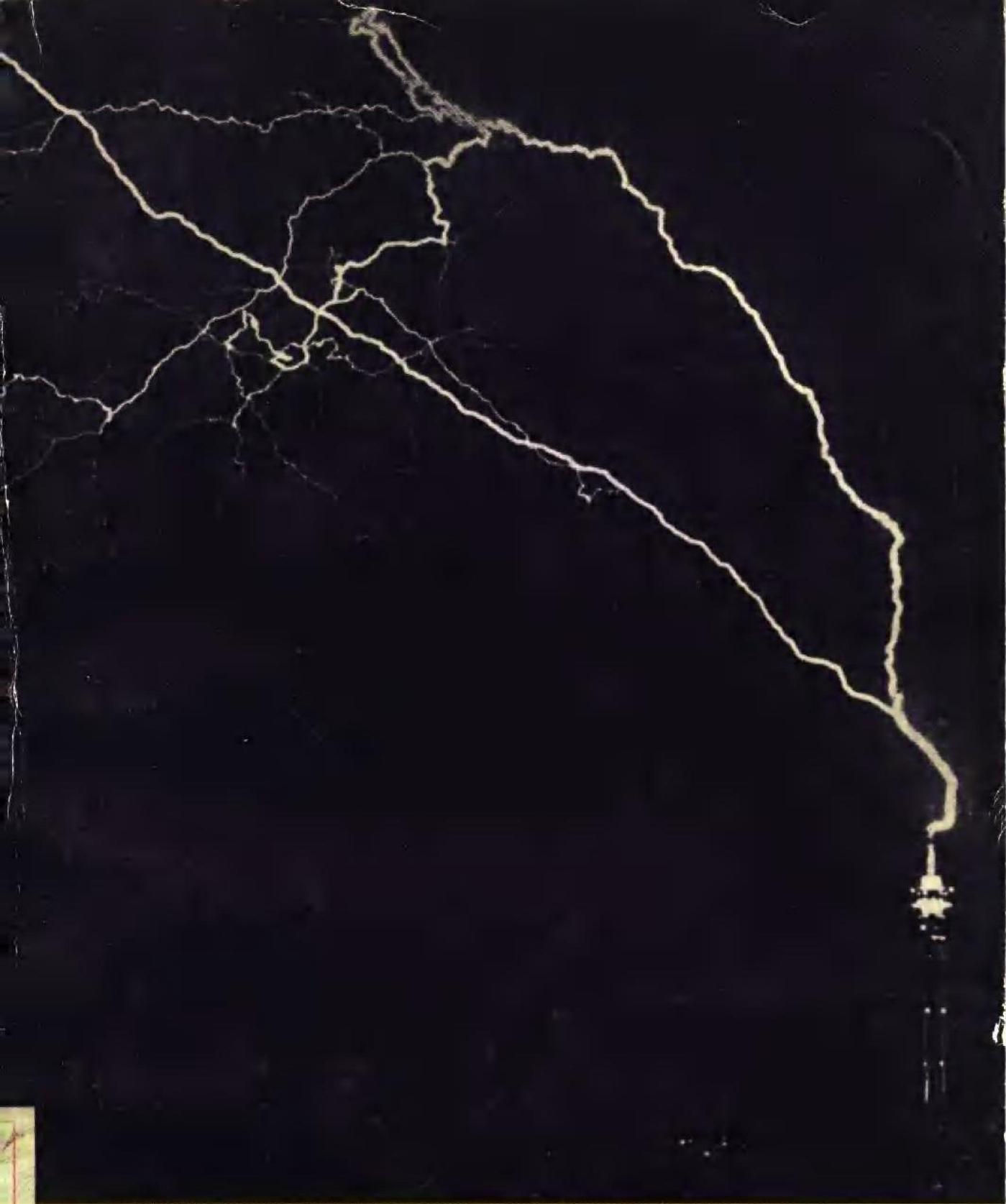




电气装置的过电压保护

刘 继

内 容 提 要

本书根据当前国内外电气装置过电压保护的实践经验,通过对大量运行统计数据和科研试验成果的分析,运用数理统计和可靠性分析的方法,对电气装置过电压保护问题做了较全面的论述;对我国500千伏超高压电网的绝缘配合、过电压保护设计条件以及超高压电气设备试验标准与方法等进行了分析讨论。全书紧密联系实际,内容丰富,论证充分,有独到见解,对从事电气装置过电压保护的科研、设计和运行人员均有参考价值。

电气装置的过电压保护

刘 继

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 27.5印张 621千字 1插页

1982年6月第一版 1982年6月北京第一次印刷

印数 00001—11020册 定价 2.25元

书号 15036·4290

前 言

电气装置的过电压保护是保证电气装置安全、稳定运行,保障人身和设备不受过电压危害的一个重要技术专业。在高压电网和330、500千伏超高压电网的建设和运行中,过电压及保护问题占有重要的地位。几十年来,在某些国家,其电网电压从高压(220千伏及以下)发展到超高压(330~750千伏),甚至发展到特高压(1000~1500千伏)。随着电网电压的不断提高,过电压及保护问题变得愈来愈突出了。可以这样说,在超高压和特高压电网技术中,如果不能合理地解决过电压保护问题,这种电网就不可能多快好省地进行建设和运行。

在50年代,我国在过电压保护和绝缘配合方面,主要是学习和应用苏、美等国的新技术。从60年代初期起,才进入从学习、沿用国外方法和标准过渡到结合我国具体情况,提出自己的计算、保护方法和标准的新阶段。这一阶段的技术具有如下特点,即:①适合我们发展中社会主义国家和发展中电网的要求;②符合我国自然条件和气候条件等实际情况;③技术数据来源于我国科学实验、现场实测和电网运行经验;④分析、计算方法和保护措施、技术标准的制订是从全面出发,彼此相互联系,而不是零星、孤立地处理问题。这些特点集中地反映在新修订的《电力设备过电压保护设计技术规程》(SDJ7-79)中,反映在我国330千伏电网的过电压保护和绝缘配合,以及正在进行的500千伏电网的科研、设计工作中。

作者总结三十年来在电气装置过电压保护方面的工作经验,特别是吸收了330、500千伏电网科研、设计工作中的成果,和近年参加修订《电力设备过电压保护设计技术规程》、《高压电气设备绝缘试验电压和试验方法》(国家标准 GB311-64)以及参加制定《工业与民用电力装置过电压保护设计技术规范》(国家标准)工作中的一些成果,并借鉴国内外当代先进技术写成本书。对过电压保护技术目前存在的问题和今后的发展前景,也作了论述和展望。

