



中华人民共和国国家标准

GB/T 28547—2012

交流金属氧化物避雷器选择和使用导则

Selection and application recommendations
of metal oxide surge arresters for a. c. systems

(IEC 60099-5:2000, NEQ)

2012-06-29 发布

2012-11-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	V
1 总则	1
1.1 范围	1
1.2 规范性引用文件	1
1.3 避雷器应用总则	2
2 避雷器的发展过程、基本性能和应用	2
2.1 避雷器的发展	2
2.2 不同设计和类型的避雷器及其电气及机械特性	3
2.2.1 无间隙金属氧化物避雷器	3
2.2.2 内串联间隙金属氧化物避雷器	10
2.2.3 带外间隙线路避雷器(EGLA)	11
2.3 避雷器的应用	14
2.3.1 高压变电站避雷器	14
2.3.2 配电系统避雷器	20
2.3.3 线路避雷器(LSA)	22
3 绝缘配合和避雷器的选择	22
3.1 引言	22
3.2 绝缘配合概述	23
3.2.1 绝缘配合程序	23
3.2.2 过电压	23
3.2.3 绝缘配合	27
3.2.4 绝缘配合研究	30
3.3 避雷器的选择	32
3.3.1 高压变电站选择避雷器的一般步骤	32
3.3.2 特高压(UHV)避雷器	38
3.3.3 配电系统避雷器的选择	40
3.3.4 线路避雷器的选择和使用	41
3.3.5 选择电缆保护用的避雷器	51
3.4 正常和异常运行条件	52
3.4.1 正常运行条件	52
3.4.2 异常运行条件	52
4 特殊用途的避雷器	55
4.1 变压器中性点用避雷器	55
4.1.1 总则	55
4.1.2 全绝缘变压器中性点过电压保护	56
4.1.3 分级绝缘的变压器中性点过电压保护	56
4.2 相间避雷器	56

4.3	旋转电机用避雷器	58
4.4	多只避雷器的并联	58
4.4.1	总则	58
4.4.2	与有间隙 SiC 避雷器并联安装	59
4.5	保护并联电容器组用避雷器	59
4.6	保护串联补偿电容器组用避雷器	60
5	避雷器的资产管理	60
5.1	总述	60
5.2	避雷器的管理	60
5.2.1	资产数据库	60
5.2.2	技术参数	60
5.2.3	关键备品	61
5.2.4	运输和存储	61
5.2.5	调试	61
5.3	维护	61
5.3.1	避雷器外套污秽	62
5.3.2	避雷器外套的涂层	62
5.3.3	脱离器的检查	62
5.3.4	线路避雷器	62
5.4	性能和诊断工具	62
5.5	寿命终结	63
5.5.1	GIS 避雷器	63
5.6	处理和循环使用	63
附录 A	(资料性附录) 确定由于接地故障产生的暂态过电压的方法	64
附录 B	(资料性附录) 研究绝缘配合和能量要求用的避雷器模拟技术	67
附录 C	(资料性附录) 运行中金属氧化物避雷器的诊断	70
C.1	概述	70
C.2	全电流的测量	72
C.3	阻性电流的测量	73
C.4	MOA 制造厂提供的信息	77
附录 D	(规范性附录) 术语和定义	78
附录 E	(资料性附录) 带间隙 SiC 避雷器的寿命终结和替换	86
E.1	简介	86
E.2	SiC 避雷器的设计和运行	86
E.3	故障原因和老化现象	86
E.4	监测避雷器状态的可能性	87
E.5	提前计划更换的优点	88
E.6	更换问题	88
参考文献		90
图 1	三机械柱/一电气柱(左)和单柱设计(中)及三机械柱/一电气柱电流路径(右)示意图	7

图 2	内间隙金属氧化物避雷器设计	10
图 3	EGLA 组成	12
图 4	EHV/UHV 以及 HV 带均压环和防电晕环避雷器	15
图 5	支架避雷器和悬挂于钢结构的避雷器	15
图 6	雷电冲击电流产生电感压降的示例	17
图 7	无接地网避雷器安装(配电系统)	17
图 8	有接地网避雷器安装(高压变电站用)	18
图 9	机械负荷定义	19
图 10	带脱离器和绝缘支架的配电系统避雷器	20
图 11	三种接地方法	21
图 12	典型的电压及持续时间(大致相当于 500 kV 电压等级的工况)	23
图 13	避雷器伏安特性	25
图 14	选择避雷器进行绝缘配合的典型步骤	31
图 15	选择避雷器的标准流程	32
图 16	避雷器工频电压耐受时间特性	34
图 17	雷电直击在有线路避雷器的一相上	42
图 18	雷击在安装有线路避雷器的架空地线和杆塔上	42
图 19	选择无间隙线路避雷器的流程图	44
图 20	选择带间隙线路避雷器流程图	48
图 21	六组连接	57
图 22	星型连接	57
图 23	四星型连接	57
图 A.1	接地故障因数 k 与 X_0/X_1 的关系($R_1/X_1 = R_1 = 0$)	64
图 A.2	接地故障因数 k 为不同常数下, R_0/X_1 与 X_0/X_1 之间关系($R_1 = 0$)	65
图 A.3	接地故障因数 k 为不同常数下, R_0/X_1 与 X_0/X_1 之间的关系($R_1 = 0.5X_1$)	65
图 A.4	接地故障因数 k 为不同常数下, R_0/X_1 与 X_0/X_1 之间的关系($R_1 = X_1$)	65
图 A.5	接地故障因数 k 为不同常数下, R_0/X_1 与 X_0/X_1 之间的关系($R_1 = 2X_1$)	66
图 B.1	避雷器电压测量环等值电路	67
图 B.2	残压随电流视在波前时间减小而增加	68
图 B.3	绝缘配合分析用避雷器模型——快波前过电压和预计算(选择 1)	69
图 B.4	绝缘配合分析用避雷器模型——快波前过电压和预计算(选择 2)	69
图 B.5	绝缘配合分析用避雷器模型——缓波前过电压	69
图 C.1	在实验室条件下金属氧化物电阻的典型全电流	71
图 C.2	避雷器典型全电流	71
图 C.3	金属氧化物电阻片的典型电压电流特性	72
图 C.4	阻性电流的增加对全电流的影响	73
图 C.5	用投影法得到 I_{R1}	73
图 C.6	在持续运行电压 U_c 下的容性电流补偿后的剩余电流	76
图 E.1	SiC 避雷器内部结构	86
表 1	最大允许水平拉力 F	19
表 2	电力系统可能出现的典型过电压	24
表 3	典型的电站用避雷器参数	35

GB/T 28547—2012

表 4	避雷器的分级	36
表 5	按避雷器标称放电电流和用途分类	36
表 6	1 000 kV 变电站金属氧化物避雷器主要技术参数	38
表 7	典型的无间隙线路避雷器参数	47
表 8	典型带间隙避雷器本体的电气参数	49
表 9	带间隙线路避雷器本体的电流冲击耐受试验推荐值	50
表 10	带间隙避雷器雷电冲击放电电压和操作湿耐受电压性能推荐值	50
表 11	不同故障下变压器中性点的工频过电压	55
表 B.1	垂直圆柱体的计算等效电感	67
表 C.1	运行中 MOA 的测试结果	74
表 C.2	MOA 运行状况判断表	75

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用重新起草法参考 IEC 60099-5:2000《避雷器 第 5 部分:选择和使用导则》和 IEC 37/361/CD (IEC 60099-5 Ed 2.0:2009),并结合我国的实际情况起草。文本结构与 IEC 60099-5 Ed 2.0 相同,但内容作了许多修改,与 IEC 60099-5:2000 的一致性程度为非等效。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国避雷器标准化技术委员会(SAC/TC 81)归口。

本标准负责起草单位:中国电力科学研究院、国网电力科学研究院、西安高压电器研究院有限责任公司。

本标准参加起草单位:西安交通大学、东北电力科学研究院有限公司、广东电网公司电力科学研究院、陕西电力科学研究院、国家绝缘子避雷器质量监督检验中心、西安西电避雷器有限责任公司、南阳金冠电气有限公司、电科院东芝避雷器有限公司、深圳市银星电气股份有限公司、抚顺电瓷制造有限公司、中能电力科技开发有限公司、上海电瓷厂、温州益坤电器有限公司、重庆电力科学试验研究院。

本标准主要起草人:李启盛、王保山、王新霞、郭洁、陈立栋、颜文、钟定珠、张翠霞、谢秀余、王维州、张宝全、何计谋、龚正全、苏宁、熊易、车文俊、田恩文、张家骞、伍本才、徐学亭、朱树立、黄勇、程文怡、李凡、印华、张博宇、宋继军、刘飞。

交流金属氧化物避雷器选择和使用导则

1 总则

1.1 范围

本标准提出了标称电压大于 1 kV 的交流系统用避雷器的选择以及应用建议。这些建议适用于 GB 11032 中定义的交流无间隙金属氧化物避雷器,GB/T 28182—2011 中定义的额定电压 52 kV 及以下带串联间隙避雷器,以及 IEC 60099-8、DL/T 815—2002 和 JB/T 10497—2005 中定义的用于架空输电线路和配电线路的带串联外间隙金属氧化物避雷器。

GB 311.1 和 GB/T 311.2 中给出了电力系统绝缘配合的原则。绝缘配合是确保高压电网和变电站的设计和运行的安全性、可靠性、经济性以及风险管理的过程,使用避雷器使得系统和设备在一定的绝缘水平上,有一个可以接受的风险,并使经济损失最小。

引进分析模型和电力系统暂态仿真进一步优化设备绝缘水平的选择。在电力系统设计和运行中,避雷器的选择变得越来越重要,应当认识到:电力系统和设备的可靠性取决于用户在设计 and 选择设备以及避雷器时所选择安全裕度的大小。

避雷器残压是大多数用户选择避雷器时考虑的一个重点参数,GB 11032 给出了典型避雷器的最大残压,然而,对于某些系统,如果有更好的运行经验或者有更好性能的避雷器,可以按实际情况选择。

1.2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 311.1 高压输变电设备的绝缘配合(GB 311.1—1997,neq IEC 60071-1:1993)

GB/T 311.2 绝缘配合 第 2 部分:高压输变电设备的绝缘配合使用导则(GB/T 311.2—2002,eqv IEC 60071-2:1996)

