

马家炯

王秉钧

合译

高压架空线及电缆网络 中的过电压及其防护

М. В. 科斯坚科

К. П. 卡多姆斯卡娅

М. Л. 列夫尼什京

И. А. 叶弗列莫夫 著

国电力出版社

高压架空线及电缆网络的 过电压及其防护

M. B. 科 斯 坚 科 K. П. 卡多姆斯卡娅 著
M. Л. 列夫尼什京 И. А. 叶 弗 列 莫 夫
马家炯 王秉钧 合译

中 国 电 力 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

高压架空线及电缆网络中的过电压及其防护/(苏) 科斯坚科 (Костенко, М. В.) 等著; 马家炯, 王秉钧译. -北京: 中国电力出版社, 1995

ISBN 7-80125-041-9

I. 高… I. ①科… ②马… ③王… II. ①架空线路, 变电站-过电压保护②电缆-输配电线路-过电压保护 N. TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 17082 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市社科印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1996 年 7 月第一版 1996 年 7 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 32 开本 11.375 印张 252 千字

印数 0001—3850 册 定价 11.70 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

本书由 M. B. 科斯坚科 K. II. 卡多姆斯卡娅 И. A. 叶弗列莫夫
授权在中国大陆出版发行

中华人民共和国国家版权局著作权合同登记号图字: 01-1995-574 号

译者序言

本书的俄文原著，是 80 年代末期原苏联在超高压电网过电压及其防护方面一本有代表性的著作。各位作者均为该领域的权威人士，主编 M. B 科斯坚科 (Костенко) 早在 50 年代就是我国高电压技术界比较熟知的专家。故原著出版后很快受到国内一些专家、学者的注意。

原著的学术特色，在原著者序言里有详细准确的说明，很值得国内读者一读，故全文译出。相信广大读者会作出自己的判断和评价。

近年来，为适应教学、设计、实际专业工作及科研的需要，国内有关专家、学者结合自己科研及专业工作的经验，公开出版了不少过电压及其防护方面的著作。在此形势下，译者依然认为有必要在可谓百花争艳的过电压园地里增添本译著这样一个新的品种。译者认为，本书最明显的特点是对超高压电缆网络中的过电压及其防护问题给予了充分注意。书中专列三章研究电缆网络的过电压，内容为电缆网络中的波过程、大气过电压及操作过电压，篇幅占全书的三分之一强。迄今为止，国内超高压电网中很少或基本上没有使用电缆，因之国内对涉及电缆网络的过电压现象研究较少，这是完全可以理解的。但随着我国经济建设尤其是电力工业的持续高速发展，大工业用电中心及城市和人口聚居区用电负荷密度必然急剧增长，超高压电力电缆的采用是必然趋势。因之，原苏联学者研究包含高压电缆的网络中的过电压及其防护的思

CA00166

路、方法及给出的一些原则性结论，都值得我们认真借鉴，以便更好地适应我国电工制造及电力系统方面的特点和需要。另一方面，开展超高压电缆网络过电压的超前研究，既有利于我们开展国际学术交流，又可为解决国内超高压电缆应用上的一系列新课题做必要的技术理论准备。这些都是十分有意义的事情。

本书在系统全面地研究架空线及电缆线上的波过程、准稳态过电压时所采用的以矩阵理论为基础的系统性方法及考虑整个超高压网络的链式结构中的失步解列过电压等等做法对我们都有借鉴意义。

为了使国内广大过电压技术工作者、特别是没有机会接触原著或不甚熟悉俄文的青年技术人员也能受益于原著的智力劳动成果，我们在国内有关专家的鼓励和支持下，将原著全文翻译成中文呈现于读者面前。限于时间关系，译文中对已经发现的原版中的印刷错误尽可能做了订正。除将计量单位按我国法定计量单位及符号的规定予以改动之外，其余符号大多未予更动。为方便不大熟悉俄文的读者阅读和记忆，在附录中列出了本书中使用频率较高的专业术语缩写以及角标的汉语意义说明。

译者感谢浙江大学赵智大教授、武汉水利电力大学陈维贤教授及清华大学吴维韩教授对本书翻译工作的鼓励和支持。

译者还要向甘肃电力试验研究所熊力强所长（教授级高工）为首的领导表示衷心的感谢。他们对专业技术人员事业追求的深切理解和慷慨支持，使译者在日常工作之余坚持完成了本书付排之前译者义务范围内的全部任务。