本书可供从事电气装置过电压保护科研、设计和运行工作并有一定经验的人员阅读,也可作高等院校有关专业教学参考。

需要说明的是,根据系统阐述和论证问题的需要,在本书的某几个章节中,直接引用了作者参加原水利电力部过电压保护规程和接地规程修订组工作时所撰写的一部分材料,还引用了该修订组其他一些数据和资料。在本书编写过程中,电力科学研究院王遵同志及罗松铨、杜澍椿、张之铨等同志提出许多宝贵意见;解广润同志在线路防雷方面,陈维贤同志在切合空载线内过电压方面,张大琨、许颖同志在变电所绝缘配合方面,胡修谱同志在可靠性技术方面,也都提出了有益的意见;陈莹、李静兰同志担负了大部分初稿的整理工作,对于他们的辛勤劳动,作者在此一并致谢。

作 者

一九八一年十月于北京电力设计院

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第二章 过电压保护发展的历史	11

第一篇 雷电活动和雷电参数

第三章 雷电活动、雷电参数及雷电预测、预报	19
第一节 雷云放电	19
第二节 雷暴日、雷暴小时	22
第三节 地面落雷密度及其与雷暴日数的关系	22
第四节 雷电流的概率分布、线路杆塔的雷电流概率分布	27
第五节 雷电流幅值与土壤电阻率、海拔高度的相关分析, 雷电流幅值与陡度的相关分析	29
第六节 年雷暴日数与年降水量的相关分析, 雷暴的观测、预报和消雷的研究	34

第二篇 直击雷和行波保护装置及计算

第四章 35~500千伏变电所直击雷保护的计算方法	36
第一节 传统法和击距法屏蔽计算的基本原理	36
第二节 国外的几种击距法	38
第三节 规程法	45
第四节 对几个问题的讨论	47
第五节 对几种屏蔽计算方法的对比和分析	51
第六节 工程设计采用的计算方法和直击雷保护方案	57
第五章 用避雷线保护发电厂、变电所时的技术要求和安全距离	59
第一节 技术要求	59
第二节 过电压、安全距离和绝缘子个数及串长的计算	60
第三节 避雷线分流系数	63
第四节 多根并联的绝缘避雷线	64
第五节 几个参数的取值	65
第六章 超高压避雷器的技术参数和电网对它的要求	67
第一节 现代磁吹避雷器	68
第二节 限压器(无间隙避雷器)	71
第三节 磁吹避雷器的技术参数及试验标准	73
第四节 避雷器技术参数的选定	76
第五节 超高压电网对避雷器技术参数要求	80

第三篇 电力系统的内过电压及其对断路器的要求

第七章 超高压电力系统的内过电压及保护	83
第一节 工频过电压	83
第二节 谐振过电压	86
第三节 解列过电压	88
第四节 限制内过电压的主要措施	89
第五节 超高压电网防护内过电压的几点经验	93
第八章 我国220千伏电网的内过电压水平和操作波的波形参数	94
第一节 问题的提出	94
第二节 对1972年以前部分220千伏线路内过电压水平的统计和分析	95
第三节 近年切合220千伏空载线路的内过电压水平	102
第四节 220千伏电网的操作波波形参数	105
第九章 现代高压电网对断路器的要求与切合空载线的可靠性问题	108
第一节 现代高压电网对断路器的要求	108
第二节 高压断路器切合空载线现场试验的技术要求	114
第三节 切合空载线的试验次数及其可靠性问题	118
第四节 超高压断路器的切合空载线试验问题	120

第四篇 输电线路和变电所的外绝缘及外绝缘设计

第十章 输电线路和变电所的工频闪络跳闸率及外绝缘的可靠性问题	121
第一节 输电线路和变电所的工频闪络跳闸率与泄漏比距的关系	121
第二节 空气污秽地区输电线路和变电所的泄漏比距标准及外绝缘的可靠性问题	129
第十一章 空气污秽地区输电线路和变电所的外绝缘设计	139
第一节 空气污秽地区输电线路的绝缘设计	139
第二节 空气污秽地区变电所的外绝缘设计	142
第三节 国外空气污秽地区输电线路绝缘的设计方法	148
第十二章 大盘径、大爬距、小高度绝缘子的优越性和近代高压电网对绝缘子的要求	151
第一节 绝缘子改型的依据及设计思路	151
第二节 XP3-16和XP7-7的污耐压性能及其与原有绝缘子的比较	152
第三节 采用大盘径、大爬距、小高度绝缘子对提高电网可靠性的作用	163
第四节 采用大盘径、大爬距、小高度绝缘子的经济效益	165
第五节 绝缘子的检验与可靠性问题	169

第五篇 输电线路的过电压保护

第十三章 几个主要雷电参数的计算	174
第一节 击杆率	174
第二节 绕击率	178
第三节 建弧率	187

第四节	雷电流陡度与幅值的关系及波头长度	189
第十四章	输电线路耐雷水平计算和提高山区线路耐雷水平的措施	193
第一节	110~500千伏线路的耐雷水平	193
第二节	提高耐雷水平的措施	200
第十五章	输电线路的雷击跳闸率	209
第一节	雷击跳闸率的计算	209
第二节	各级电压线路的雷击跳闸率	220
第十六章	架空线路的绝缘配合	224
第一节	杆塔上的绝缘配合	224
第二节	档距中间的绝缘配合——导地线间最小距离的确定	230
第三节	档距中间的绝缘配合——导线相间最小距离的确定	234
第四节	关于绝缘配合计算用的气象条件	236
第五节	超高压线路杆塔上绝缘配合计算中导线风偏的计算	240
第十七章	输电线路交叉部分和大跨越档的过电压保护	261
第一节	线路交叉部分的保护	261
第二节	大跨越档的保护	266

第六篇 发电厂、变电所以及其他场所电气装置的过电压保护

第十八章	直击雷的过电压保护	275
第一节	发电厂、变电所对直击雷的防护	275
第二节	微波通信站、雷达站、卫星通信地面站、电视台、广播台对直击雷的防护	286
第三节	地下通信电缆的保护	289
第十九章	雷电侵入波的过电压保护	290
第一节	大中容量变电所的保护	290
第二节	变电所3~10千伏侧的保护	299
第三节	小容量变电所的保护	300
第四节	配电变压器的保护	307
第五节	其他电气装置的保护	308
第二十章	35~500千伏变电所最小空气间隙的确定	309
第一节	按内过电压确定最小空气间隙	309
第二节	按外过电压确定最小空气间隙	314
第三节	按运行电压确定最小空气间隙	317
第四节	35~500千伏露天变电所最小空气间隙的计算	318
第五节	屋内、洞内变电所最小空气间隙的确定	326
第六节	对几个问题的讨论	328
第七节	结语	333
第二十一章	六氟化硫全封闭变电所的过电压保护及其在绝缘配合方面的特点	334
第一节	直击雷的过电压保护	335
第二节	六氟化硫全封闭变电所在绝缘配合方面的特点	335

