

TM723

7142

责任编辑:李淑芳

封面设计:莫克

版式设计:赵品坚

超高压设备及其周围环境保护

Г. Н. 阿列克山德洛夫 著

顾乐观 孙才新 赵文麒 译

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆大学印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:11.5 字数:309千

1996年12月第1版 1996年12月第1次印刷

印数:1—2000

ISBN 7-5624-1373-8/TM·56 定价:15.00元

(川)新登字 020号

内 容 简 介

本书是前苏联第一本系统介绍超高压输电建设科学基础的专著,综合了前苏联超高压输电的科研成果和设计、制造、运行等方面的经验。主要包括超高压线路的导线和导线对杆塔的绝缘结构,空气绝缘距离的选择,杆塔和金具的布置,变电站母线组及其绝缘距离(包括相间)的选择。本书还介绍了超高压输电建设的生态问题,分析了利用超高压线路走廊发展农业的可能性。

本书可供大专院校电力专业、高电压技术专业用作教材和教学参考书,也可供广大电气技术人员参考。

译者的话

《超高压设备及其周围环境保护》一书综合论述了前苏联超高压输电技术的科研成果和设计、制造及其运行的经验,是前苏联第一部系统地阐述超高压和特高压输电建设科学技术基础的专著。本书作者 I. H. 阿列克山德洛夫教授一直关注中文翻译本的出版,并专门写了中文版前言,期望本书有益于促进我国超高压和特高压输电技术的发展和完善。

虽因种种原因现在才得以翻译出版,但书中内容对我国电力工业的发展仍具有重要的参考价值,可供我国电力系统运行和设计部门的工程技术人员,以及电气设备制造行业的工程师和高等院校相关专业师生阅读。

本中译本由重庆大学顾乐观译中文版前言、前言、绪论及第六章,并校阅全书;重庆大学孙才新译第一、三、四、五章、结论和附录,并负责统稿;重庆电业局赵文麒译第二章和第七章。由于译者水平所限,书中的错误及不当之处,恳请读者指正。

中文版前言

中国具有土地辽阔而电能资源和人口分布又不均衡的特点,因此必须着手大规模超高压输电建设。已经掌握的500kV电压等级输电技术,为进一步开发下一个1000kV电压等级提供了先决条件。对于中国专家来说,为实施本国的超高压和特高压电网发展战略,熟悉苏联的超高压、特高压输电建设经验是有好处的。

综合苏联超高压输电的科研成果,设计、制造和建设、运行经验,在1989年出版了第一本阐述超高压输电建设科学基础的教科书。书中系统地介绍了导线和导线对杆塔的绝缘结构,空气绝缘距离的选择,杆塔和金具的布置,变电站母线组及其绝缘距离(包括相间)的选择。在这里特别重视深度限制操作过电压的效果。

摆在作者面前的首要任务是证明所有输电部件结构间的不可分割的联系,输电的电气参数与结构参数之间有着严格的规律性。最大的注意力集中在导线——任何输电线路的基本结构部件(尤其是超高压输电线路)上,改变导线的结构可以在很大的范围内改变线路的电气参数。研究结果表明,与现行线路参数相比,线路的波阻抗和感抗可以大大减小,此时不再需要目前在中国广泛采用的纵向电容补偿,使输电线路的运行显著简化。

对于中国来说,由于人口密集,有重要意义的问题是输电线路与居民共处。书中有专门章节介绍这方面的问题,指出了利用超高压线路走廊发展农业的可能性和合理性,其中包括栽种3m~5m高的果树和其它植物。在线路下面栽种植物实际上可将电场强度降低到自然水平(地面电场强度水平),不会影响植物的生命活动:保持生长、开花、结果。苏联的电气设备安装已规定,允许输电线路走廊通过果树种植园。

作者期望本书的出版将有利于促进中国的超高压输电网络的发展和完善。

Г. Н. 阿列克山德洛夫

前 言

超高压架空输电线路的建成是与一系列专门问题的解决相联系的。解决这些问题的复杂性随额定电压的提高而增加。解决这些问题的共用方法以及它们相互之间的紧密联系,决定了把它们组合在一本作为建立超高压电气设备科学基础的书中是合理的。