GB/T 311.4 绝缘配合 第 4 部分:电网绝缘配合及其模拟的计算导则(GB/T 311.4—2010,IEC 60071-4:2004,MOD)

GB/T 4585—2004 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验(IEC 60507:1991,IDT)

GB/T 6115.2—2002 电力系统用串联电容器 第 2 部分:串联电容器组用保护设备(IEC 60143-2:1994,IDT)

GB/T 7327—2008 交流系统用碳化硅阀式避雷器

GB 7674 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备(GB 7674—2008,IEC 62271-203:2003,MOD)

GB 11032—2010 交流无间隙金属氧化物避雷器(IEC 60099-4:2006,MOD)

GB/Z 24842—2009 1 000 kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合

GB/Z 24845—2009 1 000 kV 交流系统用无间隙金属氧化物避雷器技术规范

GB/T 26218.1—2010 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第 1 部分:定义、信息和一般原则(IEC/TS 60815-1:2008,MOD)

GB/T 28182—2011 额定电压 52 kV 及以下带串联间隙避雷器(IEC 60099-6:2002,MOD)

DL/T 815—2002 交流输电线路用复合外套金属氧化物避雷器

JB/T 10497—2005 交流输电线路用复合外套有串联间隙金属氧化物避雷器

GB/T 28547—2012

IEC 60099-8 避雷器 第 8 部分:交流 1 kV 以上架空输电和配电线路用带外串联间隙金属氧化物避雷器 (EGLA) (Surge arresters—Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (EGLA) for overhead transmission and distribution lines of a. c. systems above 1 kV)

IEEE 824—2004 电力系统中的串联电容器标准 (IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems)

1.3 避雷器应用总则

本标准主要针对电力系统标称电压范围为:

范围 I:大于 1 kV,小于等于 220 kV;

范围 II:大于 220 kV。

对于范围 I 系统,当含有架空线时,设备的主要威胁是来自与其连接的架空线上出现的直击雷和感应雷。在不与架空线连接的电缆系统中,由故障或开关操作引起的过电压是最常见的,少数情况下也会产生感应雷过电压。对于范围 II 系统,除了范围 I 的影响因素外,随着系统电压的增高,操作过电压是重要的影响因素。过电压可能会导致设备的闪络和严重损坏,从而危及对用户的供电。用避雷器和绝缘之间恰当的配合来阻止这样的事故发生是十分重要的。因此,如果可能出现对设备有危害的雷电过电压或者高幅值操作过电压时,建议采用避雷器防护。

避雷器是系统的一个重要组成部分,其设计应当具有足够的可靠性,足以耐受在污秽或其他安装环境下的电压和通过它的电流。在每一个系统中避雷器承受的电压包括(见 GB 311.1):

- 工作电压;
- 暂时过电压;
- 缓波前过电压;
- 快波前过电压;
- 陡波前过电压(GIS 用)。

由操作产生的缓波前过电压对保护范围 II 的避雷器来说特别重要。

一般来说,设备得到最好的保护与采用较高的避雷器额定电压的要求是相互矛盾的,因此,选择适当的避雷器是一个优化过程,这一过程必须考虑系统和设备的各项参数,第 3 章绝缘配合和避雷器选择对这一过程进行了详细解释。

2 避雷器的发展过程、基本性能和应用

2.1 避雷器的发展

20 世纪 70 年代后期开始使用的金属氧化物避雷器(又称 MOA),已经被证明能够解决有间隙碳化硅(SiC)避雷器所不能解决的问题,避雷器的保护水平不再是一个统计参数,而是可以精确给出。与 SiC 避雷器相比, SiC 避雷器的放电电压易受到周围电场的影响,金属氧化物避雷器的保护功能不再受安装位置或者周围设备的影响。通过并联金属氧化物电阻片(又称 MOV),理论上可以满足任何能量需求。由于保护设备可处理极高能量已经成为可能,因此这种设计开创了一个新的应用领域,例如,电容器组可用多个 MOV 柱并联组成更高能量避雷器来保护。

起初一些 MOA 使用与电阻片串联或与部分电阻片并联的放电间隙。在一定程度上,这种设计主要是考虑电阻片材料的长期稳定性,使用串联或者并联放电间隙都可以降低电阻片的承受电压,另一个原因是为了获得比有间隙 SiC 避雷器更低的保护水平。

随着经验的生长,与旧的技术相比,取消间隙使得避雷器结构非常小巧、紧凑、运行可靠。另一方面,带外串联放电间隙 MOA(外串间隙线路型避雷器,又称 EGLA)正在被越来越多地使用,这种避雷

器通常用以保护架空输电线路和配电线路,限制由雷电引起的快波前过电压,在缓波前过电压和暂时过电压下不动作。

从 20 世纪 80 年代至今 MOA 的设计技术得到长足发展,电阻片正朝着老化性能更优异、保护水平好(即残压更低)、最大持续运行电压更高、能量吸收能力更强以及通流能力更好的方向发展。

从 20 世纪 80 年代开始,复合外套避雷器已逐步取代瓷外套避雷器广泛应用于配电系统中,到 80 年代后期,复合外套避雷器已经越来越多地应用于 110 kV 甚至于 220 kV 的系统中,目前,复合外套避雷器已被认为能够应用于 500 kV 系统甚至于 1 100 kV、1 200 kV 的特高压系统。

早期的复合外套设计时使用 EPDM 橡胶作为绝缘材料,从 20 世纪 90 年代开始,越来越多的制造厂开始使用具有更好憎水性和耐污性的硅橡胶(SIR)做绝缘外套。

2.2 不同设计和类型的避雷器及其电气及机械特性

首先可以通过非线性电阻的类型(金属氧化物电阻片或碳化硅电阻片)来区分避雷器,金属氧化物非线性电阻片中的主要成分是 ZnO。另一种区分方法是看其是否带有间隙;间隙可能在避雷器的外部或者内部,内间隙可能与所有非线性电阻片串联或者部分并联。另一个重要的不同是其外套技术,敞开式变电站(AIS)的避雷器可以用瓷外套,或者是各种不同设计的高分子聚合材料的复合外套,气体绝缘组合电器(GIS)避雷器使用金属封闭、内部充以高运行压力的 SF₆ 气体,此外,对配电避雷器还存在许多其他的外套设计技术。这些不同的避雷器技术包含在下列标准中:

- 内串联间隙瓷外套 SiC 避雷器,GB/T 7327—2008;
- 所有类型外套的无间隙 MOA,GB 11032—2010;
- 具有内串联间隙的瓷外套或复合外套额定电压 52 kV 及以下配电 MOA,GB/T 28182—2011;
- 应用于架空输电线路或配电线路的带外间隙瓷外套或复合外套线路避雷器(EGLA),IEC 60099-8。

SiC 避雷器目前仍在少量使用,但是市场上已不会再提供,本导则仅针对 MOA。

现在新安装的保护变电站设备用避雷器绝大部分是无间隙 MOA,配电系统中主要使用的是复合外套 MOA,在输电系统中瓷外套避雷器仍然是常见的,但复合外套避雷器的市场份额正在逐渐扩大。

对敞开式变电站(AIS)绝大多数是户外型避雷器,而 GIS 避雷器只局限于保护 GIS 或其中的一部分。

从传统意义上来说,避雷器主要用来保护变电站设备,例如电力变压器、互感器,在某些情况下也可以保护进线断路器。一个比较新的应用是作为线路避雷器,线路避雷器可用于防止因雷击无架空地线线路或者有架空地线但是线路架空地线屏蔽失效(绕击)后导致的绝缘子闪络,或者由于雷击高接地电阻的杆塔或架空地线而引起的闪络(反击)。由于现在 MOA 具备很高的通流能力,使避雷器的进一步应用已经成为可能,避雷器可以很容易地做到多个金属氧化物电阻片柱并联(有时可高达一百多柱)。特殊设计结构的避雷器可以集成到电缆插件系统和配电开关装置中,也可以直接安装在变压器油箱内在油中运行。

2.2.1 无间隙金属氧化物避雷器

2.2.1.1 不同设计和类型

GB 11032—2010 中包括以下无间隙避雷器:

- 瓷外套避雷器;
- 复合外套避雷器;
- 气体绝缘金属封闭避雷器(GIS 避雷器);

GB/T 28547—2012

- 分离型和外壳不带电型避雷器；
- 液浸式避雷器。

以上这些不同类型的避雷器在后面的章节中会有详细介绍。

2.2.1.2 瓷外套避雷器

瓷外套金属氧化物避雷器的功能部分是由不同的机械结构支撑的,叠加起来的金属氧化物电阻片柱组成。金属氧化物电阻片具有非线性伏安特性,可近似由公式 $I=K \cdot U^\alpha$ 式表示。其中 α 是非线性系数, α 的值取决于所选材料以及实际电压电流区域,一般在 5~50 之间。避雷器用金属氧化物电阻片通常为饼型或环型,直径大约在 20 mm~136 mm 范围内,高度可达 45 mm,几个电阻片柱可并联在一个外套中以增加能量吸收能力(通过增加体积和热容量),或者改善保护水平(在给定冲击电流水平下减小电流密度)。

避雷器的内部绝缘介质一般为氮气或者空气,如果介质是其他气体,例如 SF₆,应当按照 GB 11032—2010 的规定,在避雷器内填充实际介质条件下进行相关试验,并考虑是否可能有介质泄漏。这点对短路试验特别重要,因为气体的类型对避雷器的短路性能影响很大。因此,若避雷器内填充空气或氮气,则试验已无代表性。

瓷外套将避雷器功能元件与外部环境隔离,因此瓷外套必须具备以下方面的要求:

- 机械强度;
- 闪络距离;
- 爬电距离;
- 污秽条件下的特性;
- 防止湿气侵入的密封;
- 过载下压力释放能力。

一般避雷器外套(不限于瓷外套)的介电强度要求与电力系统中其他设备不同,由于在电力系统中避雷器的外套绝缘受着最好的保护,因此避雷器的外套绝缘水平不同于绝缘配合标准 GB 311.1 中规定的标准绝缘水平,而是采用比其更低的值来替代。在避雷器的运行中,为了避免避雷器在冲击残压作用时发生任何闪络,根据 GB 11032—2010,对避雷器外套要求如下:

- 雷电冲击耐受电压(LIWV)为避雷器雷电冲击保护水平(U_{pl})的 1.3 倍;
- 对 10 kA 和 20 kA 等级、额定电压大于等于 200 kV 的避雷器,操作冲击耐受电压(SIWV)为避雷器操作冲击保护水平(U_{ps})的 1.25 倍;
- 对 10 kA 和 20 kA 等级、额定电压小于 200 kV 的避雷器,工频耐受电压(ACWV)为避雷器操作冲击保护水平(U_{ps})的 1.06 倍;
- 对 1.5 kA、2.5 kA、5 kA 等级和强雷电负荷避雷器,外套工频耐受电压(ACWV)为避雷器雷电冲击保护水平(U_{pl})的 0.88 倍。

根据供需双方协商,也可依据避雷器使用的系统标称电压,按 GB 311.1 中对高压电器外绝缘的规定确定。

采用的系数是考虑到当放电电流大于标称放电电流时残压的增加,以及安装在海拔高度 1 000 m 时的大气修正,当海拔高度大于 1 000 m 时,则必须进行进一步修正。

避雷器的运行环境特殊,若采用 GB 311.1 规定的标准值,这将导致避雷器绝缘外套不必要的过高,这不仅是一个几何尺寸的问题,而且会导致严重的轴向电压分布不均匀和污秽条件下性能的畸变。特殊场合,例如极端环境条件下,可能要求较高的额定冲击耐受电压,但一般来说,最好还是采用 GB 11032—2010 的要求。

避雷器外套内壁与功能元件之间的间隙一般用气体完全或者部分填充(例如干燥的空气或者氮气),或者用固体或半固体(例如硅橡胶)材料填充,一般外套都有压力释放装置,当功能元件由于能量过

载而发生击穿或者闪络时,压力释放装置可以确保外套不剧烈爆炸。然而,我们必须知道市场上存在一些没有压力释放装置的避雷器,用户必须特别考虑这些设备的安全问题。

密封系统是避雷器(不仅指瓷外套避雷器)最敏感的部件,瓷外套避雷器中湿气浸入是影响 MOA 寿命的一个主要因素(MOV 的电气寿命也是一个因素,例如其电压电流特性的改变,但不是主要因素)。

出于机械方面的考虑,外套的长度一般小于 2 m,因此,系统标称电压 220 kV 及以上的避雷器一般是由若干个避雷器元件串联而成,串联元件长度一般在 1.5 m~2 m,并配以均压环,均压环的作用是通过补偿对地杂散电容而使得轴向电压分布均匀。安装时绝不能缺少均压环,因为缺少均压环的避雷器可能会在短时效内发生热崩溃(例如功耗超过散热能力)。

目前,GB 11032—2010 不允许在没有外部均压系统的条件下对避雷器元件外套进行绝缘试验,对于多节元件的超高压和特高压避雷器,这种试验不会得到正确的耐压值。

2.2.1.3 复合外套避雷器

在 20 世纪 80 年代中期(配电系统)、80 年代后期(输电系统)复合外套避雷器在市场上出现,在配电系统中得到了更广泛的应用。在输电系统中,这种避雷器的应用呈现逐渐增加的趋势。各种不同的设计已经得到了发展,尤其对配电避雷器,但是所有的现有设计都是基于几个基本设计原则。值得注意的是,从力学角度考虑,因为环氧树脂是脆性材料,其机械特性类似于瓷外套,GB 11032—2010 认为采用环氧浇注外套设计的任何避雷器都应被当作瓷外套避雷器。

“管型设计”:这种避雷器采用的外套有意包含一定的气体体积(与瓷外套相似),这种设计必须有密封和压力释放系统。外套一般为非瓷性复合外套,如外部有伞裙的增强塑料玻璃纤维管制成。外部伞裙可能直接模压在玻璃纤维管上,或者以其他某种方法作为单个部件挤压在套筒上。避雷器内部电阻片柱的周围介质一般为氮气或者空气,如果介质是其他气体,例如 SF₆,应当按照 GB 11032—2010 的要求对避雷器充满气体进行相关试验,并考虑可能发生的泄漏,由于在短路时气体种类对避雷器性能有重要影响,所以对充有 SF₆ 等其他气体的避雷器进行短路试验时,避雷器必须充有 SF₆ 等其他气体,此时氮气或者空气的试验结果已经不具有代表性。

“缠绕型设计”:避雷器的机械支撑部分使用纤维玻璃增强塑料(FRP)缠绕型结构。可以通过环氧树脂浸透玻璃粗纱实现,也可以用预浸渍网或带缠绕在电阻片柱上,然后在烘箱中固化而成。所得到的管型缠绕电阻片柱,可以完全包裹(可以预留薄弱点以保证在避雷器过载时外套打开),也可以有预留“窗口”。这种缠绕也可能是一个预制的 FRP 管包裹在 MOV 柱上,两者之间的空隙可用弹性材料填充。

“笼型设计”:MOV 柱由 FRP 网或 FRP 棒或 FRP 带以极高的张力夹紧。MOV 本身即作为机械支持结构的一部分,而玻璃钢形成一个开放的笼子。另外还可能再用带子缠绕玻璃钢笼子以增加机械强度,改善短路性能。外部伞裙必须直接模压在模件上,通常使用的是硅橡胶。

尽管以上这种分类方法比较实用,但是 GB 11032—2010 采取了另一种不同的分类方法,以便针对不同设计在短路试验中采取不同的程序。若验证封闭外套内包含有气体体积的“压力释放”性能,或验证外套直接挤压在 MOV 柱上的“压力释放”性能,它们是有区别的。这两种基本设计原理要求采用不同的试验方法。例如为了反映恶劣条件,在前一种短路试验情况下,必须熔断与电阻片柱并联的熔丝以产生内部电弧代表发生内部闪络,而在后一种短路试验中,只有避雷器能量过载(通过施加更高电压)才会导致避雷器损坏,也不排除由于单个电阻片元件过载炸裂而导致的外套机械损伤,因此,GB 11032—2010 介绍了以下短路试验性能:

——“设计 A”避雷器是一种沿避雷器元件的整个长度都有气体释放通道的设计,并且内部气体容积大于等于除内部功能元件外剩余内部容积的 50%;

——“设计 B”避雷器是一种没有封闭气体的实心设计,或者内部气体容积小于除内部功能元件外剩余内部容积的 50%。

GB 11032—2010 给出了进一步的解释:

典型的“设计 A”避雷器是指瓷外套避雷器;或者用带压力释放装置的复合空心绝缘子装配的复合外套避雷器;或者在复合外套上预制薄弱点制造的避雷器,在规定的压力下破裂或者弹开以降低内部压力。

典型的“设计 B”避雷器没有任何压力释放装置,是没有封闭气体容积的实心类型。如果电阻片发生电气故障,避雷器内部产生电弧。该电弧引起严重汽化并且可能引起避雷器外套和(或)内部材料烧毁。这种避雷器的短路特性取决于它本身对由于电弧的影响发生外套破裂或撕开的控制能力,以避免剧烈爆破。

换句话说,“设计 A”避雷器的气体中发生故障的可能性比固体材料中发生故障的可能性大得多,“设计 B”在固体材料中发生故障的可能性更高。对试验要求而言,这种分类方法是最优的。尽管许多情况表明鉴别两种设计结构还存在问题,不足以区分市场上现有各种避雷器产品之间细节的不同。因此,以上所提到的两种方法可能会同时共存。

复合外套与环境直接接触的外部可能由不同种类的材料制成,例如三元乙丙橡胶(EPDM)或者硅橡胶(SIR),后者可进一步细分成室温硫化,高温硫化,以及液态硅橡胶,这些仅仅是通用名称,也许下面还有很多分支。大多数情况下,为了抵抗不良影响,这些复合物材料都要掺杂其他化学物质,或者需要添加填充物(例如氢氧化铝),复合材料最重要的特征是憎水性和动态特性(长持续时间的潮湿后暂时丧失性能而在后来的干燥期又恢复性能)以及抗漏电起痕和耐电蚀能力。它是如此的重要,因此,GB 11032—2010 中要求所有无间隙复合外套避雷器都需要做气候老化试验。

对于外套内腔无气体体积的复合外套避雷器,它的密封系统性能可通过浸水试验(沸水煮 42 h)进行考核。

使用复合外套避雷器的用户应当意识到:与瓷外套避雷器不同,复合外套避雷器即使设计成具有极高机械强度的避雷器,也可能在机械抗弯负荷下产生偏移。变电站设计时必须考虑这点,特别是当避雷器与邻近设备间距较小时应考虑该因素。

复合外套避雷器一个特别的地方是采用串并联设计,例如配电系统的避雷器采用串联设计以满足所要求的额定电压,采用并联结构设计以满足能量吸收以及保护水平的要求。GB 11032—2010 中没有包括所有的特殊设计结构(例如考虑短路试验和机械试验),因此用户必须注意这种串并联设备的性能可能会偏离单个避雷器型式试验中验证的性能。

2.2.1.4 气体绝缘金属封闭避雷器(GIS 避雷器)

气体绝缘金属封闭避雷器(GIS 避雷器)是一种可以直接连接到 GIS 的避雷器,这种避雷器的金属外套一般用铝或者钢制造,由于 GIS 的气体隔室的连接是制造厂规定的,没有标准化,GIS 避雷器的连接也是如此。因此,GIS 制造厂一般都有自己的 GIS 避雷器设计,借助于适配法兰可以连接市场上的不同 GIS 和避雷器。

GIS 避雷器设计最显著的不同是同罐内的相数,当系统电压低于 220 kV 时,通常是三相共罐设计;当系统电压较高时,通常采用单相设计。与 AIS 避雷器相比,由于对地电容对 GIS 避雷器 MOV 柱的影响更为严重,若未采取特殊措施,则会导致沿 MOV 柱的电压分布极不均匀,因此 GIS 避雷器的内部均压系统比 AIS 避雷器的均压系统更复杂。另外当系统电压高于 220 kV 时,为了减小电阻片柱的几何高度,功能元件的内部设计是:机械上三柱式盘旋,电气上单柱,如图 1 所示。为了实现电阻片层间的相互绝缘,必须使用极高绝缘强度的绝缘板,GB 11032—2010 中规定了绝缘板所要求的介质耐压试验。