第三节	六氟化硫全封闭组合电器试验电压的确定	336
第四节	六氟化硫全封闭变电所对雷电侵入波的过电压保护	340
第二十二章	旋转电机的过电压保护	341
第一节	直配电机的保护	341
第二节	电抗线圈的防雷作用	345
第三节	经过变压器供电的发电机的保护	346
第四节	调相机的保护接线	348
第五节	关于保护电容的应用及其可靠性问题	349

第七篇 电力系统的绝缘配合

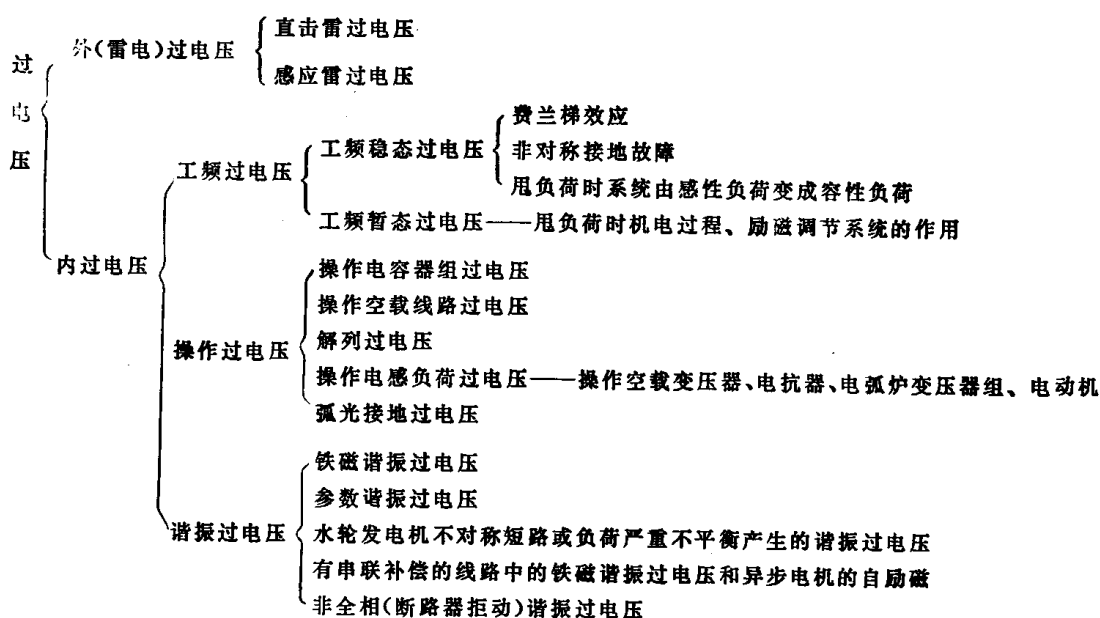
第二十三章	500千伏超高压电网的内过电压计算水平	350
第一节	相对地内过电压计算倍数	350
第二节	相间内过电压计算倍数的实测值及分析	351
第三节	相间内过电压倍数采用值	352
第二十四章	高压电网外绝缘试验和计算用操作波的标准波形	353
第一节	临界波头与间隙和绝缘子长度的关系	353
第二节	耐受电压与间隙和绝缘子长度的关系	356
第三节	试验和计算用操作波的标准波形	358
第四节	各国采用的标准波形	362
第五节	结语	362
第二十五章	用于500千伏电气设备绝缘配合的避雷器冲击电流标准	363
第一节	雷击远方线路时通过避雷器的冲击电流	363
第二节	近区雷击时通过避雷器的冲击电流	364
第三节	避雷器冲击电流的概率曲线	365
第二十六章	500千伏电气设备的绝缘配合系数	369
第一节	影响绝缘配合的几种因素	369
第二节	国外500千伏电气设备绝缘配合系数	373
第三节	绝缘配合系数的校验	374
第四节	选定绝缘配合系数的其他考虑	377
第二十七章	500千伏开关设备同极断口间的反相试验电压标准	378
第一节	开关设备断口间可能承受的电压	378
第二节	开关设备断口间的试验电压	379
第三节	电网运行经验	381
第二十八章	变压器类电气设备的截波试验标准	382
第一节	几个地区产生截波的实例	382
第二节	变电所截波过电压的产生根源及截波发生率	384
第三节	对截波过电压的若干分析	390
第四节	关于500千伏变压器和电抗器的截波试验标准问题	392
第五节	对国外关于截波试验争论问题的几点看法	392

第二十九章	500千伏电气设备的试验电压	394
第一节	500千伏变电所的保护接线	394
第二节	设备相-地间试验电压和开关设备断口间试验电压计算	394
第三节	三相变压器、电抗器的相间试验电压	394
第四节	对500千伏断路器和避雷器的技术要求	398
第五节	500千伏电气设备的试验电压	400
第三十章	高压电力系统绝缘配合的全工况可靠性法	401
第一节	研究和应用可靠性技术的意义	401
第二节	可靠度、失效率和其他参数	402
第三节	输电线路绝缘和变电所以及全系统绝缘的可靠性	404
第四节	关于变压器类电气设备的绝缘试验电压与可靠性问题	407
第五节	断路器开断失败后的后效问题——电网可靠性的马尔柯夫过程	416
参考文献		418

第一章 绪 论

电力系统的安全、稳定运行，取决于该系统过电压出现的频度、绝缘水平及工作情况，以及过电压保护装置的性能等因素。因此，为了提高电力系统的可靠性和经济性，高电压工作者必须对过电压的机制及其出现的频度、绝缘水平的合理选择，以及有效的过电压保护措施进行研究。随着电压等级的不断增高，正常运行状态下的工频电压对绝缘的作用，包括工作电压对电网外绝缘泄漏距离的要求、对线路和变电所空气间隙的要求，以及对变压器类电气设备和套管内绝缘的影响（局部放电和老化）等，引起了高电压工作者的广泛重视。

过电压分外过电压和内过电压两种。外过电压是由雷击引起的。内过电压则是由于系统参数发生变化时的电磁能的振荡和积聚所引起的。过电压按其产生的原因可分为如下几类：



雷电过电压，既然属于外过电压，似与系统结构无关，其实不然。随着电力系统的发展，雷电过电压及其防护也在发展。例如，超高压（330~750千伏级）和特高压（1000~1500千伏级）输电的出现，特别是近年来电网的高度发展，引起多回路杆塔的广泛应用，线路杆塔高度已达40~70米，过电压机制有所变化，对防雷问题提出了新的要求。新设备的出现，如六氟化硫全封闭组合变电所和新型晶体管继电保护的出现，也需对变电所的雷电过电压及防护进行新的研究，提出新的保护措施和保护装置。至于内过电压及其防护，则完全依电力系统的结构和电压等级而异。所以，自1891年出现第一条15千伏高压输电线路以来，过电压保护技术随着电力系统的发展而有着巨大的发展。图1-1是输电电压的发展和过电压保护装置发展的轮廓^[1-1]。可以看出，九十年来，输电电压大约每十年升高一级；过电压保护装置，从19世纪80年代的第一只保护间隙到今天的无间隙避雷器，已经