选择架空线路的导线,表面上看来非常简单。这就使得在预测、选择方法以及建设中的线路结构上产生了一系列的原则性错误。为了这些缘故,加上导线是输电线路的基本部件,因此把上述内容写入本书第一章。在其余几章里分析研究了超高压输电建设的生态问题,输电线路和露天(封闭)变电站的绝缘问题,以及提高输电线路额定电压的前景。

写作本书时广泛应用了专著《超高压》^[1]中首次系统阐述的上面例举的这些内容,书中既反映了苏联国内,也反映了国外近几十年在超高压技术领域中的成就。

有关本书的批评、意见和建议请寄到:191065,列宁格勒,马尔索沃广场1号,原子能出版社列宁格勒分社。作者对此深表谢忱。

目 录

绪论	1
第一章 超高压线路的导线	8
1-1 导线和地线的结构	8
1-2 超高压架空线路导线选择的通用方法	10
1-3 分裂导线架空线路的参数	20
1-4 沿分裂导线表面的电场强度分布	32
1-5 电晕放电、电晕损失和无线电干扰的特性	38
1-6 超高压架空线路导线截面的选择	49
1-7 超高压架空线路导线表面积的选择	54
1-8 导线在空间的最优布置及超高压架空线路的极限自然功率	62
1-9 紧凑型线路	67
1-10 超高压架空线路导线的选择程序	75
第二章 设计架空线路时对挡距中导线力学作用的计算	83
2-1 计算的气象条件、风和冰荷载	83
2-2 导线的弧垂曲线、允许弧垂与挡距长度关系的确定	90
2-3 架空线路挡距长度的选择	104
2-4 架空线路导线的振荡及其抑制方法	107
2-5 短路时分裂相导线的运动	113

第三章 超高压和特高压输电的生态因素	120
3-1 架空线路对周围环境的影响	120
3-2 各种形式架空线路的电场	127
3-3 限制高压架空线路下电场强度的方法	133
第四章 超高压架空线路导线的绝缘悬挂	138
4-1 超高压架空线路的绝缘子	138
4-2 导线绝缘悬挂的结构图	147
4-3 沿导线绝缘悬挂体系的电压分布	159
4-4 调整沿导线耐张绝缘悬挂电压分布的方法	176
4-5 直线杆塔上分裂导线悬挂的稳定性	184
4-6 杆塔布置区域内导线电场强度的限制	190
第五章 超高压架空线路绝缘的电气强度特性	200
5-1 在污秽和湿润条件下导线绝缘悬挂的电气强度	200
5-2 过电压作用下挡距中空气间隙的电气强度	210
5-3 在工作电压和过电压作用下杆塔空气间隙的电气强度	223
第六章 超高压架空线路外形尺寸的选择	230
6-1 超高压架空线路外形尺寸优化准则的技术经济论证	230
6-2 按工作电压作用下的可靠运行条件选择导线的绝缘悬挂长度	232
6-3 按照工作电压下可靠运行条件选择超高压架空线路的空气间隙长度	238
6-4 按照操作过电压作用下可靠运行条件选择超高压架空线路空气间隙	245

6-5	按照在线路下维修和运输安全条件选择超高压架空 线路空气间隙	254
6-6	超高压架空线路的防雷保护	258

第七章 超高压变电站绝缘结构的外形尺寸 273

7-1	超高压变电站的结构特点	273
7-2	超高压户内和户外配电装置的母线组	277
7-3	户外和户内配电装置导电部件和绝缘结构的屏 蔽	282
7-4	户外和户内配电装置对地及接地部件空气间隙和绝 缘结构的电气强度	297
7-5	变电站多电极绝缘系统的电气强度	310
7-6	按工作电压和过电压作用下的可靠工作条件选择户 外和户内配电装置的绝缘系统	314