本书由甘肃电力试验研究所马家炯和西安交通大学王秉

钩合译，并由后者对全文进行了校正。限于译者的学术及语言文字水平，译文失当乃至谬误之处在所难免，若蒙赐教不胜感激。

译者

1992年8月

原 著 者 序 言

动力事业的现阶段任务是使国家全面实现电气化。这就要求全苏统一电力系统应能借助于高压和超高压电网向用户提供充足、可靠、廉价的电力和电能。

电网和电力设备的绝缘，在考虑污秽、潮湿及周围环境的其它影响，以及考虑由于局部放电、电动力、腐蚀和各种电物理、电化学、电气机械作用引起的老化的条件下，应能在长达几十年的预期运行寿命内承受施于其上的工作电压。此外，绝缘还应该可靠地耐受雷电、准稳态以及操作过电压的多次作用；并且在绝缘一旦发生闪络后应尽可能迅速而简易地消除故障后果。为此，就势必要研究非线性过电压限制器 (опн)、避雷器及避雷针的防护作用，研究继电保护装置行为的优化、自动重合闸及其它限制过电压并保证电网正常运行的诸多措施的应用及配合问题。

过电压防护措施领域内的科技进步有可能使电网绝缘选择规范化。即可设法建立一套限制和防护过电压的综合性体系，在该体系下，线路和变电站的绝缘选择基本上由其长期工作电压决定，而过电压作用下的绝缘强度以及相应的安全裕度，则取决于过电压短暂作用时绝缘击穿发展过程中放电延迟的电物理过程。

随着电网工作电压的升高和架空线路伸展范围的扩大，以及缩小架空线路自身几何尺寸的趋势的发展，深度限制雷电和操作过电压已成为日益迫切的任务，对各种结构的高压电缆线路情况亦复如此。因此在研究和设计工作中，必须对

过电压以及限制电器的工作条件进行更为准确的计算。这里，包括自动重合闸在内的操作过程的优化也极为重要。为了更准确地计算过电压，就必须仔细深入地研究那些天然的基本衰减因素，即架空及电缆线路导电介质中的损耗的频率特性以及架空线上的电晕。这就要求计算架空及电缆线路的波过程的数学模型以及计算方法进一步完善化，并且广泛采用数字计算技术。

呈现在读者面前的这本书的各章节内容的选择和安排，正是为了适应这方面的新特点而努力的结果。

在原苏联的文献中已有不少分析电网过电压的专著^[2,35,62,65]。本书与已有专著的不同点在于：为了阐明问题的需要而广泛引用了电子计算机的计算结果；系统地阐述了各种结构的电缆线路中的过电压及其防护措施；全面地分析了超高压电网中的过电压计算及其防护措施。

研究电网中的过电压问题可有两种展开体系：①按照被研究的对象分类，即按架空线路、电缆线路分别进行讨论；②把具有相同或相近物理本质的过程合并研究，即按架空及电缆线路上的雷电过电压、操作过电压进行分类研究。本书的作者们选择了第二种途径。因为我们认为有必要依次叙述引起过电压的各种物理过程。据此认识，本书的内容分为以下几个部分：架空及电缆线路网络中的波过程（前两章）；架空及电缆线路上的雷电过电压及其防护措施（第3、4章）；架空线上的准稳态过电压（第5章）；架空及电缆线路上的操作过电压及其防护措施（第6、7章）。

第1章中对架空线路的多导线系统的波过程进行了定性和定量分析，给出了算子—矩阵形式的线路电报方程，介绍了计算机上采用的算法，并在考虑导线及大地阻抗的频率特

性的前提下，对线路上流动波畸变的典型情况给出了精确解与近似解。本章还在计及落雷导线上电晕放电的非线性伏库特性的条件下，研究了多导线系统的拟线性方程组的解。分析表明，在发生电晕的导线上，出现了相速度 $v < c$ 的模分量，且 v 与起晕导线的动态电位系数及平行导线的分流影响有关；而其它导线上的电压波则均以光速传播。本章还研究了雷电通道的拟线性方程的解，确定了由先导阶段过渡至主放电阶段时雷电通道的等值波阻抗，其数值的变动范围为数万至数百欧姆。本章的结束部分讨论了变电站进线段上波畸变的近似解，得出了与实验结果相符较好的计算数据。电子计算机上的大量计算结果表明，对大地模量而言，波行进距离 $l \geq 1 \sim 2\text{km}$ 时就必须考虑波的畸变；就中相导线对两个边相导线的模分量来说，波的行进距离 $l \geq 5 \sim 20\text{km}$ 时应当考虑波的变形；而对只包含两个边相导线的模分量，只有在 $l \geq 50\text{km}$ 后才需考虑波的畸变的影响。全波幅值的衰减主要与大地的损耗有关，而波头部分的畸变，则不仅与地中损耗有关，同时也与导线上的电晕放电有关。