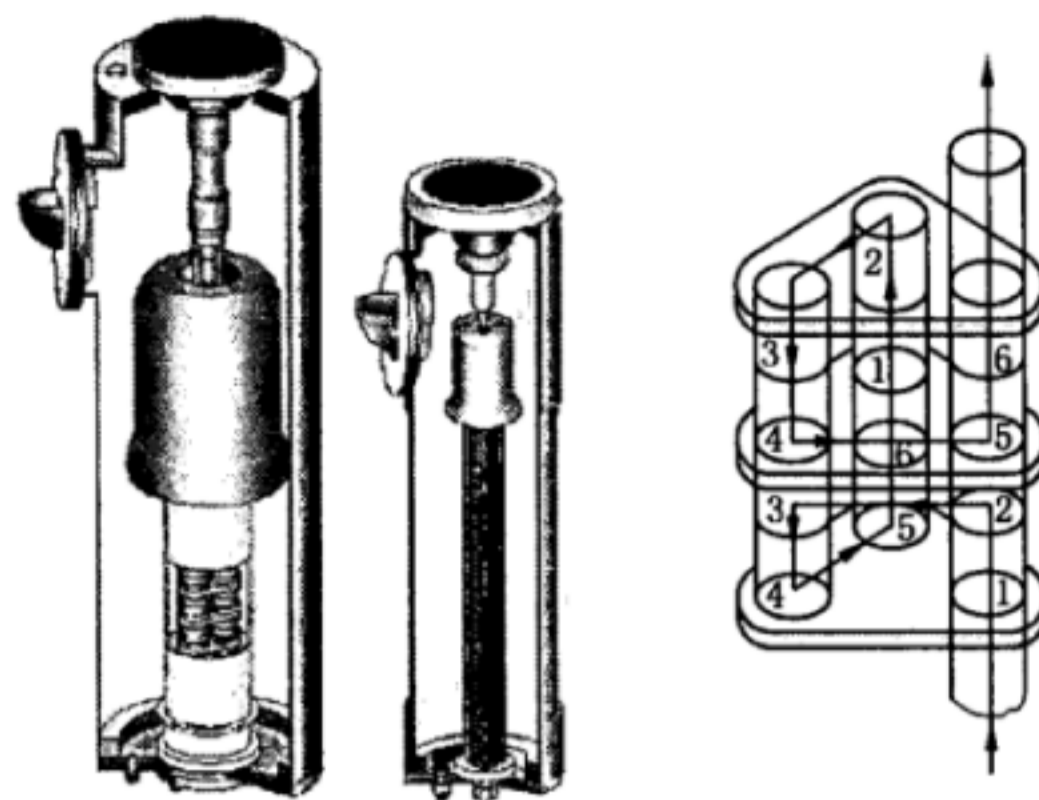


图1 三机械柱/一电气柱(左)和单柱设计(中)及三机械柱/一电气柱电流路径(右)示意图

目前超高压单机械柱/单电气柱避雷器已经得到一定发展,这种避雷器使用的是高梯度电阻片。目前还开发出了保护性能更好的特高压 GIS 避雷器,该避雷器电气上采用四柱并联,因此其机械上 12 柱电阻片并联排列。

一般来说,GIS 避雷器与 AIS 避雷器的绝缘强度要求相同($LIWV=1.3U_{pl}$, $SIWV=1.25U_{ps}$, $ACWV=1.06U_{ps}$),但无需任何大气条件校正:只要没有气体泄露,罐内气体密度保持不变,由于 GIS 介质绝缘故障会导致严重后果(金属罐内的工频电弧),因此要求有更高的安全裕度,三相共罐设计时必须验证相-相耐受电压。

GIS 避雷器比 AIS 避雷器自感低得多的原因是其采用同轴圆柱结构,一般来说,GIS 避雷器单位长度的自感为 $0.3 \mu\text{H}$,而 AIS 避雷器单位长度的自感为 $1 \mu\text{H}$,因此,在陡波冲击电流下,GIS 避雷器的保护性能比 AIS 避雷器更好。

如果 GIS 避雷器使用已经按照 GB 7674 规定做过试验的金属外壳,并且其内部没有附加的压力释放装置,那么 GIS 避雷器在型式试验中不需要做短路试验。否则必须进行短路试验以检验内部压力释放系统。

如果 GIS 内包含 GIS 避雷器,则在 GIS 调试时要特别小心,因为 GIS 避雷器是不能耐受介质试验中所要求的工频耐受电压水平的。有大量有关 GIS 避雷器在调试试验时发生故障的报告,如果要做这类试验,必须打开专用的隔离刀闸或移走 GIS 避雷器,或者采用其他方法将避雷器和系统脱开。

2.2.1.5 分离型避雷器和外壳不带电避雷器

分离型避雷器和外壳不带电避雷器是两种不同设计的避雷器,它们的共同特征是不固定安装,而且不是通过固定导体与系统永久性连接,而是通过滑动触头和插头分别安装和拆卸,一般情况下它们都是安装在箱内,例如配电开关柜,但是目前也有将它们使用在户外的报道,分离型和外壳不带电避雷器之间存在一些基本的不同。

分离型避雷器(不带电插拔避雷器):外套可能是绝缘的(复合材料)或屏蔽的(金属或导电的复合材料)。在所有情况下,它们是不带电插拔避雷器,这意味着避雷器在接入或者移去时,电力系统必须处于断开状态。

注 1: 不带电插拔避雷器通常使用在欧洲。

外壳不带电型避雷器(带电插拔避雷器):它们总是有屏蔽(接地的)的外套,通常安装在地下且有托架的配电设备及回路中,它们是带电插拔式避雷器,可以在带电状态下安装或者移去。

注 2: 带电插拔避雷器通常使用在美国。

这两种类型的避雷器对绝缘耐受的要求与 AIS 避雷器不同,主要体现在绝缘以及屏蔽外套上。

与 AIS 避雷器标准不同之处是短路性能及相关试验条件和评价。特别对于金属外套的分离型避

雷器,在过载情况下允许内部有零件脱落(只要内部零件是通过外套底部的压盖或者其他特别装置排除),安装时应该考虑这种情况。

这两种类型的避雷器在国内已经均有使用。

2.2.1.6 液浸型避雷器

尽管 GB 11032—2010 中概括介绍了浸在绝缘液体中的避雷器,但是实际上只有浸在绝缘油中的避雷器,这种避雷器一般直接安装在变压器油箱内,紧靠被保护的绕组,这种避雷器从 1980 年在美国、1985 年在日本已经被大量使用,其他国家还没有普遍采用。

只有直接保护变压器绕组的避雷器持久地承受标准规定的运行电压,不包括保护分接开关的 MOV。由于液浸型避雷器安装在靠近绕组的地方,可以避免由于行波过程而造成的间隔距离效应,此外还可以避免受环境的影响,因此这种避雷器的保护性能极好。

有一个必须解决的问题是在热油中运行,因为这个原因,加速老化试验(动作负载试验的一部分)必须进行 7 000 h(如果制造厂-用户双方达成协议,这个试验可以减少到不少于 2 000 h),然而这种试验方法不能对预期寿命给出如 GB 11032—2010 附录 K 中 1 000 h 电阻片试验所给出的同样的可信度。

另一个问题是避雷器的短路性能,液浸型避雷器可以设计成“故障开路”或者“故障短路”型。但是,由于有时故障电流低于开路电流或者高于短路电流,“故障开路”避雷器在电路断路时不一定起作用,“故障短路”避雷器在电路短路时也不一定起作用。“故障开路”不意味着避雷器将会切断电路,仅仅意味着在其他设备清除故障后,故障开路避雷器保护的设备可以重新带电,当然,这种情况下没有过电压保护。表示其短路特性的这两个不同方式要求的试验程序和评价准则不同于所有其他结构的避雷器(见 GB 11032—2010)。

2.2.1.7 电气和机械特性参数

2.2.1.7.1 概述

金属氧化物避雷器的基本电气特性是持续运行电压、额定电压、标称放电电流、在标称放电电流下的残压、在陡波冲击电流下的残压和在操作冲击电流下的残压。在给定持续运行电压和额定电压下,避雷器类型不同,保护水平也存在差别。进一步需要考虑的特性还有线路放电等级、额定短路电流等级、污秽耐受能力。

机械性能数据有规定的长期负荷和短期负荷。

2.2.1.7.2 持续运行电压 U_c

持续运行电压是允许持续施加在避雷器端子间的最大正弦工频电压值。整支避雷器的持续运行电压按比例单元计算可能会低于动作负载试验中用于老化和用于验证热稳定的值。由于避雷器外套的污秽效应,或因其他物体的邻近效应引起均压效果下降,致使电阻片电压分布不均匀,使得避雷器的实际持续运行电压降低。

2.2.1.7.3 额定电压 U_n

额定电压是施加在动作负载试验中对应 10 s 的最大工频电压(GB 11032—2010),它也是建立避雷器工频电压耐受时间特性和定义线路放电试验要求的参考参数。

根据 GB 11032—2010 额定电压是以 1 kV~24 kV 的级差定义的。其他值也是可接受的,但需是 6 的倍数。

2.2.1.7.4 标称放电电流 I_n

标称放电电流是用来划分避雷器等级的。按照 GB 11032—2010,标称放电电流将避雷器划分为五

个等级。负载和要求值随着标称放电电流等级的提高而增加。标称放电电流是避雷器保护特性和能量吸收能力的主要参数,它的选择会影响绝缘配合的整个程序。

2.2.1.7.5 保护水平 U_{pl}, U_{ps}

避雷器的雷电冲击保护水平是在标称放电电流下的最大残压,它用于保护设备免受快波前过电压。

操作冲击保护水平是在规定的操作冲击电流下的最大残压。它用于保护设备免受缓波前过电压。

对于金属氧化物避雷器快波前过电压的保护特性,必须考虑陡波电流冲击试验中电阻片导电机理的影响。

2.2.1.7.6 线路放电等级(LD)

10 kA 和 20 kA 避雷器线路放电时的能量吸收能力与级数有关,按 GB 11032—2010 分为 5 个等级,能量吸收能力随线路放电等级提高而增加。

对于线路放电等级 2 级及以上的避雷器,产生的放电电流用于动作负载试验中以验证吸收能量后的热稳定性。由系统事件引起具有不同波形的电流,可以通过与一个等效的线路放电电流和能量比较来估算。但是,避雷器的通流容量不是一个固定值,而是取决与电流密度以及能量注入时间。通常通流容量随着电流密度增大以及能量注入时间缩短而增强。此问题仍处于验证之中。