结论 331

附录 1	用于超高压线路的钢芯铝线的基本计算数据[ГОСТ839- 80]	343
------	---	-----

附录 2	第一类 $K(k)$ 和第二类 $E(k)$ 完全椭圆积分 ($k = \sin \alpha$)	344
------	--	-----

附录 3	随机变量的正态分布函数表	346
------	--------------------	-----

附录 4	电力网绝缘选择的统计方法原理	347
------	----------------------	-----

参考文献		354
------	-------	-----

绪 论

对超高压电气设备的电压等级下限至今尚没有一个明确的规定。过去采用的超高压电气设备的标志——应用分裂导线——丧失了自己的确切意义,因为分裂导线现在也应用到了 110kV 和 220kV 输电线路,而 110kV 和 220kV 电压等级从来也没有列入超高压的范畴。因此,必须确定新的标志,用它来确定超高压电气设备的电压下限。

为此,必须研究提高额定电压时导电部件的工作条件将如何变化。大家知道,导线截面是根据经济电流密度 $J_{\text{经}}$ 来选择的,其值约为 $1\text{A}/\text{mm}^2$ 。另一方面,导线的最小表面积由限制电晕放电的条件(电晕损失、噪声和无线电干扰)来决定。对于 100kV~150kV 以下电压等级的电气设备,后者不决定导线的结构,因为此时导线表面上的最大电场强度远小于限制电晕放电的允许值。从图绪-1 可知,对于 35kV 和 110kV 架空线路通常采用的导线(截面为: 35kV 架空线路, $50\text{mm}^2 \sim 150\text{mm}^2$; 110kV 架空线路, $70\text{mm}^2 \sim 240\text{mm}^2$),其容许相间距离要比目前采用的数值(35kV 架空线路, 4m; 110kV 架空线路, 5m)小得多,而且也小于保证可靠运行的必须距离,即为了防止导线在挡距中的折断而采用的绝缘支撑长度(35kV 架空线路, 0.7m~1m; 110kV 架空线路, 1.5m)。对于 220kV 架空线路通常采用的导线(截面为 $240\text{mm}^2 \sim 600\text{mm}^2$),其容许相间距离随导线直径的减小而急剧增大,对于最常使用的截面为 240mm^2 、 300mm^2 的导线,它明显大于保证过电压作用下可靠工作所必须的距离(具有绝缘支撑时为 2.5m~3m)。因此,对于 220kV 及其以上线路,最大电场强度可能超过容许值,它决定了高电压等级电气设备载流部件结构的特有的特殊性。

由于上述原因,对于超高压电气设备,为了防止发生电晕放

电,必须限制其载流部件表面的电场强度。本书遵循这个原则,将不介绍这样的电气设备,故载流部件表面电场强度没有达到限制电晕放电的容许值。

在本书中阐述了超高压输电结构部件以及选择配电装置的方法的科学基础。此时,空气将作为架空线路和户外配电装置绝缘结构

的基本元件之一, 因为沿架空线路整个导线长度, 其对地和导线间的绝缘只有空气, 只是在导线的某些点上通过绝缘子串固定到杆塔上。

超高压输电线路的整个绝缘遭受到工作电压、内部过电压和雷电过电压的作用, 而且还受到各种气象因素: 气压、温度、空气湿度、各种形式的沉降和湿润(雨、雾、露、湿雪、雾凇、冰)、风压等的波动的影响。为保证用户必须的连续供电, 保证用户端的电压质量和居民、牲畜(无围栏)的通行, 保证预防和检修工作的进行, 对架空输电线路和户外配电装置结构部件提出了 6 个不同的要求:

1) 保证在输电线路的正常(输电线路的自重、覆冰和风负载)和故障工作状态下, 遭受到机械负载的各种可能(计算)组合作用

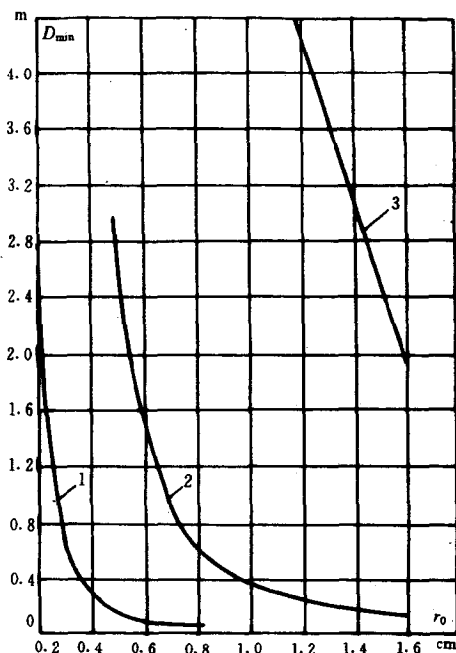


图1-1 相同导线架空线路按限制电晕放电条件决定的相导线间最小距离与导线半径 r_0 之间的关系

1—35kV; 2—110kV; 3—220kV

时输电线路的所有结构部件均能可靠工作；

2) 保证在所有的运行电压和气象因素作用下输电线路绝缘的可靠工作；

3) 保证输电线下的居民、牲畜和机械(例如联合收割机、起重机)的行动安全,以及检修人员在架空线路和户外配电装置上安全工作；

4) 限制输电线路部件的噪声和无线电干扰；

5) 保证输电线路的最佳经济工作状况；

6) 保证在计入基本费用、载流元件和空气中的能量损失(电晕损失)和停电损失的条件下,输电线路的最大有效经济性。

在计入基本费用 K 、导线和空气中的损失、运行费用和停电损失 Y 的技术经济计算基础上,根据上述的第 1、2、5、6 点要求写出超高压输电结构部件的选择原则:保证输电的建设和运行的折算费用(折合到一年)³ 最小^[22]

$$3 = (E_H + \alpha)K + I_1 + Y \quad (\text{绪-1})$$

其中 E_H ——基本投资有效性的标准(定额)系数,在动力学中取 $E_H = 0.12$; α ——折旧的标准(定额)系数; I_1 ——年电能损失和运行费用。系数 α 对于铁塔和水泥杆取为 0.024; 对于超高压电力设备——0.064。由于运行费用是与基本费用成正比的,因此采用相应的增大系数 α 来计入运行费用是合理的。其结果是对于架空线路有 $\alpha_s = \alpha_{B,1} = 0.028$; 对于电力设备有 $\alpha_s = \alpha_{06} = 0.084$ 。因此,对于架空线路有 $E_H + \alpha_s \approx 0.15$; 对于电力设备有 $E_H + \alpha_s \approx 0.20$ 。

根据第 2 点要求,当绝缘的基本投资和限制过电压的措施增加(例如采用增加绝缘长度来提高绝缘的电气强度和降低过电压水平)时,将由于绝缘闪络次数的减少而使停电损失降低。相反的改变公式(绪-1)中右边的第 1 项和第 3 项可以在某一个最佳的绝缘结构下得到折算费用最小值。

类似的,当架空线路的导线截面和表面积增加时,则由于导线自重和导线上的风载、冰载的增加而使基本费用增大。因此,提出存在一个能满足折算费用最小条件的最佳导线结构问题是很自然

的。

根据第 3 点要求将决定架空线路导线的最小地面高度和杆塔上空气间隙的大小,以便保证运行人员升高到杆塔上带电检查变电站的绝缘子串、金具和空气间隙。在某些情况下第 3 点要求比第 2 点更为苛刻,这就限制了按照第 2 点要求确定的原则来优化绝缘。

无线电干扰主要来自架空线路的导线、变电站户外配电装置的母线和高压设备上流注式电晕,因此满足第 4 点要求就必须限制导线表面的电场强度和采用专门的屏蔽措施。

改变导线的结构(例如,在不改变相导线总面积的条件下增加相中的子导线数)可以在很大范围内改变线路参数,促使纵电感减小,从而给予输电线路工作状况以明显影响,以此来保证满足第 5 点要求。

应当指出,上述要求的实现条件是互相有联系的。例如,根据第 4~6 点要求,为优化架空线路工作可靠性而改变绝缘距离,不可避免地要改变导线结构。而导线结构的改变将使导线与杆塔间、导线之间的空气间隙电气强度发生改变。