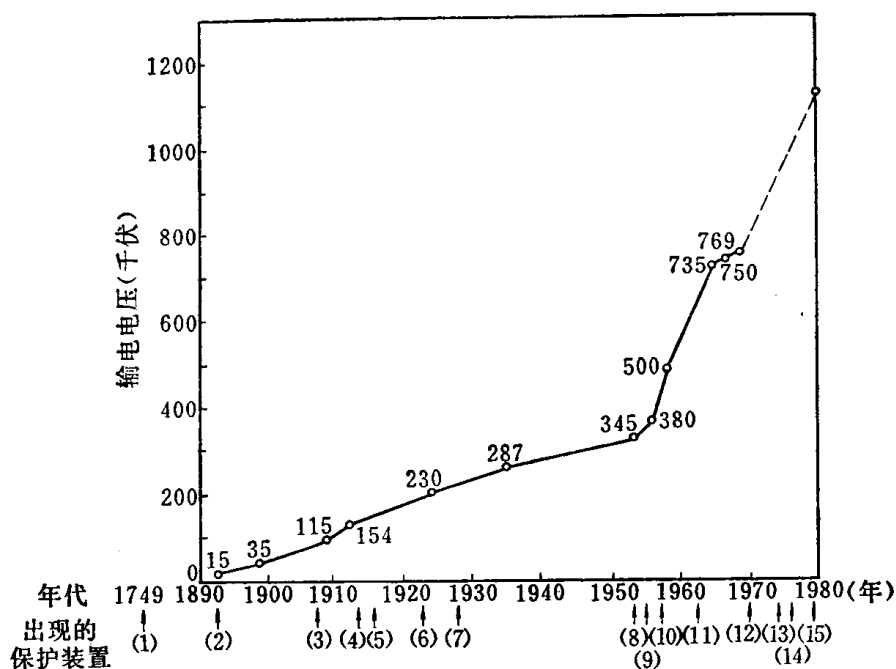


图 1-1 电网输电电压的增长以及过电压保护装置出现的时期

1—避雷针；2—间隙、磁吹避雷器（间隙）；3—铝、铅电解避雷器，电感线圈，电容器，中性点直接接地；4—接地的避雷线；5—消弧线圈；6—自动阀型避雷器，管型、丸型避雷器，自动重合闸；7—契利特阀型避雷器；8—断路器并联电阻，超高压并联电抗器；9—磁吹避雷器；10—电磁式电压互感器，限压饱和电抗器，并联电抗器；11—火花控制电抗器；12—无间隙避雷器；13—消雷器（电离锥体）；14—同步断路器；15—可控电抗器，静止补偿器，多柱避雷器

发展了二十多种（详见第二章）。

各国在过电压保护和绝缘配合方面，总的说来，是沿着下列途径前进的^① [1-15]。

1. 限制操作过电压

输电线路绝缘应能保证在雷电过电压、操作过电压和运行电压下安全运行。随着输电电压的增高，线路绝缘相应加强，而雷电过电压却不是相应增高。因此，有良好避雷线的超高压线路，在一般情况下，雷电过电压已不像较低电压线路那样严重。与此相反，操作过电压却大体与输电电压成比例增高。特别是超高压线路长度大，在变电所中的出线回数少，工频过电压较严重，操作过电压也就相应变得严重。图1-2为A.H.Hileman对各种电压等级下绝缘距离的试验研究结果。可以看出，为达到经济的等绝缘强度设计，应使按雷电过电压和按操作过电压所选的绝缘距离大体相等。由图可知，为使两者大体相等，对最高运行电压为362、550、750、1100千伏的线路，其操作过电压应分别限制在2.7，2.0~2.2，1.7~1.8以及1.6倍以下。在空气不污秽的条件下，对于每千伏最大运行线电压取2.1厘米/千伏的情况，在750千伏及以下，按工作电压所选的绝缘距离也大体与雷电和操作过电压要求的数值相等。但在更高的电压下或空气污秽地区，则工作电压要求有更大的绝缘距离。

① 系参考东北电业管理局技术改进局（简称东电技术改进局，下同）王遵《国外高压输电电压的发展》1973年2月。

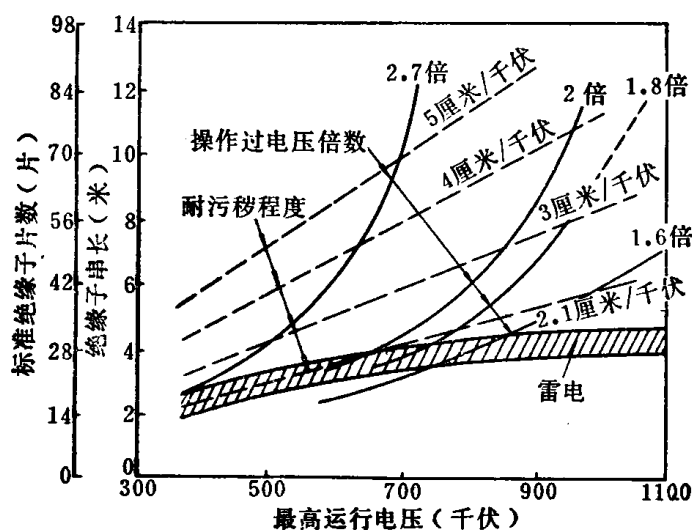


图 1-2 各种最高运行电压下所需的绝缘距离

雷电过电压下的绝缘距离, 每年35雷暴日时, 每100公里年跳闸0.6次;
操作过电压下的绝缘距离, 闪络概率为0.13%(临界闪络电压减去3个标准偏差)

50年代以来, 气吹和有低值分闸电阻的断路器防止了触头间的电弧重燃, 将操作过电压限制到2.8~3倍, 磁吹避雷器也能将操作过电压限制到2.8倍以下, 这就为降低330~400千伏电网的绝缘水平创造了条件。苏联利用新型磁吹避雷器, 将500、750千伏电网的操作过电压分别限制到2.5和2.1倍以下。美国采用有低值合闸电阻的断路器, 进而把500~765千伏电网的操作过电压限制到2倍以下, 近年研究在断路器中采用多级或指数合闸电阻, 或采用同步断路器选相合闸, 将操作过电压限制到1.6倍以下, 成为实现1000~1500千伏特高压输电的基础。

图1-3绘出了超高压系统50年来操作过电压降低的情况。图1-4为美国电力公司(AEP)