第三章中给出了大量输电线路与变电站的防雷可靠性的计算结果。这些数据显示，对于 $330 \sim 750\text{kV}$ 的线路，实际上只有绕击才是危险的；对于 220kV 的线路，绕击与雷击杆塔时的反击均是危险的；对于 110kV 线路，只有反击才是危险的。各种型式的自动重合闸都可以明显提高各个电压等级的架空线路的防雷可靠性。 110kV 及以上电压等级的变电站，通常都可用避雷针对直击雷进行防护，降低接地电阻可使由避雷针向带电导体的逆闪络的概率大为减小。因此变电站防雷保护的可靠性，主要由沿着线路导线袭入变电站的危险波区域上的三重积分决定。该积分与雷电流的幅值和陡度，以

及波进入变电站之前所产生的波头的变形及其幅值的衰减等因素有关。危险波区域的上边界由线路绝缘的伏秒特性曲线限定，下边界则由考虑避雷器的保护作用以及站内其它馈线的分流作用时的变电站危险波曲线所限定。

第5章专门论述架空线路在对称及不对称工况下的准稳态过电压。其中分析了不对称短路、非全相合闸、单相自动重合等工况。研究所用的计算电路既有线性的，也有非线性的（架空导线上的电晕）；考虑了短路点的过渡电阻、并联电抗器中性点限流电阻及小电抗的影响等因素。本章的特点在于所给出的计算公式已可很方便地用来编制电子计算机所用的计算程序。本章介绍的内容，可对影响准稳态过电压的各种因素的影响程度及过电压对电网元件绝缘的危险程度进行定性和定量计算。本章还提出了限制准稳态过电压的一系列系统方面的措施。

第6章分析了线路有计划或故障情况下分、合闸时产生的过电压。对电网的链式结构、导线上的电晕放电、大地阻抗的频率特性等因素的影响做了研究。就电网的具体参数，对线路某一端点的操作顺序的效果做了评价性比较。指出了在有计划的选相合闸操作中，当前面一相断路器的触头闭合引起的暂态过程基本衰减完毕后再使后续相断路器实现合闸最为有利的原则。对失步开断过电压的分析，本章首先研究了既与高等级电压网络相连接，又与较低电压的网络并列的复杂系统的机电暂态过程。这一分析既揭示了系统振荡中心及解列断面的位置所在，又为计算被考察线路开断后的电磁暂态过程提供了初值条件。本章的内容既包括各种操作过电压的最大值的计算结果，也包括对其统计特性的研究分析成果。

第2、4、7三章中分析由单相电缆（低油压充油电缆及

塑料电缆)以及三相电缆(高油压充油电缆及钢管内的气体绝缘电缆)组成的地下输电网络中的过电压及其防护措施。研究了三相电缆线路上的波过程,其中也包括金属护套及大地回路中的波过程。建立了研究电缆网络中的雷电过电压及操作过电压的数学模型。根据对雷电过电压的研究结论,分析了电缆主绝缘(芯线与电缆护套间的绝缘)的运行可靠性以及非线性过电压限制器的工作条件。同时还对电缆与架空线接合处发生短路时的操作过电压进行了分析(这种过电压是选择电缆护套接地及换位方式的决定性因素,也是分析用于限制护套上过电压的保护电器运行条件的决定性因素)。

本书的第1、3两章由苏联科学院通信院士М. В. 科斯坚科撰写,第2、4、7三章由科学技术博士К. Л. 卡多姆斯卡娅执笔,第5章由科学技术博士М. Л. 列夫尼什京编写,第6章由科学技术副博士И. А. 叶弗列莫夫成稿。

