

ТЕХНИКА

著者 К. Ф. 斯捷潘诺夫
[苏] Н. А. 基里可夫

高压技术

Высоких
Напряжений

机械工业出版社

本书比较系统全面地论述了在气体、液体和固体绝缘中放电的物理过程；高电压设备绝缘在设计、制造和运行中出现的问题；高电压试验设备和测试技术；电气设备上的大气过电压和内部过电压；以及输电线路和电站、变电所设备的过电压防护措施等。

本书适合于高等学校电力、高电压技术等专业的师生阅读；也可供电力、电工部门从事运行、设计制造和试验研究的人员使用。

ТЕХНИКА

ВЫСОКИХ

НАПРЯЖЕНИЙ

К. Ф. СТЕПАНЧУК

Н. А. ТИНЯКОВ

МИНСК

《ВЫШЭЙШАЯ ШКОЛА》

1982

* * *
高 电 压 技 术

〔苏〕 К. Ф. 斯捷潘楚克 著
Н. А. 基那可夫

姜公超 译

朱德恒 戚庆成 校

*
责任编辑：李振标 版式设计：吴静霞

封面设计：姚 毅 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*
机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

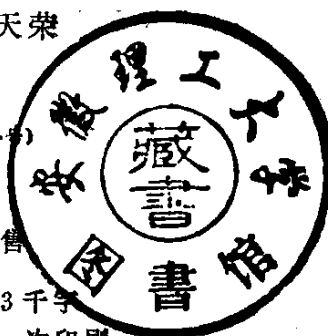
新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*
开本 787×1092 1/32 · 印张 14 3/4 · 字数 323 千字

1990 年 9 月北京第一版 · 1990 年 9 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,150 · 定价：11.50 元

*
ISBN 7-111-02032-4/TM·277



译 者 的 话

近半个世纪以来，苏联的电力工业有了很大的发展。目前，电能的年生产量已达17000亿度，电网已遍及全国各地。330kV和500kV的输电线路从60年代就投入了运行，750kV的输电线路在70年代就开始使用了。目前，已建立了交流1150kV和直流1500kV的特高压输电线路。这样高电压的电器设备和输电线路的制造和投运标志着苏联的电器工业和电力工业水平已进入了世界最先进的行列。

电力工业的发展与高电压技术的研究密切相关。为了解决高电压方面的技术问题，苏联从40年代末开始就陆续建起了一些世界一流水平的高电压试验室。几十年来，他们在高电压技术领域里做了大量的试验研究工作，并取得了许多宝贵的经验。

本书基本上反映了苏联80年代高电压技术的状况。书中系统全面深入浅出地介绍了气体、液体和固体介质中放电的物理过程，以及电器设备的绝缘、高电压试验设备、测试技术、电力系统中出现的各种过电压及防护措施等。另外，还推荐了许多经验公式和大量的实验数据。

译者将此书献给广大读者，希望能借鉴其先进的技术，努力发展我国的高电压技术，为振兴电力工业做出贡献。

本书很适宜于高等学校电力、高电压技术等专业的师生阅读，对在电力系统、电器制造等行业中从事运行、制造及试验研究的人员也很有参考价值。

译者衷心期望本书能对国内的同行们有所帮助。由于译者水平有限，难免有不当之处，欢迎读者批评指正。

另外，对在翻译这本书时曾给予很多帮助的吕轶球工程师深表谢意。

译者

序

苏共26大通过的决议中规定，从1980年到1985年电能的生产和消费要由 13000 亿度[⊖] 增长到15500~16000亿度。这个增长的实现就需要解决复杂的科学和工程问题，这些问题可以集中在如下的两个主要方面：降低电能的成本和保证电气设备高度的可靠性。

为了增加电能的生产并减少其成本，区域热电站和原子能电站的容量增高到4000~6000MW，水电站的容量增高到6000MW。在国家的东部区域，电能生产的大幅度增长和容量的集中正在实现。

进一步集中电能生产，并保证用户供电的可靠性，都要求增加输电干线及配电线路的数量和长度，这些线路均联在苏联统一的电网中。

远距离输送电能需要用高电压。传输容量越大，输送距离越长，则采用更高电压就越经济。所以，在苏联330kV和500kV的输电线路从60年代就投入了运行。在70年代，系统间的联络已采用了750kV的电压，并且开始了交流1150kV和直流1500kV 架空线路的建设。这样的超高压线路和变电所设备的制造、掌握和运行，以及额定电压3~220kV电气设备的改进和合理使用，都要求工程师和研究工作者深入了解与高电压设备绝缘有关的各种问题。本书综合概括了这方面的各种有关问题。