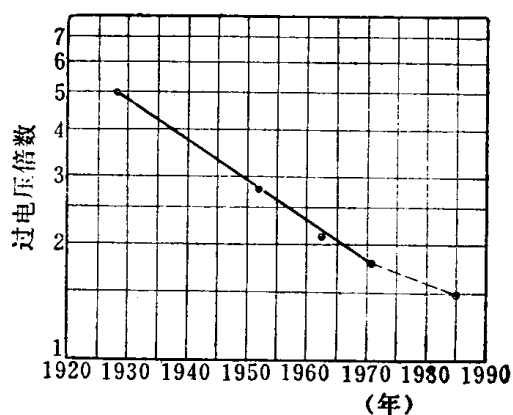


图 1-3 超高压系统50年来
操作过电压降低的情况

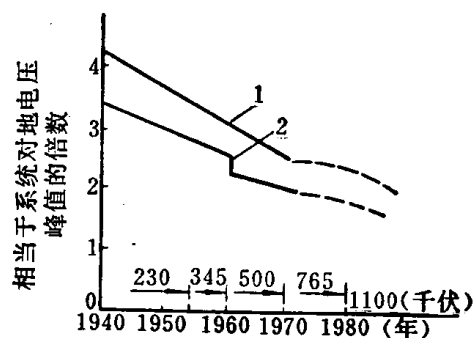


图 1-4 美国AEP系统避雷器冲击保护水平
和变电所基准冲击绝缘水平(BIL)的发展
1—避雷器冲击保护水平; 2—变电所基准冲击绝缘水平

避雷器保护水平和变电所基准冲击绝缘水平的发展。图1-5是各国超高压系统避雷器保护水平和变电所基准冲击绝缘水平的发展。图1-6则是各国500千伏变电所内、外绝缘基准冲击水平20年来变化的情况。可以看出, 近年绝缘水平的降低渐趋缓慢, 特别是外绝缘, 甚

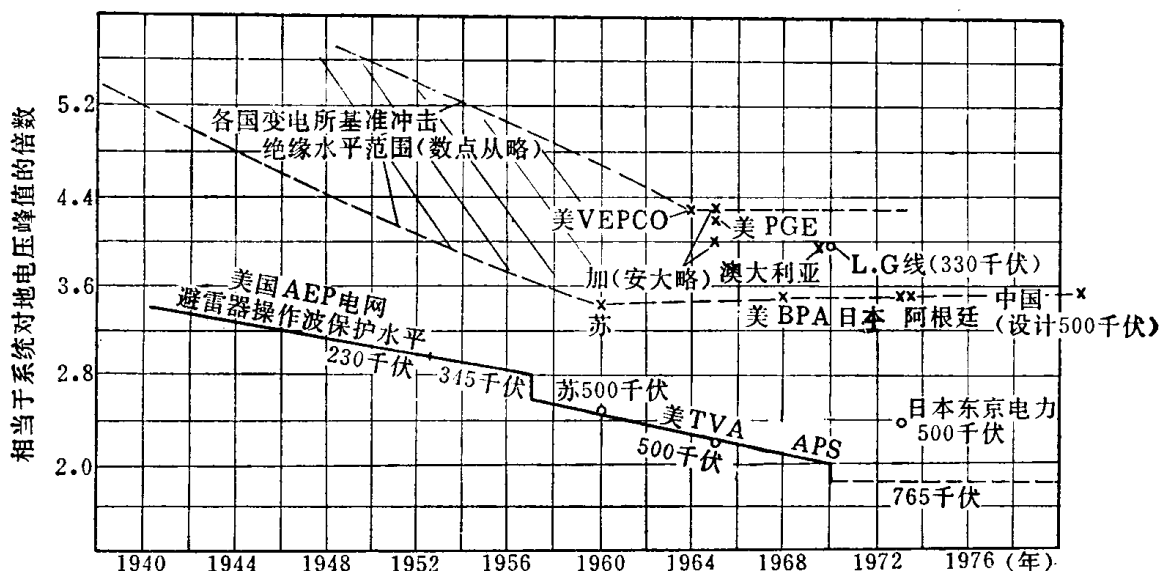


图 1-5 各国超高压系统避雷器保护水平和变电所基准冲击绝缘水平的发展

AEP—美国电力公司, VEPCO—(美国)弗吉尼亚电力公司, TVA—(美国)田纳西流域管理局, PGE—(美国)太平洋煤气电力公司, APS—美国亚利桑纳电力系统, BPA—(美国)邦维尔电力管理局

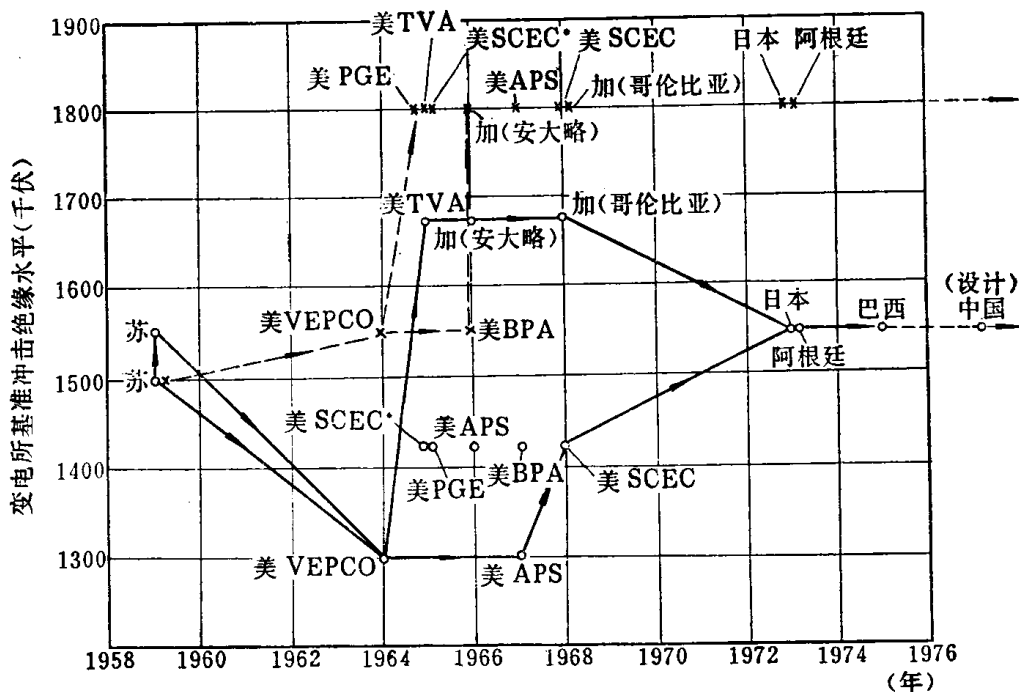


图 1-6 各国500千伏变电所内、外绝缘基准冲击水平20年来的变化

SCEC—(美国)南加利福尼亚爱迪生公司, SCEC*—(美国)中南部电力公司, 其余符号同图1-5
(实线为变压器内绝缘, 虚线为电器外绝缘)