第1章内引用了科学技术副博士Н. И. 古麦罗瓦娅、В. В. 叶菲莫夫、Л. С. 佩列利曼及工程师Д. Г. 麦谢尔曼等人的计算结果。第3章引用了科学技术副博士И. М. 巴加坚科夫、Н. И. 古麦罗瓦娅、Ю. А. 米哈依诺夫及Ф. X. 哈里诺夫的计算结果。科学技术副博士Д. А. 戈尔多宾、Ю. А. 拉费罗夫参与了第2、4、7章的撰写并引用了他们自己的研究成果。本书的责任编辑、原苏联科学院通信院士Н. Н. 季贺杰也夫为本书进一步臻于完善做出了重要贡献,作者们谨向他表示衷心的感谢。

对本书的意见与建议,请寄19521,列宁格勒,技术街29号,列宁格勒工业大学高电压技术教研室,М. В. 科斯坚科通信院士,不胜感谢。

内 容 提 要

本书分析了高压架空线路及电缆线路中的波过程；介绍了导线和大地阻抗的频率特性及电晕放电的非线性特性复合作用下波的畸变和衰减的计算方法；根据所建立的数学模型及在计算机上采用的算法和程序，研究了架空线及各种结构的电缆线路上的雷电和操作过电压；并推荐了一系列的过电压防护措施，其中包括保护电器（例如非线性过电压限制器）及系统自动化手段的运用。本书可供电力系统运行及设计方面的专业人员参考，也可供高等院校电力系高压、发电等专业的本科生与研究生阅读。

目 录

译者序言

原著者序言

1. 架空线路上的波过程	1
1.1 线路的电报方程	1
1.2 冲击电晕及其对波过程的影响	22
1.3 击中线路导线的雷电特性	39
1.4 波在多导线架空线路上的畸变	54
2. 高压电缆线路上的波过程	79
2.1 高压电缆的结构	79
2.2 单相电缆组成的三相系统的电报方程及其原参数	80
2.3 单相电缆构成的三相系统的波通道及其参数	91
2.4 钢管中的三相电缆线路的电报方程及其原参数	99
2.5 三相电缆的波通道及其参数	112
2.6 直角电压脉冲沿三相电缆线路的传播	115
3. 架空线路及变电站的雷电过电压	119
3.1 架空线路防雷保护的可靠性计算	119
3.2 露天配电装置的防雷可靠性	134
4. 高压电缆网络中的雷电过电压	138
4.1 包含高压电缆的网络的典型接线	138
4.2 研究雷电过电压的计算电路与数学模型	141
4.3 架空线路与电缆线路直接连接时的过电压	151
5. 高压输电系统的准稳态过电压	175
5.1 对称状态下的电容效应	175
5.2 不对称短路过电压	206

5.3	非全相状态下的过电压	226
5.4	单相重合闸过电压	251
6.	架空线路的操作过电压及其限制措施	261
6.1	概述	261
6.2	超高压电网操作过电压的计算方法	264
6.3	架空线路的计划合闸过电压	274
6.4	单相自动重合闸过电压	291
6.5	失步开断过电压	301
7.	高压电缆线路上的操作过电压及其限制措施	308
7.1	护套不同接地方式下电缆线路的正常运行状态	308
7.2	护套两端均接地时护套—大地间绝缘上的过电压	311
7.3	护套特殊连接的三相电缆线路上的波过程的 数学模型	320
7.4	确定护套特殊连接方式下护套绝缘上过电压 最大值的数学模型	329
7.5	护套单端断开时其绝缘上的过电压及其防护	338
7.6	护套换位的电缆线路护套绝缘上的过电压及其 防护	341
附录		345
参考文献		347

1. 架空线路上的暂态过程

1.1 线路的电报方程

架空线路，电缆线路，雷电通道以及电机、变压器、电抗器的绕组，电力电容器的极板，电网的其它元件中都包含导电、绝缘和导磁介质，而且这些介质分界面上的情况又十分复杂。严格地讲，分析这些介质中的电磁暂态过程，应该从各种介质中的电磁场的微分方程（Maxwell 方程）出发^[1]。在第 i 种介质中

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E}_i &= -\frac{\partial}{\partial t}(\mu_i \mathbf{H}_i) \\ \operatorname{div}(\epsilon_i \mathbf{E}_i) &= \delta_{\rho i} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H}_i &= \frac{1}{\rho_i} \mathbf{E}_i + \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_i \mathbf{E}_i) + \delta_{\rho} \mathbf{V}_i \\ \operatorname{div}(\mu_i \mathbf{H}_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