2.2.1.7.7 额定短路电流 I_s

额定短路电流数值是避雷器内部功能元件失效后的一个内部故障电流,避雷器应能耐受该电流 200 ms 而没有引起外套剧烈爆炸并使火灾风险最小化。在短路电流型式试验中,还需要验证避雷器在大约 50% 和 25% 额定短路电流,以及 600 A、1 s 的小电流短路特性。

2.2.1.7.8 污秽耐受特性

避雷器污秽耐受能力涉及三种情况:

- 避雷器外套必须耐受污秽应力而没有闪络。这可以根据 GB/T 4585—2004 来验证,或按照 GB/T 26218.1—2010 设计来保证。
- 避雷器必须耐受由于外套表面的污秽作用而导致电压分布变化可能引起的温度升高。应考虑污秽水平以及在污秽条件下由于故障和重合闸操作引起的过电压幅值和频度。适用于多元件瓷外套避雷器的试验程序,已在 GB 11032—2010 中给出,对于复合外套避雷器,目前尚未规定类似的试验程序。
- 避雷器必须耐受由于污秽作用导致外套表面电压分布变化而引起的内部局部放电,同时不会引起对电阻片或内部支撑件的损害。但目前尚无相关的试验程序。

2.2.1.7.9 规定的长期负荷(SLL)

SLL 是一种垂直于避雷器轴向的力,运行期间允许持续施加在避雷器上而不会产生避雷器机械损伤,可以用力(N)或者弯矩($N \cdot m$)表示,弯矩可以用力乘以避雷器高度得到。对于高压复合外套避雷器,SLL 需由一个循环负荷试验来验证,然后对避雷器做包含密封试验的评估试验。对于系统电压不超过 35 kV 的避雷器,型式试验不采用循环方式,而是简单的抗弯试验,该方法也可以用于瓷外套避雷器,由于瓷外套在机械负荷下不会产生偏移,简单的抗弯试验就足够了。

2.2.1.7.10 规定的短期负荷(SSL)

SSL 是一种垂直于避雷器轴向的最大力,运行期间允许短时施加在避雷器上而不会使避雷器产生任何机械损伤,它是针对比较少的事件(如短路电流负载、非常高的风载或中度的地震负荷),可以用力

(N)或者弯矩(N·m)表示。避雷器在运行多年后仍可能遭遇 SSL,已在相关试验程序中考虑该情况(SSL 试验在 SLL 试验之后进行)。还有很重要的一点是,SSL 值不包括极严重地震负荷,严重地震负荷要求值可能比正常运行条件下的 SSL 值大得多,因此需要特别考虑。

2.2.2 内串联间隙金属氧化物避雷器

GB/T 28182—2011 明确了不包括以下部分:

- 非金属氧化物类避雷器;
- 额定电压高于 54 kV 串联间隙避雷器;
- 所有额定电压等级的外间隙避雷器;
- 所有额定电压等级的并联间隙避雷器;
- 线路放电等级为 2、3、4、5 的避雷器。

因此,这个标准只适用于交流配电系统,瓷外套或复合外套的具有内串联间隙的金属氧化物避雷器(额定电压 52 kV 及以下)。

2.2.2.1 不同的类型和设计

图 2 为一种设计:

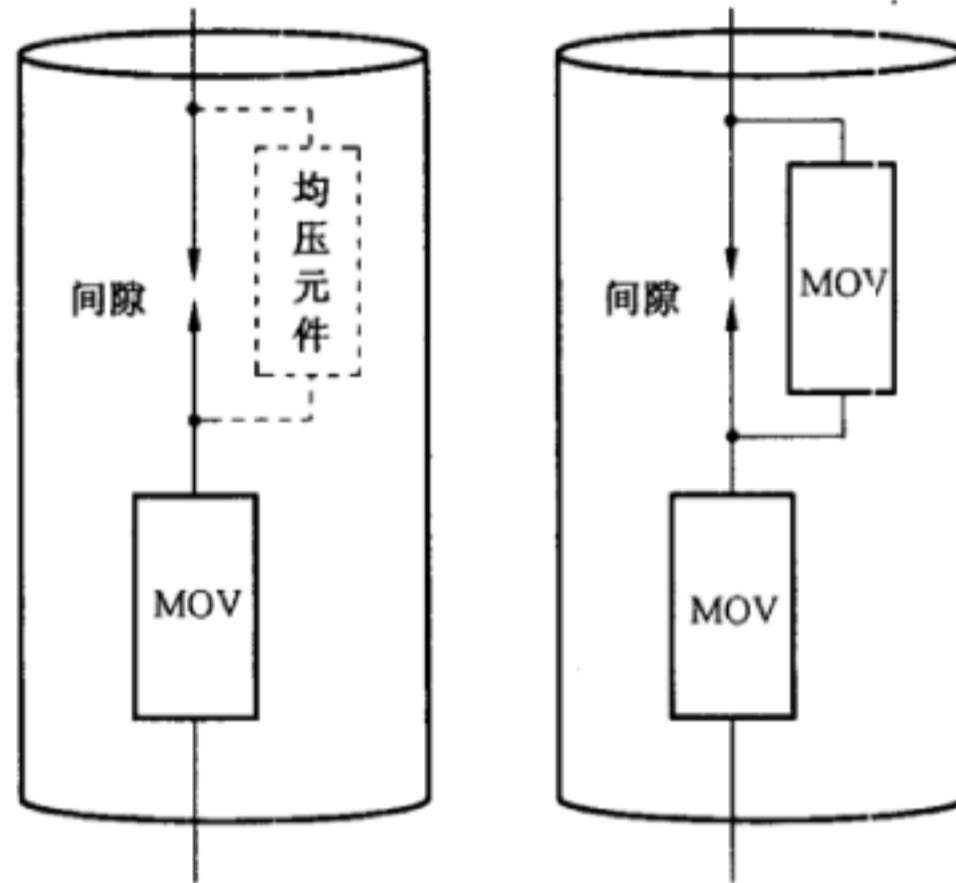


图 2 内间隙金属氧化物避雷器设计

20 世纪 70 年代后期开始,图 2 这种设计开始在中国、美国以及日本出现,这种带内串联间隙的避雷器结合了老式避雷器串联间隙和新型避雷器的金属氧化物电阻片的优点。

从图 2 可以看出,这种避雷器有两个基本部件,MOV 和间隙,MOV 为非线性电阻片柱,和无间隙避雷器特性大致相同,间隙一般为空气间隙,和 MOV 串联,有时也和均压元件或者其他 MOV 并联,可能有一个或者几个间隙单元。

串联间隙 MOA 的各部件与早期的 SiC 避雷器都不同,早期 SiC 避雷器中间隙的作用类似于开关,在雷击时闭合,当间隙电压接近零时打开。通常间隙的作用是接通和断开避雷器,而 MOA 中串联间隙的作用是触发避雷器动作,而不是终结动作。由于 MOV 优异的非线性特性,有助于消除工频续流对间隙老化的影响。在氧化锌避雷器出现之前的碳化硅避雷器中,含有大量的碳化硅电阻片。它们被用来限制在冲击电流之后通过避雷器的工频续流,受限制的电流可使间隙不过度地损坏,而且当电压达到较低水平时间隙可结束动作。然而它也会允许一定的电流通过避雷器,该电流足以劣化间隙,并改变了它们的特性。

串联间隙的正面作用是使金属氧化物电阻片组件的参考电压可以低于无间隙 MOA 20%~30%。

取较低的参考电压是因为仅需要满足能在过电压后切断避雷器。这句话的意思是避雷器的动作电压只比系统电压高出几个百分点,而系统电压是指在过电压期间,间隙被有效短接时,加在避雷器上的系统电压。较低的参考电压直接意味着较少的金属氧化物电阻片,或较少的金属氧化物材料。

由于参考电压较低,因此金属氧化物电阻片柱较短,残压也会较低。这意味着可以降低高度,并减小了降低单位高度金属氧化物电阻片残压的困难。这样就可以采用单位高度残压比较高的金属氧化物电阻片,而无需虑及所提供的保护裕度。在某些应用场合,无间隙 MOA 的缺点是对暂时过电压太敏感。而对上一代碳化硅避雷器而言,这并不是一个大问题,因为它们的内部间隙经常把动作电压设置在大于 1.5 p. u. 系统电压。而这种内串间隙 MOA 也具有这个能力。间隙设置可以使避雷器避开电力系统中绝大部分暂时过电压。

串联间隙 MOA 一般应用于要求保护水平较好,或较高 TOV,或两者兼而有之的场合,其缺点是间隙具有统计放电特性。

2.2.2.2 电气和机械特性参数

2.2.2.2.1 额定电压和持续运行电压

除非制造厂特别宣称,GB/T 28182—2011 中试验和设计的避雷器额定电压和持续运行电压是与 GB 11032—2010 中规定值相同。

2.2.2.2.2 避雷器等级和能量处理能力要求

有间隙避雷器通流能力一般比无间隙避雷器低,因为其金属氧化物电阻片比较少。电荷转移和电流载流能力和无间隙避雷器相同。

2.2.2.2.3 绝缘配合

根据 GB/T 28182—2011,避雷器设计测试的保护特性如下:

- a) 根据 GB/T 28182—2011,确定陡波冲击电流残压和波前放电电压;
- b) 根据 GB/T 28182—2011,确定雷冲击电流残压和 1.2/50 冲击放电电压;
- c) 根据 GB/T 28182—2011,确定操作冲击电流残压和操作冲击放电电压。

一般情况下,将两个值中较大的一个作为保护特性,在绝缘配合设计程序中采用这个最大值。

2.2.2.2.4 暂时过电压

设计和测试要求与 GB 11032—2010 中考虑方法相同。

2.2.3 带外间隙线路避雷器(EGLA)

2.2.3.1 不同类型和设计

大多数线路避雷器(LSA)的作用是防止由于雷直击或绕击导线而导致的绝缘子闪络和雷击杆塔导致的绝缘子闪络,其主要特征是:

- 有间隙或者无间隙;
- 瓷外套或者复合外套;
- 用于配电线路或者输电线路;
- 用于雷电和/或操作过电压保护。

无间隙线路避雷器按照 GB 11032—2010 测试,带外间隙线路避雷器按照 IEC 60099-8 测试。

大多数线路避雷器是复合外套避雷器,仅用于防护雷电过电压,与瓷外套避雷器相比,复合外套避雷器更轻便、易安装、机械过载性能更好。更值得注意的是,线路型避雷器经常安装在公共通道,对线路