⊖ 一度电 = 1 kWh 电能。

本书是作者对历年来在白俄罗斯多科性工业大学讲课的教材作了修改和补充后写成的。所以,此书包括了高等学校电力专业“高电压技术”课程教学大纲规定的主要内容(0301, 0302和0303)。

从1971年教科书第一版出版以来,由于高电压技术和相应的教学大纲有了明显的更新,所以对书中的内容作了补充,并且几乎完全进行了改写,补充修改时,作者尽量考虑了来自各方面的意见和愿望。

绪论,第2、3、4、5、15、16、17、22章和8.8节由К. Ф. 斯捷潘楚克编写,其余部分由Н. А. 基那可夫编写。

伊万诺夫动力学院高电压技术教研室副教授、工学硕士Ю. А. 米基金和乌拉尔多科性工业大学高电压技术教研室的全体同事在校阅原稿时提出了宝贵的意见和建议,作者对此表示衷心的感谢。

作者对改进本书的所有建议和意见都很感谢。意见请寄至:

220048, Минск, Проспект Машерова, 11, Издательство «Вышэйшая школа»。

作者

目 录

译者的话

序

绪论..... 1

第一篇 高电压电气设备的绝缘

1	气体放电	6
1.1	气体放电的一般特性	6
1.2	气体电离的物理过程	9
1.3	持续作用电压下空气间隙的放电	21
1.4	冲击电压下空气间隙的放电	46
1.5	输电线的电晕放电	55
1.6	空气中沿固体绝缘表面的放电	74
2	架空线和配电装置的外绝缘	83
2.1	高压绝缘子	83
2.2	架空线的绝缘	97
2.3	配电装置的外绝缘	105
3	液体和固体电介质的放电及内绝缘的电气特性.....	107
3.1	电气设备内绝缘的一般特性	107
3.2	液体绝缘的放电	111
3.3	固体电介质	119
3.4	油-屏障绝缘	133
3.5	油纸绝缘	139
3.6	气体绝缘	147
3.7	内绝缘的老化及工作和试验电压允许值的选择	155

4	高电压设备的绝缘结构	163
4.1	绝缘结构的一般特点	163
4.2	35kV及更高电压的套管绝缘子	163
4.3	高压电力变压器的绝缘	168
4.4	高压电力电缆的绝缘	172
4.5	高压电容器的绝缘	182
4.6	高压电机的绝缘	188
5	绝缘的工厂试验和预防性试验	193
5.1	试验的一般特点	193
5.2	非破坏性试验的物理基础和方法	195
5.3	绝缘的耐压试验	209
5.4	各种电气设备试验的特点	213
6	高电压试验设备	223
6.1	概述	223
6.2	交流试验设备	223
6.3	直流试验设备	227
6.4	冲击电压发生器	232
6.5	操作过电压发生器	236
6.6	冲击电流发生器	239
7	高电压测量	242
7.1	静电电压表	242
7.2	球隙	244
7.3	电子示波器	249
7.4	分压器	251
7.5	冲击电流的测量	256
7.6	无接触测量方法	260

第二篇 电气设备中的过电压及其防护

8	输电线和电机绕组中的波过程	262
---	---------------	-----

8.1	无损耗线上波的传播	262
8.2	波的折射和反射, 彼得逊法则	264
8.3	行波经过电容或通过电感	266
8.4	行波投入振荡电路	270
8.5	多次反射	274
8.6	波的衰减和变形	278
8.7	多导线系统中波的传播	281
8.8	变压器和电机绕组中的波过程	286
9	产生雷电过电压的雷闪	302
9.1	雷闪放电的发展	302
9.2	雷闪的电气参数和雷电活动强度	304
9.3	直击雷过电压	306
9.4	感应过电压	307
9.5	雷电流的热及机械效应	310
10	直击雷防护	311
10.1	概述	311
10.2	避雷针的保护范围	312
10.3	避雷线的保护范围	315
10.4	避雷装置的结构设计	317
11	高电压设备的接地	319
11.1	概述	319
11.2	接地体的散流电阻	319
11.3	大地的电导性及土壤的特性	323
11.4	电气设备的保护接地	325
11.5	雷电流通过时接地体的工作特性	329
11.6	电气设备的防雷接地	332
11.7	接地电阻和土壤电阻率的测量	333
12	避雷器	335
12.1	概述	335