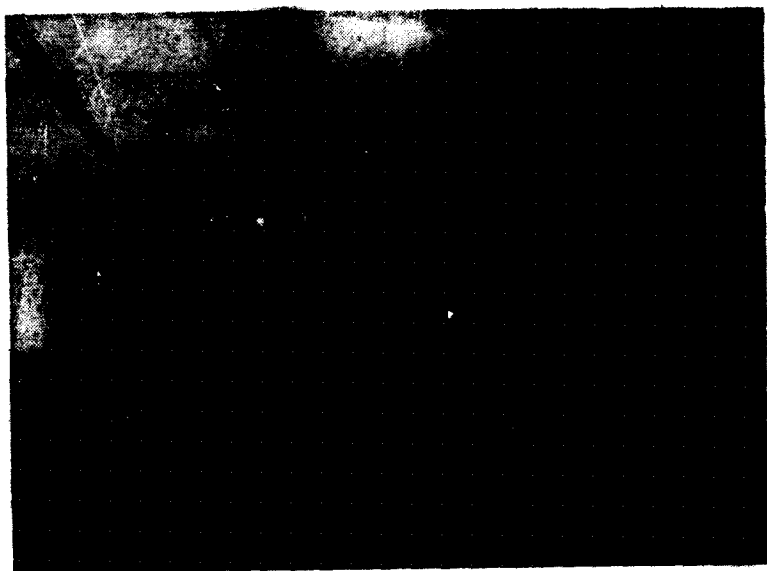
因此,超高压输电结构部件的选择是一个复杂的、综合性的科学技术和经济课题,它的解决在很大程度上与输电的经济性有关。

探求最佳经济条件,必须先弄清输电的技术、经济特性参数间的主要联系以及影响这些参数的现象的基本规律。因此,在本书中对输电部件的理论问题给予了充分的重视。

220kV 输电线路的建成是与苏联电网的重要发展阶段——由于邻近的动力系统电力网的相互联结而出现最初的联合动力系统^[27]相联系的。第一条 240km 长的 220kV 线路是在 1934 年用来从里日内—斯皮尔斯克到列宁格勒输送电能的。由于德聂伯尔—顿巴斯 220kV 输电线路的建立,在 1940 年第一次在国内出现了统一调度控制的联合动力系统。

苏联的统一动力系统形成的第一阶段是与下一个输电电压等级——500kV 的建立:古比雪夫—莫斯科(1956 年~1959 年),古

比雪夫—乌拉尔和伏尔加格勒—莫斯科相联系的。其结果是把它们联合到中央、乌拉尔、中部和下部巴甫尔滋亚动力系统的统一电网中。在1978年,由于鲁勃卓夫斯克—巴尔拿乌尔 500kV 架空线路的建成,完成了形成苏联统一动力系统的最重要的阶段——西伯利亚联合动力系统的接入。



图绪-2 艾其巴斯图兹—文略宾斯克 1150kV 等级架空线路
中亚细亚的 500kV 电网是孤立运行的。

与发展 500kV 电网的同时,从 50 年代末开始在国家的南部和西部地区发展 330kV 电网,它保证了在这些地区的联合动力系统的形成。这个电压等级的输电线路促成了西北联合动力系统和国家的统一动力系统的联结。

为加强统一动力系统与西部地区动力系统的联系,70 年代中期开始了紧张的 750kV 输电建设,其目的是为了更完整地体现动力系统并列运行的效果。

为了加强苏联统一动力系统东部地区动力系统间的远距离联

系和供给艾齐巴斯图兹和卡恩斯柯—阿琴斯柯大型燃料-动力联合体功率,从 80 年代初期开始建设世界上第一条额定电压超过 1000kV 的 1150kV 架空线路(图绪-2)。

如果在所有上述期间苏联的电网建设与美国、日本,加拿大以及其它先进的资本主义国家的电网发展是平行的话,那末由于艾其巴斯图兹—文略宾斯克和艾其巴斯图兹——巴尔纳乌尔等第一批 1150kV 架空线路的建成,苏联大大超过了其它国家。但这不是偶然的,因为苏联地域辽阔,动力资源与电能用户中心的距离相隔甚远,这就决定了必须实现上千公里的电能传输。输电的经济性在很大程度上是由输电能量损失决定的,效率为

$$\eta = 1 - \frac{\rho J l}{U_0} - \frac{\Delta P_K}{P} - \frac{\Delta P_T}{P} \quad (\text{绪-2})$$