避雷器应用而言,其安全性(机械强度、短路性能)更为重要。因此针对每个特定的应用,必须在安全和经济两方面找到一个合理的平衡。

配电线路用 LSA 主要是无间隙避雷器,而绝大多数安装在输电线路避雷器是 EGLA 型。外串联间隙使得避雷器本体具有较低的额定电压。一方面,由于避雷器不考虑操作冲击过电压的影响,EGLA 的能量吸收要求可能比 LSA 低,另一方面,由于电荷转移不可能向其他并联避雷器分流,因此能量要求又可能较高。由于避雷器本体不持续带电,EGLA 对复合外套材料要求会更低;此外放电电压的调整有时候会比较困难——如果避雷器的本体有效时,避雷器的放电电压不应超过绝缘子的雷电冲击耐受电压,而当避雷器的本体损坏时,EGLA 必须能够耐受线路上的操作过电压。

EGLA 由避雷器本体(SVU)和外串联间隙组成,如图 3 所示,一个电极安装在 SVU 的末端,另一个电极固定在线路绝缘子上。另一种方法是将外串间隙与支撑绝缘子并联装配再与 SVU 串联,这种设计结构不包括在 IEC 60099-8 中。

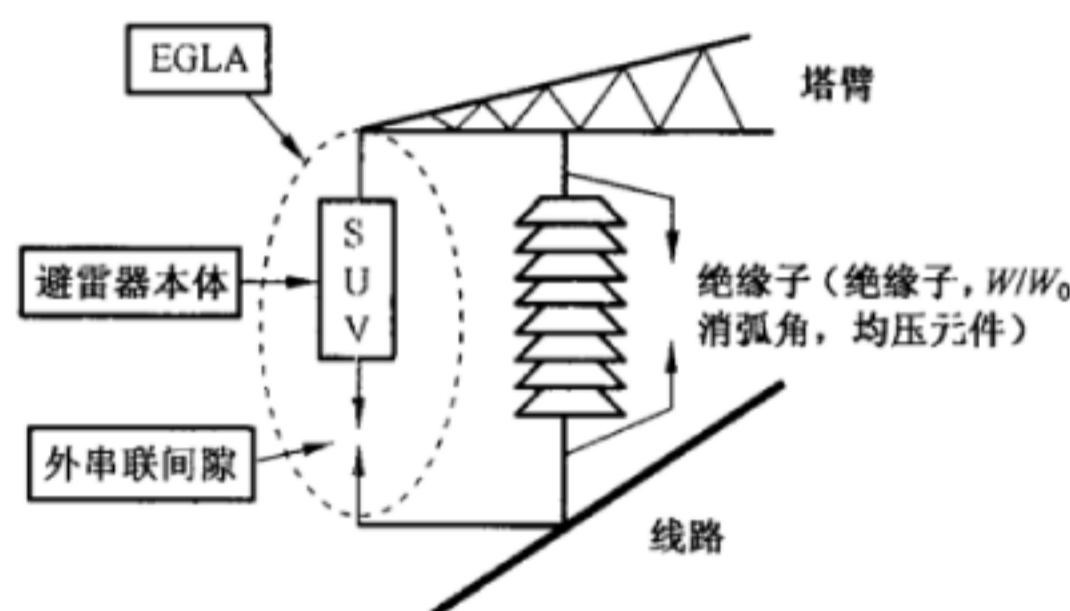


图 3 EGLA 组成

EGLA 有许多不同的安装方法,在杆塔横臂上悬挂式安装是最常用的。还有一些是 EGLA 直接连接到线路绝缘子上,此时,避雷器本体可能会水平安装。与电站用避雷器相比,必须考虑到,在所有情况下,EGLA (以及所有的线路避雷器 LSA)会遭遇更严酷的风荷载和覆冰,因此,机械要求可能会更高。

2.2.3.2 电气及机械特性参数

EGLA 只保护雷电冲击过电压,下列涉及无间隙电站避雷器,或保护操作过电压的线路型避雷器的项目均与 EGLA 无关:

- 操作冲击电流下的残压;
- 热稳定性;
- 长持续时间冲击电流耐受;
- 工频电压耐受时间特性;
- 工频电压下老化特性。

EGLA 对操作电压和工频过电压不起作用,因此不能按照能量处理特性分类,应根据标称放电电流和大电流冲击耐受能力分类,EGLA 在日本已经应用了很长时间,IEC 60099-8 包括两种分类体系,“X”系列(从 X1 到 X4),“Y”系列(从 Y1 到 Y4),当前新设备一般采用前一个系列,而“Y”系列是考虑日本的实际。作为特殊规定,“Y”系列的标称放电电流和大电流冲击波形都是 2/20 μ s,该值已通过计算可作为有架空地线线路当屏蔽失效时的代表性电流值。

EGLA 的基本电气参数包括额定电压,类别(X 或者 Y),雷电放电能力,绝缘子耐受电压和 EGLA 保护水平之间的配合,污秽条件下续流遮断能力以及额定短路电流。

机械特性参数需经制造厂和用户之间协商一致。作为一个最低要求,EGLA 必须能够承受运行中的振动负荷。

下列条款给出了 EGLA 的一些特征参数。

2.2.3.2.1 额定电压 U_r

额定电压是施加到 EGLA 避雷器端子间的最大允许工频电压有效值, EGLA 避雷器应被设计成能在此电压下正确地动作, 因此额定电压值必须大于安装点可能出现的最大工频暂时过电压值。额定电压也可以作为运行和续流遮断特性的参考参数。

2.2.3.2.2 EGLA 分类

EGLA 按照系列名称分类, 可以是“X”系列或者“Y”系列, “X”系列包括 X1、X2、X3、X4, “Y”系列也包括 Y1、Y2、Y3、Y4。每个子系列由标称放电电流和大电流冲击耐受能力组合表示。

2.2.3.2.3 雷电放电能力

雷电放电电流是专门为线路避雷器试验引进的, 在 GB 11032—2010 附录 N 中作了规定。电流波形是持续时间为 $200\ \mu\text{s}\sim 230\ \mu\text{s}$ 的近似正弦波, 相当于 $90/200\ \mu\text{s}$ 的电流波, 型式试验中必须进行 18 次冲击电流试验, 此试验为耐久性试验, 雷电放电能力由三个参数确定:

- 电流峰值(kA);
- 比能量(kJ/kV);
- 电荷转移能力(C)。

2.2.3.2.4 绝缘子耐受和 EGLA 保护水平之间的配合

在型式试验(用“普通”间隙装配)和验收试验(用间隙和规定的待用绝缘子)中必须验证绝缘子的闪络特性与 EGLA 波前放电电压和标准雷电冲击放电电压, 以及标称放电电流下残压之间的配合。雷电冲击的任何击穿都应该发生在外串联间隙, 不能引起绝缘子的任何闪络。标准规定了两种不同的验证方法: 一种是在型式试验中不使用绝缘子; 另一种是验收试验中采用拥有最短绝缘距离的待用绝缘子。第一种方法中, 首先应确定放电电压和残压, 用统计法与绝缘子进行配合; 第二种方法中, 要求间隙可靠放电, 绝缘子无闪络, 只需要用统计法计算安全裕度。

必须将避雷器本体短接后进行操作冲击湿耐压试验和工频湿耐压试验, 以确定外间隙的最短距离。此时所有闪络均不发生 EGLA 上, 而发生在线路绝缘上。

2.2.3.2.5 污秽条件下续流遮断性能

型式试验或者验证试验中, 必须对 EGLA 做潮湿和污秽条件下续流遮断试验, 在实际运行中是不允许避雷器本体表面闪络的, 而通过外间隙的续流必须可靠地遮断。

IEC 60099-8 列出了两种续流遮断试验方法: “方法 A”和“方法 B”, 如果污秽属于 GB/T 26218.1—2010 规定的“非常严重”级别, 使用方法 B, 其他污秽条件, 制造厂根据实际情况选择合适方法。

“方法 B”一般在人工污秽条件下进行。

两种方法都需要在与 EGLA 额定电压相等的工频电压下进行, 每种极性要做五次雷电冲击电压击穿试验, 每次击穿后, 续流必须在工频电压第一个半波周期内切断, 而且在以后的任何半波内均不得重击穿。

2.2.3.2.6 额定短路电流 I_s

额定短路电流 I_s 是在避雷器功能元件损坏后的内部故障电流, 避雷器应能承受该电流 200 ms 而不引起外套粉碎性爆炸。型式试验时, 还需要验证大约 50% 和 25% 额定短路电流, 以及 600 A、1 s 的小电流短路特性。

型式试验中, 一般按照 GB 11032—2010 中的步骤进行短路试验, 试品的安装是直立式还是悬挂式

(按预期安装方式)由制造厂决定。另外还应注意,在试验后应能承受特殊的机械需求,如避雷器本体保持完好,并可以由它的顶端提起或移走,但不做强制要求。问题是间隙和避雷器本体是独立的两个部件,对于不同的应用间隙可能有不同类型的设计,EGLA 其他试验也存在这个问题。因此,短路试验时可不包括间隙,但对于其他试验,则必须包括在内。

2.2.3.2.7 机械性能

与电站用避雷器一样,应规定长期负荷(SLL)和短期负荷(SSL),除了 GB 11032—2010 所要求的机械试验外,IEC 60099-8 还引入了振动试验,基本要求是避雷器顶端施加加速度为 $1g$ 的 100 万次振动,间隙组件也要求进行该试验。

根据 IEC 60099-8 短路试验的规定,允许避雷器碎片脱落,但碎片必须落在指定的范围内。应注意,目前该标准如此规定是因为公众需要通过输电线路和配电线路的下方的通道。另外,还应指出,当 EGLA 本体 MOV 损坏之后,每次间隙放电时,均会发生短路,因此,在其被替换之前,可能会遭遇若干次短路事件。

2.3 避雷器的应用

2.3.1 高压变电站避雷器

2.3.1.1 安装

与其他变电站设备相比,避雷器看似是一种比较简单的设备。事实上,用户在运输、储存和安装避雷器时也没有太多的要求,但是不应低估避雷器和它的附件,如均压环、电晕环、法兰盖、绝缘底座等,避雷器内还有半导体的高非线性 MOV,它们在其整个寿命期间一直与线路连接在一起。

避雷器既应在持续运行电压和环境应力下稳定运行,又要有更好的保护性能和高的通流容量。制造厂必须非常仔细地在此之间做优化平衡,如果有任何一个附件被忽略或装配不当,这种平衡就将被打破。因此,有必要认真阅读并遵循制造厂的安装和运行手册。