至出现了下降过头, 再度升高的情况, 如美国就是这样。我国则从1964年设计 330 千伏电网时开始, 就注意到降低绝缘水平的适度性问题, 直到近年设计500千伏电网, 也已注意根据具体情况, 选择合理的绝缘水平, 避免降而复升的情况^[1-2, 1-3]。我国设计中的第一批500千伏电网, 均按2.5倍内过电压水平设计。现正研制和试验大泄漏距离绝缘子、500 千伏断路器用低值线性陶瓷分 合闸并联电阻以及性能良好的磁吹避雷器, 并研究输电

线路的概率法绝缘配合,为建设2.0~2.2倍内过电压水平的500千伏电网创造条件。

2. 限制工频过电压

操作过电压是在工频过电压的基础上发展起来的。所以,一方面,为限制操作过电压,往往首先要将工频过电压限制到一定幅值以下;另一方面,在操作过电压大大降低以后,工频过电压又变成突出的问题,特别是在长距离输电线路,如无有效措施,工频过电压甚至高达1.7~2.1倍。故在500千伏及以上电网,限制工频过电压已成为引人注目的课题。除建设开闭所、采取有利的操作顺序外,采用超高压并联电抗器则是限制工频过电压的有效措施。后来发展起来的火花投入电抗器和近年正在发展的可控电抗器、可控电抗变压器、由可控电抗器(或可控电抗变压器)和电容器组并联组成的可控静止无功补偿器^①、以及我国正在研究的良好导体避雷线等,都能进一步限制工频过电压^[1-9,1-10,1-11]。根据我国的经验,将330、500千伏变电所母线的工频过电压限制到不超过1.3倍,线路末端不超过1.5倍是必要的和可能的。如再进一步降低工频过电压,在技术上则有较大困难,在经济上往往也不合理。

3. 按长期运行电压的要求适当加强绝缘

随着电压等级的提高和绝缘水平的降低,长期运行电压对电网外绝缘和电气设备内绝缘愈来愈起较大的作用。为保证安全运行,需按长期运行电压的要求适当加强绝缘。

50年代初期,我国分析了东北220千伏线路铁塔上的空气间隙,在大风时被运行电压击穿的一次事故之后,规定在线路设计中应校验最大设计风速时运行电压所需的杆塔上的间隙距离。随后苏联,再后日本等国也作了相应的规定。

1962~1963年,我国几个科研单位,对一些降低了绝缘水平的线路的工频闪络事故和占全国80%左右的110~220千伏线路的运行经验做了重点分析,并在这个基础上,得出了工频闪络跳闸率与泄漏比距的定量关系(曲线),见图1-7^[1-2]。这说明,为得到一定的运行可靠性,线路绝缘首先应满足运行电压的要求。1968年以后,美国、加拿大、苏联的文献也相继改为首先按运行电压所要求的泄漏距离来选定线路绝缘,然后再校验操作过电压对绝缘的要求。J.K. Dillard 1966年也曾提出,使线路绝缘受到威胁的三种电压,即运行电压、操作和雷击过电压都是必须考虑的^[1-6]。这就要求改进绝缘子的造型。近年我们同制造、科研部门协作研究的大泄漏比距绝缘子,使高度为146毫米的绝缘子具有340毫米的泄漏比距,比标准绝缘子增大泄漏距离20%。在不增加绝缘子的条件下,使110~220千伏绝缘的泄漏比距达到1.8~2.2厘米/千伏。污耐压试验证明,其污耐压强度与泄漏距离基本成比例增大。这就大大延长了线路的清扫周期和提高了线路的可靠性。

我们在文献1-2、1-3中曾指出,变压器等设备的内绝缘,在雷电过电压和内过电压防护措施不断完善、绝缘水平不断降低的条件下,运行电压对绝缘的要求(局部放电和绝缘老化)是必须予以重视并应设法解决的问题。后来,国外超高压大容量变压器的绝缘事故和我国变压器在无过电压情况下的绝缘事故证实了这一点。因此,现在各国都规定了各种设备局部放电的标准。关于超高压和特高压变压器、电抗器、电流互感器、结合电容器、

① 电力工业部电力科学研究院李岱,《可控电抗器及其在超高压电网中的应用》1980年7月。

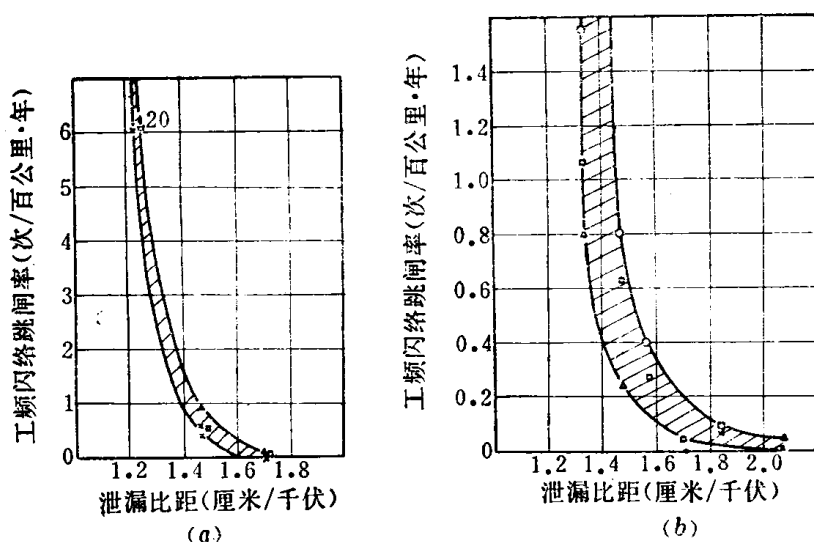


图 1-7 110、220千伏线路工频闪络跳闸率与泄漏比距的关系^[1-2]

(a)110千伏线路; (b)220千伏线路

○—东电技术改进局的数据; ×—电力建设研究所的数据(干燥地区); △—电力建设研究所的数据(潮湿地区); □—电力科学研究院的数据

断路器等的允许工频过电压倍数及允许持续时间, 近年也已引起一些国家的重视。苏联对330、500千伏设备规定了相应的标准。近年美国对500千伏设备也规定了大体与苏联相近的标准。西德、法国、日本对一些超高压设备也有类似的规定。这些标准, 不仅考虑了在运行过程中, 工频过电压对绝缘的影响, 而且还考虑了在工频过电压下, 变压器类由于过激励引起的激磁电流猛增所造成的过热及其对绝缘的局部放电和老化的影响。我国对330、500千伏电气设备也做了相应的规定。