其中 ρ ——导线电阻率; J ——电流密度; l ——线路长度; U_0 ——相电压; ΔP_K 和 ΔP_T ——电晕损失和变压器损失; P ——沿线传输功率。

在正确选择的导线结构下 $\frac{\Delta P_K}{P}$ 为每千公里线路 0.005 ~ 0.01, 即 $\frac{\Delta P_K}{P} = (0.5 \sim 1.0) \times 10^{-8} l$ (l 的单位为米(m)——译者注)。首端和末端 $\frac{\Delta P_T}{P}$ 的总和不超过 0.01。因此,当线路长度增加时,为了将效率保持在合适的范围内,只有提高电压。

$$U_{\text{н.н}} = \frac{\sqrt{3} J \rho l}{0.99 - \eta - (0.5 \sim 1.0) \times 10^{-8} l} \quad (\text{绪-3})$$

在表绪-1 中列出了在两个效率和两个千公里线路电晕损失值——0.01(分数的分子)和 0.005(分母)($J=1\text{A/mm}^2$)时按公式(绪-3)的计算结果。

从表绪-1 中可知,当线路长度 $l > 2000\text{m}$ 时电晕损失水平对输电线路额定电压的选择有明显的影响,因此,当 $l \gg 2000\text{km}$ 时,将电晕损失限制到每千公里线路 0.5% 是合理的,它比目前采用的限制电晕放电的要求更严(大约 $\frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{н.н}}} = 0.85$, 其中 $E_{\text{н.н}}$ ——起始

电晕放电电场强度)。

表绪-1

η	在相同的 $l(\text{km})$ 下的 $U_{\text{Л.Н}}(\text{kV})$				
	2000	3000	4000	5000	6000
0.90	1400	2450	3900	—	—
	1200	1950	2800	3770	—
0.85	820	1320	1960	2720	3780
	750	1160	1630	2130	2700

在上述条件下,为保持效率 $\eta=0.9$,即使线路长度 $l=3000\text{km}$ 也必须采用额定电压 $U_{\text{Л.Н}} \approx 2000\text{kV}$ 。如果线路长度更大时,在这个电压水平下传输电能只能有 $\eta=0.85$ 。为了保证效率处于 $\eta=0.9$ 的水平,而且线路长度 $l \geq 4000\text{km}$,则必须采用额定电压 $U_{\text{Л.Н}} \geq 3000\text{kV}$ 。因为在苏联传输能量超过 $3000\text{km} \sim 4000\text{km}$ 时,合理的是采用在各种不同时区内变动最大负荷(可以采用平缓负荷曲线的方法来减少保证总负荷的电站装机容量)。这一点对开发 3000kV 输电电压等级也是合理的,而且这个结论对于传输功率也是绝对正确的。

由于上述原因,在本书中介绍了额定电压 $U_{\text{Л.Н}}=2000\text{kV}$ 及其以上的输电建设前景。

在本书中主要注意力集中在架空线路和变电站结构部件的优化问题,阐明改变超高压架空线路参数的可能方法,在电气系统中提高它们的利用有效性。

建设架空输电线路给大自然带来巨大和不能补偿的损害。在建设架空输电线路时砍伐了上万顷面积的森林。电气化的进一步发展,西伯利亚和远东的经济开发将会毁灭广大地域上的森林。在线路走廊的森林地面上大面积砍伐植物将导致大量土地不能完全使用,降低了森林地区的生产效益,使空气中的氧气再生显著减少。通常认为,这种土地减少是国民经济电气化不可避免的产物。本书的任务之一就是找到减少对大自然的危害和有效利用架空线路走廊的方法。

第一章 超高压线路的导线

1-1 导线和地线的结构

在苏联,超高压输电线路采用铝部截面(有效截面)为 150mm^2 及以上的钢芯铝线(见附录1)。钢芯铝线具有钢芯和几层铝股(图1-1)。当中心有一股钢丝且所有线股的直径相等时,第一层有6股,而随后一层比一层多6股。这样,一层时钢芯由7股线组成,两层时由19股组成,三层时由37股组成。同一层所有线股应具有同样的直径,而不同层的线股直径可以不同。

