路及向更高一级电压过渡，还要用很高的代价征购建设新线路的用地。在国际大电网会议资料中，载有架空线路路径每米宽度的单位输送功率指标 (MW/m)。当电压从 $420kV$ 向 $765kV$ 和从 $765kV$ 向 $1050kV$ 过渡时，该指标大致增加一倍，可达 $100MW/m$ 左右。

现将超高压及特高压架空输电线路的主要特点归纳如下：

- (1) 架空线路导线至杆塔构件及地面的距离较大；
- (2) 绝缘子串较长，线路金具零件必须是防电晕的；
- (3) 架空输电线路的所有元件，都要求有更高的可靠性；
- (4) 通过采用相分裂导线的办法，限制电晕损失、无线电干扰及可听噪音；
- (5) 在风及覆冰的动力作用下，超高压架空线路的相分裂导线要求特定的运行条件；
- (6) 在导线附近及线路路径上的电场强度相当高；
- (7) 在长距离超高压架空输电电路上必须开通大量的高频通道。

这些特点，对超高压架空输电线路所有元件均有重要影响。按承受工作电压及操作过电压条件决定的最小绝缘距离较大，且绝缘子串较长，使得杆塔上部变重，横担长度及直线杆塔高度增加。这些线路在联合电力系统中输送功率较大，

起着非常重要的作用。因此，要求线路结构元件（杆塔、基础、导线和避雷线、绝缘子串和金具等）具有较高的可靠性和稳定性。为保证必要的可靠性，其主要的途径是：对于保证性要求较高的外部荷载的论证及施工质量，要比较低电压的架空线路提出更高的要求。对于线路各个元件（绝缘子、金具），其更高的可靠性，要以较高的连续运行概率(0.998~0.999)来保证。

为了限制电晕损失、无线电干扰和可听噪音，当选择相的结构和相间距离时，必须保证导线、避雷线有最佳的数目、直径和截面。

为了限制在线路路径范围以内的电场强度，就必增加导线对地距离、杆塔高度，并在超高压架空输电线路防护区内采取一系列限制措施，以保证人畜的安全。由于超高压架空输电线路系统间的特点以及这些线路相当长，所以必须沿线路开通大量高频通信通道及遥测遥控通道。这些通道的建立，除了利用苏联邮电部无线电通信线路外，要求在许多线路上应用相互绝缘的相导线（330及500kV架空线路），以及采用单根的或分裂（分成两根）的良导体避雷线。

因此，超高压架空线路机械部分的设计应与线路的电气参数紧密联系。这些参数一方面在很大程度上决定了架空线路所有元件的结构选择；另一方面其本身又在很大程度上取决于所采用的杆塔、分裂导线及避雷线的结构方案和它们相互之间的布置，绝缘子串的组成以及单片绝缘子和金具的型式。同较低电压的架空线路比较，超高压及特高压架空线路设计的主要不同点就在于此。因此，当选择杆塔、相导线和避雷线的结构方案及其相互之间的布置、绝缘子串组成及绝缘子的型式时，总是应当估计到这些或那些结构方案对超

高压架空线路电气参数的影响。

1-2 试 验 基 地

为了顺利地解决在超高压线路设计、施工及运行中所发生的各种问题，无论在苏联或其它国家都建立并投入了进行科学研究及试验工作的综合设施。

苏联于1971~1973年，在莫斯科附近的白拉斯特750kV变电所，建立了综合试验装置。这套综合装置，包括有长1.2km的交流1150kV架空线路试验线段和长2.4km的直流1500(±750)kV架空线路的试验线段。在1150kV架空线路试验线段上，装有两基三柱式耐张终端塔和三基“酒杯”型自立式直线塔(图1-2, a)。直线塔的结构，允许改变悬垂绝缘子串的固定位置，也允许改变绝缘子串本身组装方式和结构，以此来改变相间距离、导线和避雷线间的距离以及导线对地距离。直线塔横担对地高度为35m，相间距离由21.4至26.3m，塔的重量为33t。三柱式耐张型终端塔本体为三个单独的锥形柱，导线挂线高度为20m，终端塔的重量为42.5t。