4. 选定合理的绝缘水平

选定绝缘水平是绝缘配合的一项重要任务。我们在文献1-2中曾指出, 所谓绝缘配合, 就是正确处理各种过电压与各种限压措施之间, 各种过电压与各种绝缘抗电强度之间的固有的复杂矛盾。对于不同的电网结构、不同的地区、不同的电气设备和保护设备的制造水平, 这些矛盾的表现形式及其所处的地位不同, 主要矛盾也在不断转化。因此, 不能像过去文献中那样静止、抽象、孤立的说由哪一种过电压来决定电网绝缘水平。例如, 我国110~220千伏线路, 采用原有的绝缘子结构, 并减少了绝缘子个数之后, 运行电压要求的泄漏比距就成为选定线路绝缘水平的决定性因素; 而当我们改善了绝缘子的造型, 采用大泄漏距离绝缘子之后, 情况就会改变。

各国在选定新出现的高一级电压电网的绝缘水平时, 一般都是考虑到初期出线回路数少, 操作过电压水平高, 供电重要性大, 而且实践经验不足, 而将绝缘水平留有一定裕度, 以待电网发展, 并取得一些经验之后, 再降低绝缘水平。例如, 瑞典建设380千伏线路, 1954、1958年分别比1952年减少1和3个绝缘子; 变压器绝缘水平1954年降低2级, 1958年又降低1级, 比1952年约降低20% (见表1-1); 澳大利亚第一条330千伏线路和芬兰第一条380千伏线路, 也采用了比当时其他国家高10~20%的绝缘水平, 这些国家都考虑

了当线路的回路数增加后再降低绝缘水平。又如，加拿大第一代500千伏线路按2.5倍过电压设计，第二代线路按2倍过电压设计，正在建设的第三代线路则按1.7倍设计。其735千伏电网，1962~1963年第一期工程的变压器、电抗器冲击绝缘水平采用2050千伏。1966~1967年建设的电网，已将冲击水平降低到1950千伏。

表 1-1

瑞典380千伏电网绝缘水平的降低情况

年 度	线路绝缘, $\phi 280 \times 170$ 毫米 绝 缘 子 个 数	变 压 器 绝 缘	
		湿 态 冲 击 耐 压 (千伏)	操作过电压水平 (相电压倍数)
1952	20(+2) ^①	1775	3.9
1954	19	1500	3.3
1958	17	1400 ^②	3.0

① 实用20个，铁塔留有裕度，需要时可增加两个。

② 为干态冲击耐压。

苏联的做法由于历史原因而略有不同。它是在400千伏线路升压500千伏后，对新建线路也采用较低绝缘水平，而用加强保护措施来保证电网安全运行。

在现代超高压和特高压线路设计中，选定绝缘水平，除根据污染情况按工作电压和操作过电压选定绝缘子串长度外，还选定间隙距离，亦即根据线路可靠性评估选定绝缘子串-空气间隙综合绝缘和塔头尺寸。例如，在选定绝缘子串长度之后，利用电子数字计算机算出雷击跳闸率0.2, 0.4, 0.6次/百公里·年所要求的雷电间隙，再算出闪络概率为0.1, 0.01, 0.001的操作过电压间隙，再算出10, 20, 100年一遇的工作电压间隙。综合上述三种工况，即可划出塔头间隙配合图（如图1-8），包括平均无故障工作时间为 m_1 、 m_2 （举例）的具有不同可靠性的间隙包络线图●。在500千伏线路，特别是1000~1500千伏特高压线路，每条所需钢材达万吨之巨，合理选定塔头尺寸，对安全运行和建设的经济性，都是非常重要的。

5. 用概率法计算故障率

1961年J. G. Anderson提出了利用电子数字计算机仿照博奕过程计算耐雷性的方法——Monte Carlo法。其原理是由计算机产生代表雷电流幅值、波头长度等统计量，计算线路耐雷性，验算和确定线路绝缘水平，校验防雷措施的效能^[1-7]。1962年，我国利用概率论方法，提出了考虑雷电流幅值和陡度两个随机变量的线路雷击跳闸率计算方法。用这种分析法计算危险参数曲线和跳闸率，同过去取某一固定陡度计算耐雷水平和跳闸率相比，更能符合实际，在高杆塔线路和超高压线路更是如此^[1-8]。1964年，Anderson-Barthold又提出了一个新程序——METIFOR，即“气象上的综合预测”。它利用拟建线路沿线的全部气象因素，对线路故障进行预测。所依据的是最靠近线路的一级气象站过去每小时的

● m_1 、 m_2 等不同可靠性的间隙包络线图并不是唯一的。根据塔头耗钢量在各部位的敏感程度的不同，也可加大或减小某一部位的间隙尺寸。例如上部加大间隙，下部即可减小间隙，而使平均无故障工作时间 m_1 、 m_2 不变。在杆塔设计上采用这一做法是1979年12月在厦门召开的过电压保护会议上王遵工程师首先提出的。