应该严格遵循制造厂为避雷器运输和储存规定的措施,特别是瓷外套避雷器通常对运输应力很敏感,因为这经常意味着它可能代表了瓷外套避雷器整个寿命期间的最高机械应力。大多数情况下运输和储存时避雷器应当处于垂直状态。

复合外套避雷器在贮存时必须确保空气条件可控,如果贮存像运输时一样带有外包装,外套就容易长苔藓和真菌,制造厂一般会标明外包装在贮存时是否需要被拆除。

多节避雷器运输时通常分成多个独立的避雷器元件,现场安装时必须重新装配。另外必须遵循制造厂的安装说明。避雷器元件装配必须严格按其正确的顺序,因为它们的电压等级和高度可能不同。错误的安装可能导致一些额外故障,例如:对中间法兰的外闪络,或降低避雷器的防污特性。对于复合外套避雷器,为了吊装避雷器元件而采用带子捆扎时,必须小心不要损坏绝缘伞裙。某些类型的避雷器(通常是瓷外套避雷器或“管型”复合外套避雷器)要求有金属顶盖板和避雷器元件之间的中间板。如果这些板去掉,则会影响整只避雷器的短路(压力释放)性能。

高度超过 $1.5\text{ m} \sim 2\text{ m}$ 的金属氧化物避雷器一般装有均压环,这些均压环是用来使避雷器电阻片柱轴向电压分布均匀,所以不能省略,均压环的数量、直径、支撑杆的长度都是制造厂经仔细优化精确规定的,它涉及避雷器的电压分布和温度分布。去掉均压环或采用错误的尺寸可能导致避雷器在短时间内完全损坏。

当避雷器直接立于地面上时,对地电容会使得避雷器上电压分配不均匀,均压环的作用就是减弱对地电容的影响,如果避雷器安装在支架的顶部,对地电容的影响就比较小,但均压环也不能省略或改变,详细内容见 GB 11032—2010。

当避雷器配有均压环时,必须认真对待制造厂宣称的从均压环最大环的外径到接地体或带电部件

的最小间隙距离。如果由于均压环的安装尺寸不允许有任何改变而出现间隙距离问题时,必须与厂商联系,以确定是否可以采用另一种配置,特别是针对特殊的应用。在 EHV 和 UHV 系统中,避雷器装有额外的电晕环,为了在电气上屏蔽高电压端子,电晕环一般安装在避雷器顶部,电晕环的作用是限制电晕效应和无线电干扰电压(RIV)水平,切勿将电晕环和均压环混淆,这两个环在尺寸上有很大不同,如图 4 所示:

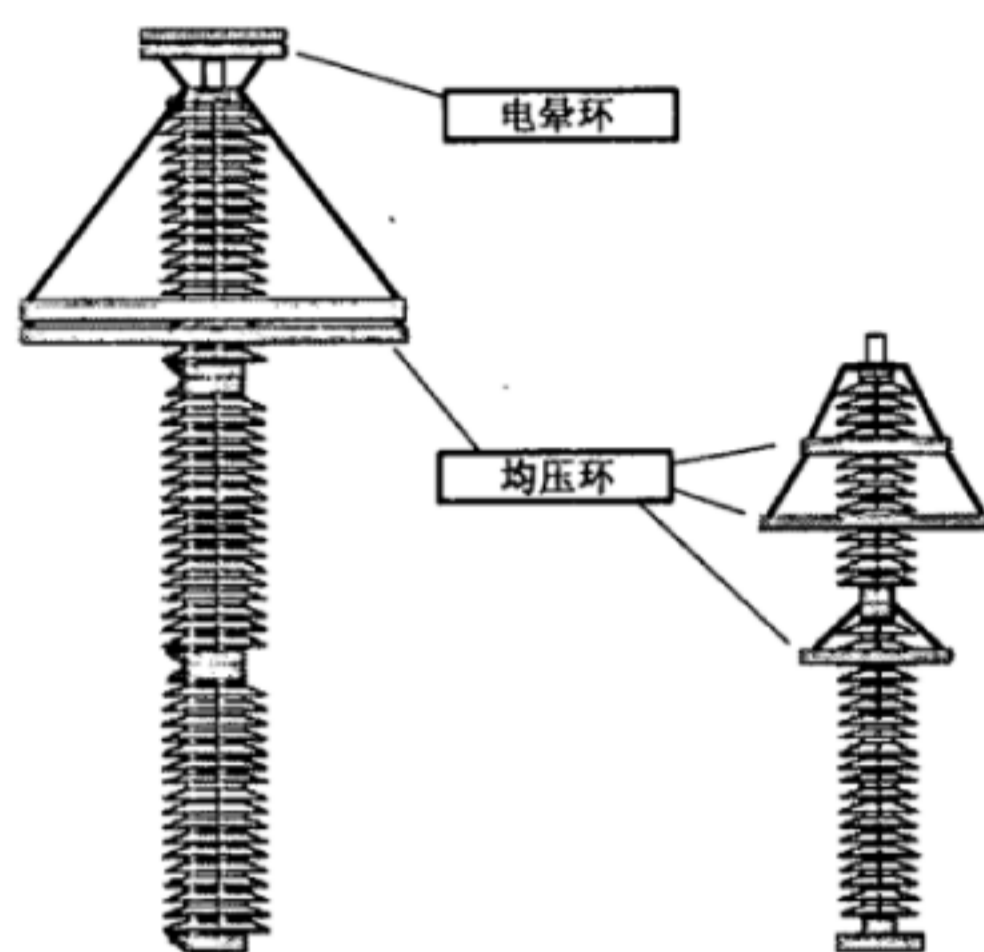


图 4 EHV/UHV 以及 HV 带均压环和防电晕环避雷器

制造厂还清楚地给出了避雷器可能的安装方式(直立、悬挂、斜拉)的说明,当悬挂安装时不能改变伞裙的朝向,即保持伞裙朝下,同样的考虑也适用于当避雷器安装有一定角度时的伞裙朝向(如果制造厂允许的话)。当避雷器悬挂安装时,避雷器上下端的功能改变了。顶端法兰接地,而底座法兰作为高压端子,这种情况下均压环必须安装在底座上(即高压端),如图 5 所示。正如前文所说,避雷器各独立元件可能会有不同的额定电压,因此安装之前要按预先规定的顺序从底到顶放置,或者更确切地说,从接地端到带电端。对于悬挂安装时这种顺序会受到影响,因为此时底部法兰代表高压端,而顶部法兰代表接地端,必须仔细阅读说明书,看是否允许悬挂安装,或是否允许改变安装顺序。通常如果安装方式不同于直立安装时,必须在避雷器订货时提出。若在安装现场有任何疑问,应与制造厂联系。如果为了连接监测装置而将避雷器竖立在绝缘底座上,绝缘底座在长期工作情况下应该经常打扫不允许发生短路,尽管短路或者绝缘底座被旁路不会影响避雷器的功能,但可能会引起所连监测装置的失效。

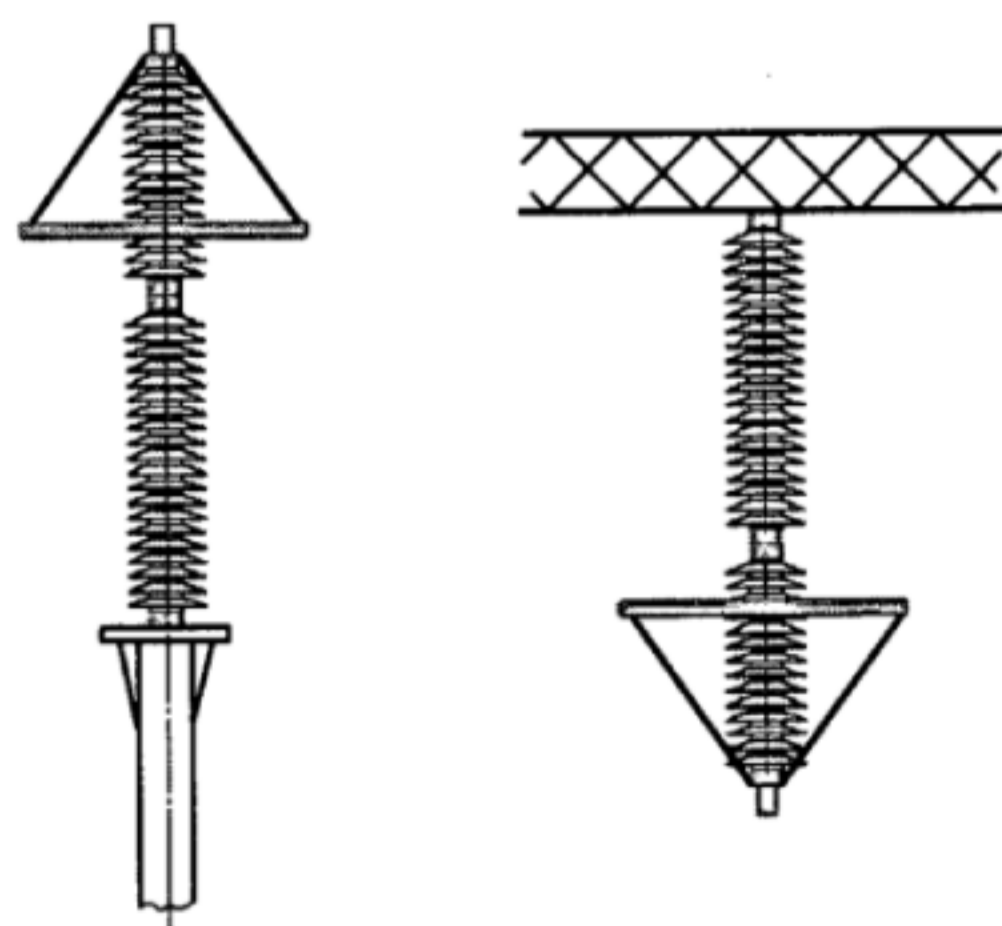


图 5 支架避雷器和悬挂于钢结构的避雷器

如果避雷器安装有压力释放装置和喷口,应该仔细选择喷口的位置,首先要保护人员安全,其次在压力释放动作时,寻找一种好的办法,不仅能够保护人员安全,而且能够保护设备免于受燃烧电弧的影响。应当注意到,喷口出口的方向和短路电流引起的电力的方向共同决定燃烧电弧的运动方向。这种情况下,应避免避雷器与电弧直接接触,尽可能避免外套热爆炸(瓷外套避雷器)或外套燃烧(复合外套避雷器),从而减少故障损失。