导线 AC300/39(图1-1)的钢芯为一层线股,在钢芯上缠绕两层铝线。当铝层为奇数时,在导线中因钢芯过度磁化而引起损失增加。所以 ИУЭ—86(电气设备安装规程)建议采用偶数铝层的导线。

如上所述,导线的横截面远未被充分利用于布置导电部分(铝股),它包括钢芯与铝线股之间的空隙。导线的有效截面不同于整个导线由半径为 r_0 构成的圆面积

$$F_{0a} = \pi r_0^2 \chi_3 \quad (1-1)$$

式中 χ_3 ——导线的有效材料填充系数。

根据导线的结构和力学特性,苏联按国家标准 ГОСТ839—80 生产的导线可以分为以下几组:

1. 在超高压线路中应用最广的是铝与钢的截面比 $F_{0a} : F_{0c} \approx 8$ 的导线。它们的填充系数 χ_3 在 $0.66 \leq \chi_3 \leq 0.67$ 的狭小范围内变化,其平均值 $\bar{\chi}_3 \approx 0.67$ 。属于这组导线的有: AC150/19、AC185/24、AC240/32、AC300/39、AC330/43、AC400/51、AC500/64。

2. 截面比 $F_{0a} : F_{0c} \approx 4.3$ 和 $\bar{\chi}_3 \approx 0.61$ 的导线 AC150/34、

AC185/43、AC240/56、AC300/66、AC400/93 主要适用于重冰区。

3. 截面比 $F_{0a} : F_{0c} \approx 6.2$ 和 $\bar{\chi}_3 \approx 0.65$ 的导线 AC150/24、AC185/29、AC240/39、AC300/48、AC400/64 处于上述两组之间。

4. 截面比 $F_{0a} : F_{0c} \approx 1$ 的属特强型导线。 $\bar{\chi}_3 \approx 0.5$ 、牌号为 AC185/128、AC300/204 和 AC500/336 的导线用于跨越大的江河和水域；而 $\bar{\chi}_3 = 0.35$ 、牌号为 AC70/72 和 AC95/141 的导线用作避雷线。

根据 ГОСТ839—90, 这些导线的主要特性列于附录 1 中。

在所谓扩径导线结构中, 依靠有效材料来显著降低导线的填充系数 (图 1-2)。由铝线缠绕在普通结构的钢芯上形成螺旋状“骨架”的空腔是扩径导线的特点, 这种导线的表面积

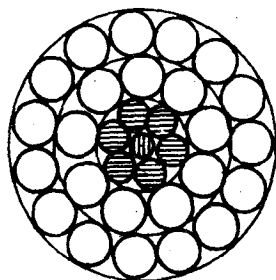


图 1-1 钢芯铝导线 AC300/39

和有效截面随导线半径 r_0 的增加而成比例增大。此时：

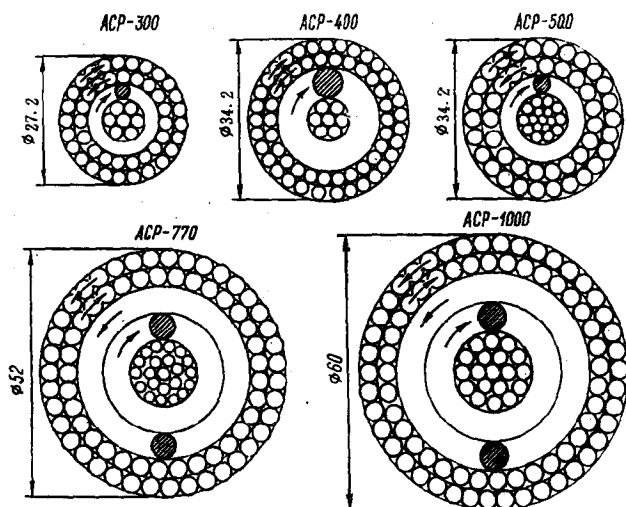


图 1-2 扩径导线