12.2	管型避雷器	336
12.3	阀型避雷器	340
12.4	保护间隙	354
13	输电线路的防雷保护	355
13.1	输电线路大气过电压的一般特征	355
13.2	雷直击于无避雷线线路	358
13.3	雷直击于有避雷线线路	360
13.4	对各种电压线路防雷措施的建议	368
14	变电所设备和旋转电机的防雷保护	371
14.1	变电所的耐雷指标	371
14.2	直击雷防护和避雷针接地	372
14.3	阀型避雷器的保护作用	375
14.4	避雷器与被保护绝缘间的距离对其保护作用的影 响	378
14.5	绝缘的允许电压	381
14.6	进线保护段长度的选择	382
14.7	变电所绝缘对侵入波的防护	384
14.8	旋转电机对侵入波的防护	387
15	电力系统内部过电压的一般特性	391
15.1	内部过电压的主要形式及其倍数	391
15.2	计算过电压的等效电路及其参数	393
15.3	中性点接地方式对过电压值的影响	396
15.4	内部过电压的概率特性	398
16	电容效应引起的电压升高	400
16.1	长架空线路的基本方程式	400
16.2	空载长线末端的电压	401
16.3	电晕对过电压的影响	404
16.4	补偿装置对过电压的影响	404
16.5	双端电源的线路中电容效应的特点和半波谐振	410

16.6	单侧供电的长线中不对称短路时的过电压	411
17	铁磁谐振过电压	413
17.1	非线性电感电路中的谐振现象	413
17.2	受电变压器中性点绝缘时的基波铁磁谐振过电压	416
17.3	变压器铁心饱和对中性点接地系统稳定对称状态中过电压的影响	418
17.4	中性点接地系统非全相状态时的基波铁磁谐振过电压	421
17.5	高次和低次谐波谐振过电压和参数谐振	423
18	合闸时的操作过电压	425
18.1	接通振荡回路时的过电压	425
18.2	冲击系数的统计特性	430
18.3	自动重合闸过电压	432
19	切断时的操作过电压	434
19.1	切断空载线路时的过电压	434
19.2	切断电抗器和空载变压器时的过电压	436
19.3	切断短路和非同期运行时的过电压	438
20	电弧接地过电压	440
20.1	对地短路时相电压的升高	440
20.2	降低接地过电压的措施	443
21	内部过电压的限制	447
21.1	接线上的限制过电压措施	447
21.2	暂态过电压的防护措施	449
22	电力系统的绝缘配合	453
22.1	绝缘配合的一般原则	453
22.2	架空输电线路的绝缘水平及配合	454
22.3	变电所设备的绝缘水平及配合	456
	参考文献	458

绪 论

输电线、变压器、电机及其它电器的载流部分与接地部分之间，相间，或者直流电压下的极间都应有可靠的绝缘。作为绝缘的各种电介质有气体介质、液体介质和固体介质。电介质的电气和某些化学-物理及机械特性在“电工材料”教科书中已有阐述。但是，它们在具体绝缘结构中的应用却带来了一系列附加的问题，这些问题决定于绝缘结构的形式和功能，在电压的作用、机械和热负载以及周围环境条件下的工作可靠性，同时还有经济合理性。

绝缘可以分成彼此很不相同的两种基本形式：外绝缘和内绝缘。

架空线的外绝缘由导线之间的空气间隙及固定导线用的绝缘子所构成。对于空气间隙，高电压技术的实际问题似乎还不太复杂（阐明不同电极形状和不同电压作用的形式下空气间隙的击穿电压），但是悬挂导线的绝缘子，问题就复杂多了。所以，在高电压技术中不仅要研究各种电极形状下空气间隙的击穿（虽然这个问题深入讲是很复杂的），而且要研究电气设备的外部气体绝缘的特性，这时必须考虑到固体元件、大气条件、污秽、作用的电压的波形和持续时间、击穿的统计规律等的影响。同时也必须考虑到无线电干扰和电晕损失的限制，以及保证架空线下面和变电所范围内人员与设备在工作和迁移中的安全。