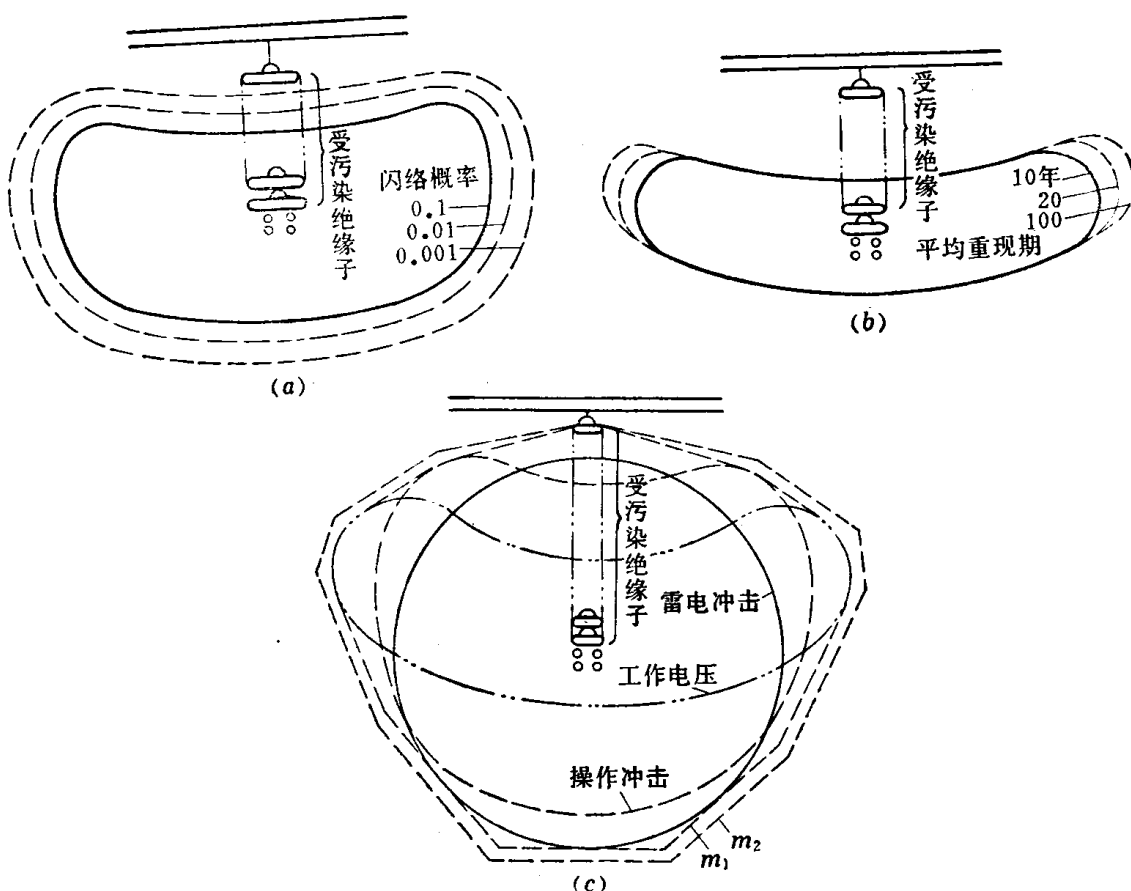


图 1-8 塔头间隙配合图^[11-14]

(a)操作过电压间隙；(b)工作电压间隙；(c)综合间隙(m_1 、 m_2 为平均无故障工作时间，
每条线路·年)

记录结果，包括降水强度及其类型、雷暴活动程度、空气密度、湿度、风向和风力。从这些数据不仅要推算出实际的统计量和它们随时间的变化，而且还要推算出它们之间在该具体位置下自然出现的联系。此程序将绝缘各小时受气候影响的变化与雷电电压、操作冲击电压以及工频电压相比较，求出线路故障率。这种为拟建线路路径的气候编制数字模型的方法，使计算更精细了一步。如原始数据可靠，可充分考虑各种严重条件同时出现的低概率，得出符合实际的故障率数据，正确地判断保护措施的效果和线路运行可靠性，选出最优设计方案。

6. 用全工况可靠性法进行绝缘配合计算

近年在绝缘配合方面有了很大进展，如较广泛地应用了概率论方法和电子计算机技术，考虑了全部气候因素，进行了全尺寸外绝缘试验，并在数理统计的基础上积累了大量有用的数据，较广泛地考虑了操作过电压和雷击过电压的随机过程和统计特性，等等。但是，尚有很多不足之处，如：①只计算了电力系统的一两个环节，如线路和变电所的外绝缘，而未全面分析发电机-升压变电所-线路-受电系统的全部环节和各保护体系，以及各环节间的合理配合；②只计算了电力系统的个别工况，如操作过电压或雷击过电压，而未能包括系统运行的全部工况，其中长期运行电压、工频过电压、谐振过电压对系统绝缘的作用，都还没有考虑或很少考虑，而系统中的大量绝缘事故(在有些系统是占半数以上)

却是在这几种工况下发生的；③只进行了系统中个别部分的技术经济分析，未能对电力系统绝缘配合的各个方案作全面的技术经济分析，得出定量的结论，特别是近年发展起来的可靠性理论、可靠性技术、最优化技术等新技术，在绝缘配合中还很少应用。

鉴于这种情况，作者提出了全工况可靠性绝缘配合法。在第30章概要地介绍了可靠性法的基础内容。

7. 特高压输电的研究和发展

70年代以来，国外对1000千伏及以上特高压输电积极开展科研工作。例如，美国电力公司和瑞典ASEA就联合开展了这项研究工作。两公司自1969年开始，用8年时间分三个阶段进行研究，其内容和进度如图1-9所示。

第一阶段着重基础研究，如长间隙和长绝缘子串的绝缘特性，限制过电压的措施和无线电干扰等。通过研究认为，电压高到1500千伏的交流输电是可以实现的（后来的研究又认为，高到2000千伏，也是可以实现的）。第二阶段为除继续进行基础研究外，制造试验性变压器，研究试制各种电器，设计输电线路并建设试验线路。第三阶段建设包括两端变电所在内的单相工业性试验线路，以便对变压器、电器和线路用三年时间进行验证性试验。如果需要，再建成三相工业性试验线路，进行验证性试验。通过研究试验，得到必要的的数据，以便进行1000~1500千伏特高压输电线路和变电所的设计。

由图1-9还可看出，变压器的研究设计和制造需要5年时间。包括断路器、避雷器试制在内的限制操作过电压的研究，要在一开始就作为重点课题来研究，以便为以后的工作提供数据。线路和变电所结构的设计和试制，与变压器同时完成，在后期要用较多的投资。

为开展高压输电技术的研究工作，国外建设了很多高压试验站和一些工业性试验线路。这种线路除传输容量较小、距离较短外，与正常输电线路基本相同。通过工业性试验站、试验线路的建设和运行，可以取得设计、制造、施工和运行的经验，并对试制的设备和线路进行运行考核。早在1956~1957年，美、加、法等国的电力公司就曾建设362千伏工业性试验线路。在750~2000千伏的更高电压输电研究中，这种用于考核设备和线路的方式，还在继续使用。

1976年6月，美国在印第安纳州的世界上第一个2250千伏交流试验装置投入运行（图1-10）。此装置是美国动力联合组织——美国电力公司（AEP）和瑞典ASEA公司的联合计划的最后阶段。除主要设计单位外，还有美国、加拿大、意大利、法国等公司 and 研究单位参与完成部分工作^[1-12]。图1-11是一相试验线路的纵向情况。表明了固定18根分裂导线和直径为122厘米的圆形支撑板。

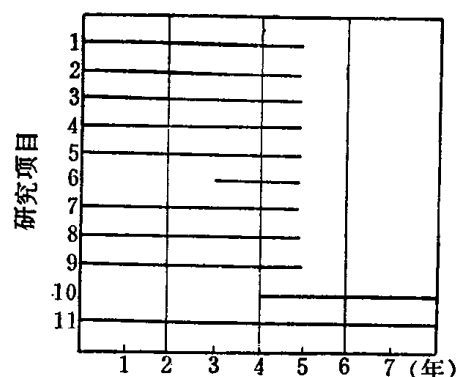


图 1-9 美国电力公司和瑞典ASEA的特高压输电研究计划

- 1—系统构成；2—限制内过电压；3—绝缘；
- 4—电晕和无线电干扰；5—变压器研究；6—
- 变压器设计、制造；7—测量和检查装置；
- 8—继电器与控制电路；9—线路和变电所结构；10—试验线路；11—计划的推进和评价