式中： $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 分别为电场及磁场强度； δ_{ρ} 为体积电荷密度； $\delta_{\rho} \mathbf{V}$ 为迁移电流密度； ϵ 、 μ 分别为介质的绝对介电系数和磁导率； ρ 为介质的电阻率； i 为第 i 种介质的下标。一般情况下， ϵ 、 μ 、 ρ 可能与时间、坐标及场的各分量有关，在各向异性介质中，它们都是张量。

此外，在相邻两种介质（用下标 k ， i 分别表示）的分界

面上, 电场强度 E 及磁场强度 H 的切线及法线分量 (以下标 τ 、 n 表示) 还必须满足下列边界条件^①

$$\left. \begin{aligned} H_{\tau k} &= H_{\tau i} \\ \mu_k H_{nk} &= \mu_i H_{ni} \\ E_{\tau k} &= E_{\tau i} \\ \frac{1}{\rho_k} E_{nk} + \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_k E_{nk}) + \delta_{\rho k} v_{nk} \\ &= \frac{1}{\rho_i} E_{ni} + \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_i E_{ni}) + \delta_{\rho i} v_{ni} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

然而, 分析电力系统暂态过程的这种途径, 即使借助于现代化的电子计算机, 也是极为繁复而困难的; 而且它也只能就个别具体条件给出数值解而无法给出解析形式的答案。

为此, 在以后的叙述中我们将认为每种介质都是均匀、各向同性、不随时间而变的物质, 而且也不存在体积电荷。至于大地的非均匀结构, 可通过引入等值电阻率 $\rho_s = \text{const}$ 并取 $\epsilon_s = \text{const}$ 、 $\mu = \mu_0 = \text{const}$ 加以考虑。对于钢芯铝导线复杂的多芯绞线股结构, 则可通过引入实验修正系数予以考虑。空气中的游离过程及体积电荷, 在电压低于其起始电晕电压时可以认为不存在; 对于全面电晕, 则可引用实验伏库特性曲线加以考虑。

在线性问题中, 为了考虑非零初值条件, 可采用迭加原理分别研究。

设在式 (1.1) 及式 (1.2) 中, $\mu_i = \text{const}$, $\epsilon_i = \text{const}$, $\rho_i = \text{const}$, $\delta_{\rho i} \rightarrow 0$, 取零初值条件, 则可列出笛卡尔坐标系中算子形式的波动方程为

① 在分界面上还会产生表面电荷、极化电势及电位跃变, 这些不属本书讨论范围, 故不予考虑。——原著者。

$$\nabla^2 \psi_i = \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial z^2} = k_i^2 \psi_i \quad (1.4)$$

式中： $k_i = \sqrt{p\mu_i\sigma_i}$ 、 $\sigma_i = \frac{1}{\rho_i} + p\epsilon_i$ 分别为算子形式下第 i 种介质的波数及电导率； ψ_i 为场的诸分量 E_x , E_y , ..., H_x 中的任一分量。

在对具体问题进行研究的过程中,除了使用场方程之外,本书还将不时使用相应的等值电路方程。这些等值电路中的每一个元件,都是考察物质的特殊存在方式——电磁场的特殊运动的条件性方法。这些特殊情形包括电场(电容器的电容),磁场(电抗器的电感)以及由它们中的能量转化而成的分子的无规则运动(电阻元件的电阻)等。由这些等值元件组成的电路方程,可看作是对所研究的输电系统暂态过程的近似模型化描写。而等值电路的具体结构及其元件参数,则与所研究过程的频率范围、变化速率、时间尺度、电压、电流及其它物理量有关,也与原始数据的准确度及具体问题所能允许的误差大小有关。

式(1.1)~式(1.4)可用作对等值电路的结构及参数作进一步精确化的依据,同时还可用以估计误差并确定等值电路的使用条件。

高压(BH)及超高压(CBH)电网中的架空线路的功能,在于以很小的损耗把电能输送至远方。因此它的导线和地线的直径较大而电阻很小,而且导线与地线间的距离,以及二者离开大地表面的高度,都是其直径的许多倍。

导线与地之间以及导线相互之间都有足够的绝缘,而且导线的弧垂不大。即使考虑到电磁场进入地中的深度,线路自身的长度也还是远远大于线路的横向尺寸。