当研究高压电缆、电容器、变压器、电机及其它电器的

内绝缘时，会出现更复杂的问题。在这些设备中，采用了固体、液体和气体材料，而且常常采用组合绝缘，比如，油-屏障和油纸绝缘。理想情况下，内绝缘希望采用这样好的材料，它们在可能的最小结构尺寸时，仍能保证可靠的绝缘、必要的机械强度和热扩散。但是，实际使用的材料，其电气、机械和热的性能很不理想，因此，必须认真解决内绝缘的技术问题，以保证在成本尽可能低和尺寸尽可能小的条件下电气设备能可靠地运行。和外绝缘不同，内绝缘是非自恢复绝缘，即这种绝缘的击穿会导致不可逆的后果和失去其原有的绝缘性能。所以，贵重和大型结构的内绝缘实验数据的积累是非常困难的。

绝缘在运行过程中会遭受到各种形式的电压的作用。首先是持续作用的工作电压，其值接近于额定电压，或者稍高（升高10~15%）。在设计和使用高压线路、电气设备时，必须保证其绝缘在工作电压持续作用下能够在整个运行期间可靠和不发生事故地长期工作。

其次，作用在绝缘上的还有内部过电压。它会在线路与电气设备合闸和切断时、事故和不对称工作状态时以及发生谐振时产生。这些过电压在绝缘上的作用时间比较短（从几千分之一秒到几十秒或更多），但是其数值 U_{ov} 可以超过额定电压好几倍。过电压幅值与最大工作相电压幅值 U_ϕ 之比称为过电压倍数。

内部过电压的倍数和持续时间与系统中性点的接地情况有很大关系。中性点不接地系统中，在稳定的金属接地时，另外两相上的电压会升高到线电压。当电弧短路时，系统中的过电压可以达到 $(3 \sim 4) U_\phi$ 。由于中性点不接地系统中的单相短路不会产生巨大的短路电流，不会导致故障段的切

除（采用中性点不接地系统的优越性就在于此），所以过电压的作用时间长。这时，在电网的其它地方就会出现绝缘击穿从而导致两相短路的危险。为了预防这种系统中常有的事故，就必须采取措施降低过电压，并加强绝缘。采用中性点通过消弧线圈接地的方法有利于消除短路和减少过电压的倍数及持续时间，但是在这种情况下，稳定的单相接地会使健全相的电压升高到线电压。实践经验表明，在 $3 \sim 35\text{kV}$ 电压下，采用中性点绝缘系统有着明显的优越性。在这些系统中，必要地加强绝缘还不会使电网及变电所设备的成本有显著的增长，而对于 $3 \sim 35\text{kV}$ 电网特有的和经常发生的单相短路却不会造成事故切除和设备损坏。

在苏联和国外 110kV 及更高的电网，通常都采用中性点有效接地。在这些电网中绝缘的成本高了，除了别的原因以外，为了尽量限制可能的过电压，就必须采用中性点接地。中性点接地系统单相短路时，要流过短路电流，从而故障段会很快地切除，这时非故障相电压增高不会超过 $(1.2 \sim 1.4)U_\phi$ ，而且大多数情况下，自动重合闸常是成功的，电网的正常接线可以恢复。

作用在绝缘上的第三种电压是雷电过电压，或者叫大气过电压。这种过电压是由于雷击在电气设备或其附近而产生的。雷击时载流部分上产生的过电压波以光速传播，侵入到变压器、电机的绕组中，作用在线路和设备的绝缘上。大气过电压的作用时间很短（从一到几百 μs ），但是其数值在没有专门的保护措施情况下可以达到几百万伏。实际上任何额定电压的绝缘结构都不能承受这样高的电压。所以必须将大气过电压限制到允许的数值。首先要尽量预防雷直击设备，因为这时产生的过电压特别危险。用避雷针和避雷线作直击

雷防护是可靠的,但是这种防护措施并不适用于所有的设备。此外,雷击在电气设备附近产生的感应过电压同样对绝缘有危险。不能完全排除雷绕过避雷装置直接击在电气设备上的可能性,因此,必须有专门的设备和措施以限制大气过电压。

防雷保护的主要设备是避雷器。避雷器与绝缘相并联,它能在比绝缘击穿电压低的电压下动作。这样,侵入到绝缘上的过电压波就能降低到允许的水平。电气设备的绝缘应该能承受不止一次的大气过电压波的作用,虽然采用了各种保护措施,这个过电压仍能大大超过额定电压。