在该试验线段不同相上悬挂有不同结构的导线，每一相由8根导线组成，导线沿直径为1200mm的圆周布置，相邻分裂导线间的距离为400mm，在三相中的每一相上，分别悬挂AC-300/39，AC-400/22及A-400型导线。各相导线使用单链及双链绝缘子串悬挂在直线塔上。绝缘子串构成为： $1 \times 45 \times \text{ПC}-400$ ， $1 \times 50 \times \text{ПC}-300$ ， $2 \times 50 \times \text{ПC}-160 + 2 \times 3 \text{ПC}-400$ 及 $1 \times 47 \times \text{ПC}-300 + 2 \times 3 \text{ПC}-300$ 。属后一种结构方案的单链绝缘子串下部(靠近导线)设有分挂，此分挂部分由两串构成，每串由三个ПC-30型绝缘子组成。

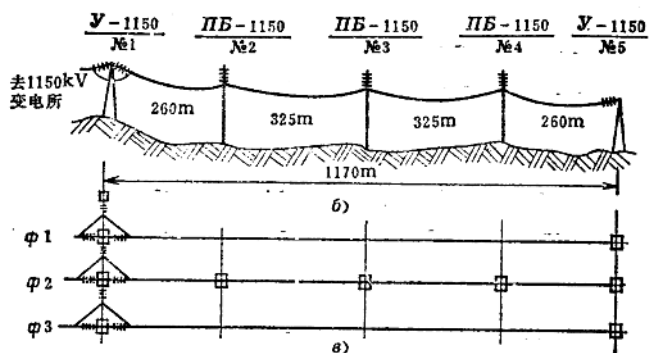
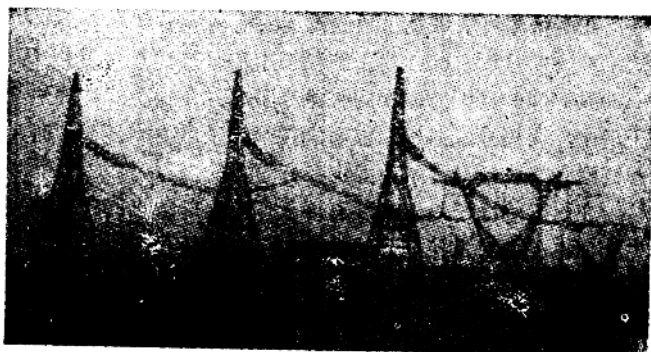


图 1-2 白拉斯特1150kV架空输电线路试验线段
 a) 试验线段概貌; б) 试验线段断面图; в) 试验线段平面图

这种考虑方法是为了降低最靠近相导线的几片绝缘子上承受的电压。悬垂线夹采用框架式结构，导线紧紧地固定在线夹中。在不同方案中，悬垂绝缘子串的长度在10.5~11.0 m之间，

在耐张型终端塔上，导线的固定有两种方案：利用八链式（ $8 \times 53 \times \text{ΠC}-160$ ）耐张绝缘子串和四链式（ $4 \times 45 \times \text{ΠC}-400$ 及 $4 \times 50 \times \text{ΠC}-300$ ）耐张绝缘子串。在这种四链式绝缘子串中，两根导线通过联板固定在绝缘子串的一链上，而每一链耐张绝缘子都是单独固定在杆塔上的。

在耐张绝缘子串上安装有屏蔽环，用以防止线路金具发生全面电晕并对最接近导线的绝缘子起均压作用。

在档距中，相分裂导线彼此间利用不同结构的固定型和释放型间隔棒（分别适用于8根、4根和2根分裂导线）固定。而在耐张塔的跳线中安装了8根分裂导线用的放射式固定间隔棒。两相跳线借助于固定在相邻塔柱上的耐张绝缘子串绕过塔身，而第三相的跳线则引向高16m的第四个轻型辅助塔柱。避雷线则采用AC-70/72型钢芯铝线。

图1-2,6为1150kV架空输电线路试验线段示意图，表1-1中列有杆塔、导线及绝缘子串的特性。

上述白拉斯特1150kV架空线路试验线段的结构，可用于在最接近实际条件和工作电压长期作用下（此工作电压由白拉斯特变电所的1150kV自耦变压器组供给），来研究线路所有元件的电气和机械性能。这样，就可以预先实现1150kV线路各元件功能性结构的设计和试验，并在安装及运行条件下进行验证。

最近几年，在1150kV架空线路试验线段上进行了一系列的试验和研究。1975年，全苏技术动力总局（原全苏国家区域发电厂及输电网络组织与合理化研究所）在各相导线、绝缘子串断脱及脱冰时的动荷载条件下，进行了相导线及各种不同金具元件的机械试验。进行这些试验的目的，在于确定相导线及绝缘子串的机械特性和实际的强度储备系数，以