这样,为了保证安全运行,电气设备的绝缘应能承受作用在它上面的各种形式的电压,即应有一定的水平。绝缘水平实际上靠耐受试验电压或放电电压来确定。因为绝缘水平在很大程度上决定了电气设备的尺寸和成本,因此,希望绝缘水平尽可能降低。

220kV及以下电压设备的绝缘水平主要由大气过电压决定,因为这些电压等级设备的绝缘如果能承受大气过电压,那么通常它也能承受操作过电压。由此可见,对于220kV及以下电气设备的绝缘,进一步完善防雷保护是必要的,这些设备绝缘的冲击特性和冲击试验也是重要的。由于防雷保护措施的完善,对220kV及以上电压,选择绝缘水平时,内部过电压将起决定的作用,因此需要有专门的措施以限制内部过电压。只有把内部过电压限制到 $(2.2 \sim 1.8) U_{\phi}$ 及以下,750kV及以上电压设备的尺寸和成本才是可以接受的。

绝缘水平必须与作用在绝缘上的电压、防护措施以及为保证必要的可靠性而采取的适当的裕度相互协调起来,这个协调就叫作绝缘配合。对于贵重的和难以修复的设备,或者损坏后会造成严重事故及大量物质损失的设备,应采用更高

的绝缘水平(大的裕度),这也属于绝缘配合的范畴。因此,绝缘配合的问题是多方面的,其最优解应通过技术经济计算求得(保证最大的国民经济效益,即“折合费用”最小),同时还应考虑到安全技术、周围环境保护、尺寸大小等等因素的限制。

为了确定新造设备的绝缘与采用的水平是否一致,就需要进行试验。工厂试验中包括了冲击电压试验和工频电压试验。试验电压值和试验方法在国家标准 ГОСТ中都做了规定。

绝缘在运行过程中,在升高的温度、机械负荷、电场及周围媒质的作用下,其电气特性会逐渐变坏。电气性能的这种劣化现象与绝缘的化学变化(老化)、局部损伤的出现、受潮、污秽等有关。绝缘能够劣化到这样的程度,以致其绝缘水平降低到低于可能的过电压,从而造成损坏。运行中电气设备绝缘的击穿常常造成非常严重的事故,所以必须掌握绝缘的状况,并且当其电气性能严重劣化时,应在检修期间加以修复或更换。

为了确定运行设备绝缘的状况,需要进行预防性试验。在进行了一系列试验和对试验结果进行分析之后,能够得出关于绝缘状况的正确结论。这就要求很好地了解绝缘预防性试验的物理基础和方法。

高电压试验和研究必须有专门的设备。这些试验设备的结构、其工作状况、高电压和超高电压的测量方法等形成了高电压技术的一个特殊的组成部分,它在《高电压技术》普通课教科书中也作了简要的介绍。

总之,高电压设备的设计、制造和运行都需要对作用在绝缘上的电压、降低过电压的措施、绝缘结构的电气性能、试验方法以及绝缘监督等方面有深邃的知识。这些问题彼此密切相关,它们也就是高电压技术教科书所要介绍的内容。

第一篇 高电压电气设备的绝缘

1 气 体 放 电

1.1 气体放电的一般特性

1.1.1 绝缘结构中气体介质的作用

在任何绝缘结构中，程度不同地总要采用空气或其它某种气体作为绝缘介质。架空线的导线之间、配电装置的母线之间、变压器和各种高压电器的套管之间都是由间隙隔开的，间隙中唯一的绝缘介质就是空气。

无论绝缘子介质的击穿，还是空气中或沿介质表面的放电都会导致上述绝缘结构电气强度的破坏。绝缘子的击穿能使其完全损坏，与之不同，沿面放电通常不会造成损坏。因此，如果使绝缘结构的沿面闪络电压或空气中的放电电压低于绝缘子的击穿电压，那么这种结构的实际电气强度将决定于空气的电气强度。

在上述情况下，空气是一种天然的气体介质，绝缘结构就处在其中。此外，当制造电缆、电容器、变压器及其它电器的绝缘时，常采用空气或其它气体作为一种基本的绝缘材料。

为了保证绝缘结构可靠和安全运行，就必须了解各种因素，比如作用的电压的形式和持续时间、气体的温度和压力、电场的特性等等对气体电气强度的影响。