2.3.1.2 保护范围和间隔距离

对于快波前过电压,其上升速率比较快,避雷器和设备之间的行波效应不能忽略。通常,被保护设备上的快波前过电压预期比避雷器残压高。被保护设备端子上的过电压陡度是原过电压陡度的两倍,直到过电压波从避雷器到电气设备传播时间的两倍后,避雷器可以有效地减小这个过电压。从避雷器到设备终端行进两个行波周期后,设备终端过电压会升高到行波电压的两倍,导致振幅超过避雷器雷电冲击保护水平两倍、周期为行波从避雷器到设备终端所用时间四倍的阻尼振荡。传播距离越短,过电压幅值越低。因此,最好降低避雷器和设备之间的保护距离,有时,只要行波上升速率可以被限制,变电站和架空线路屏蔽较好,一个避雷器可保护多台设备。

应用避雷器做设备的雷电过电压保护可以有两种情况:

- 对给定的避雷器保护水平和保护距离,确定必要的绝缘配合用雷电冲击耐受电压,然后乘以安全系数,得到额定雷电冲击耐受电压;
- 对给定的避雷器保护水平和配合耐受电压,通过雷电冲击耐受电压除以安全系数,确定避雷器保护区域,以确定最大保护距离来满足绝缘配合要求。

原则上讲,上面两种都需要知道被保护设备精确的过电压波形以及与波形有关的耐受电压,为了简化起见,假设以下条件就满足这些要求:

- 比较标称放电电流(或陡波冲击电流)的残压与被保护设备的雷电冲击耐受电压;
- 要求被保护的典型雷电过电压通常在避雷器中引起的电流波形的波前时间接近 $1\ \mu\text{s}\sim 8\ \mu\text{s}$,采用陡波电流下的残压似乎是比较合适的,而陡波冲击电流下的残压比标称电流下残压大约高 5%。

有时,受空间尺寸的限制,可能无法采用标准净距。因为标准净距的规定都是基于冲击耐受电压,所以减小净距还是有一定可能性的。然而要注意净距是要根据变电站的操作冲击耐受 $SIWV$,而不是避雷器的保护水平所决定的。这是一个在确定新的输电电压等级时讨论很多的问题,如减小距离时,必须包括均压环。这在输电电压等级更成问题,在此等级净距减小时必须考虑均压环。

2.3.1.3 连接引线

站用避雷器的连接引线截面通常都比较大,因此对于连接引线的要求更多地是取决于机械方面,而不是电气方面,主要考虑的问题是能与架空导线或母线合适地连接配合。由于放电电流持续时间短,尽管电流很大,导线的功率和能耗也不起太大的作用。连接引线的固有电阻和电感阻抗会增大被保护的设备上的有效残压,这个问题对保护快波前过电压很敏感。因此,应该使引线长度尽可能短,尽可能没有感性回环,例如,期望陡度为 $5\ \text{kA}/\mu\text{s}$ 的雷电冲击电流,电感压降为该陡度乘以雷电冲击电流流到有效接地通道的总长度(由线路连接到避雷器的导线长度+避雷器高度+到有效接地的接地线长度)。以图 6 为例,总长度为 10 m 时,电感压降为 50 kV。

$$U_i = L \times \frac{di}{dt} = 10\ \mu\text{H} \times 5\ \text{kA}/\mu\text{s} = 50\ \text{kV}$$

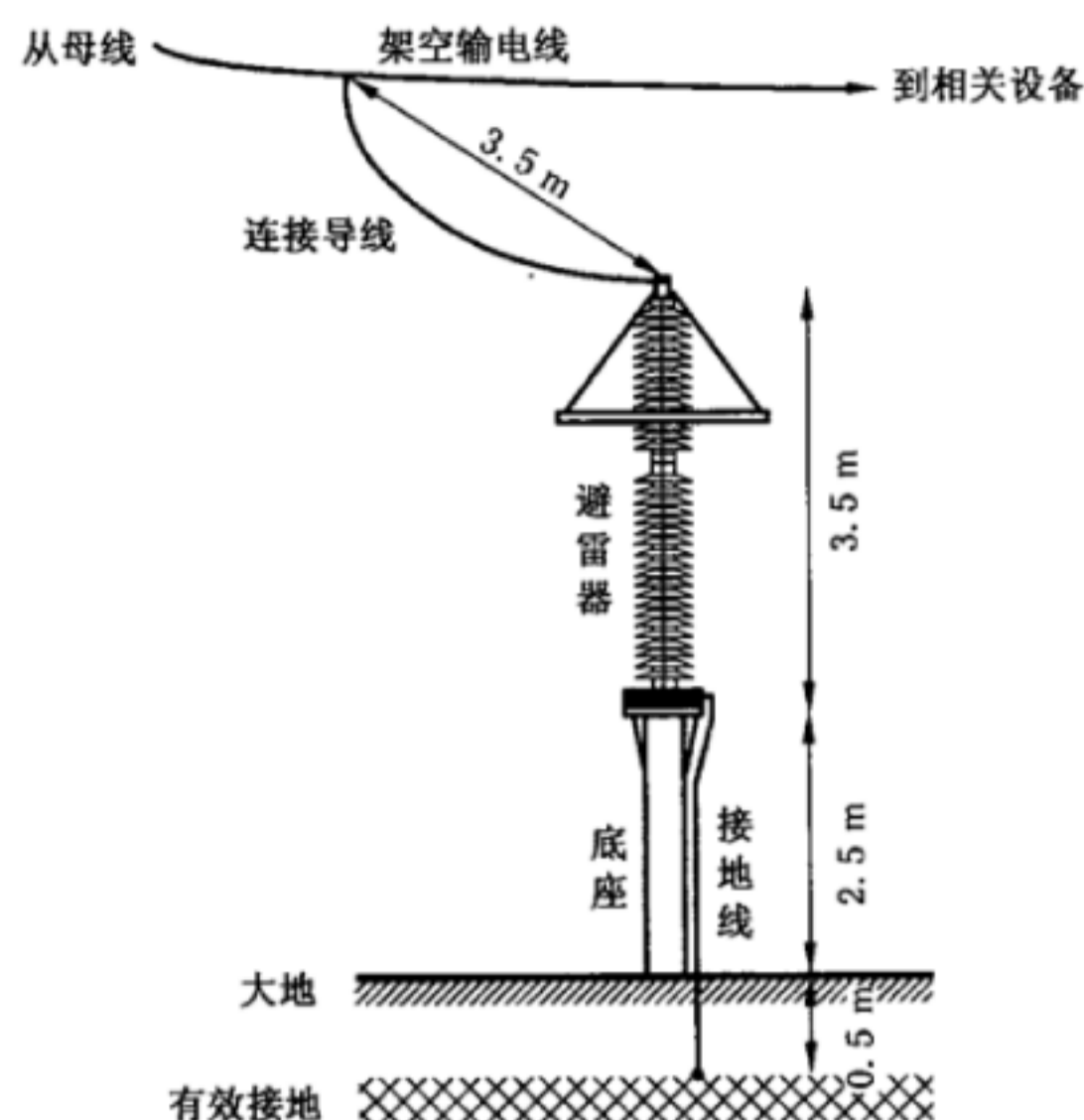


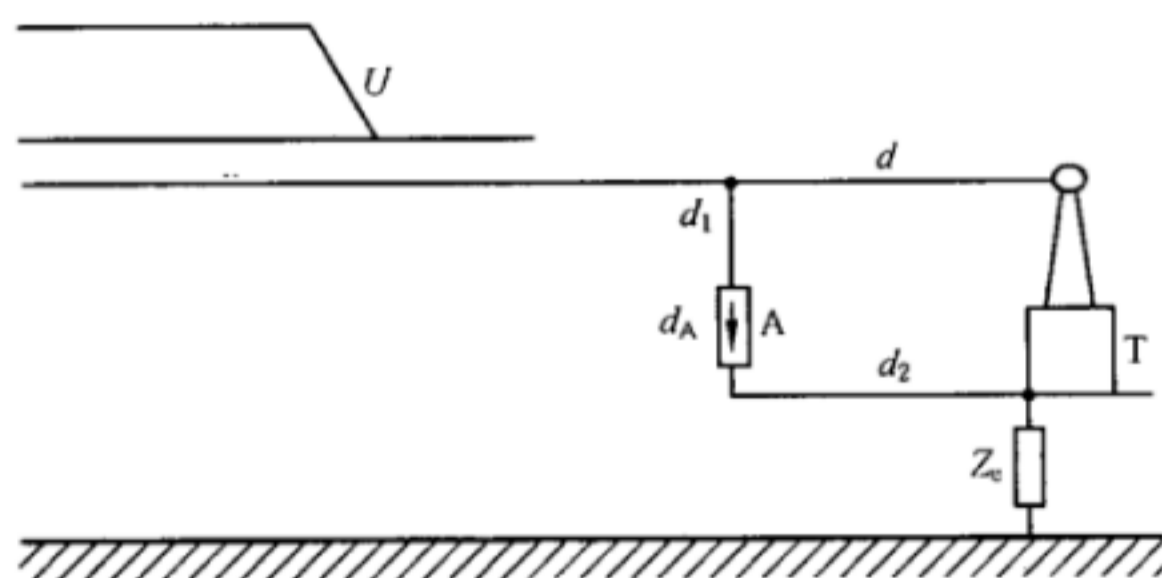
图6 雷电冲击电流产生电感压降的示例

该电感压降不一定会同时出现在避雷器残压峰值上。然而 50 kV 表示的是电感压降可能的数量级,它可能叠加在避雷器的残压上(例如,会由 800 kV 增至 850 kV)。尽管在稳定运行条件下,流过连接导线的泄漏电流通常只有几个 mA,但是连接导线的电流额定值必须满足避雷器动作期间的电流要求(kA 级; $\mu\text{s}\sim\text{s}$ 的持续时间)。连接导线及其端子的额定值必须满足冲击电流负载和额定短路电流的要求。任何固定件也必须能够承受如上所述的机械应力,特别是当用于避雷器非直立安装,如倒装或斜拉安装时。

2.3.1.4 避雷器接地

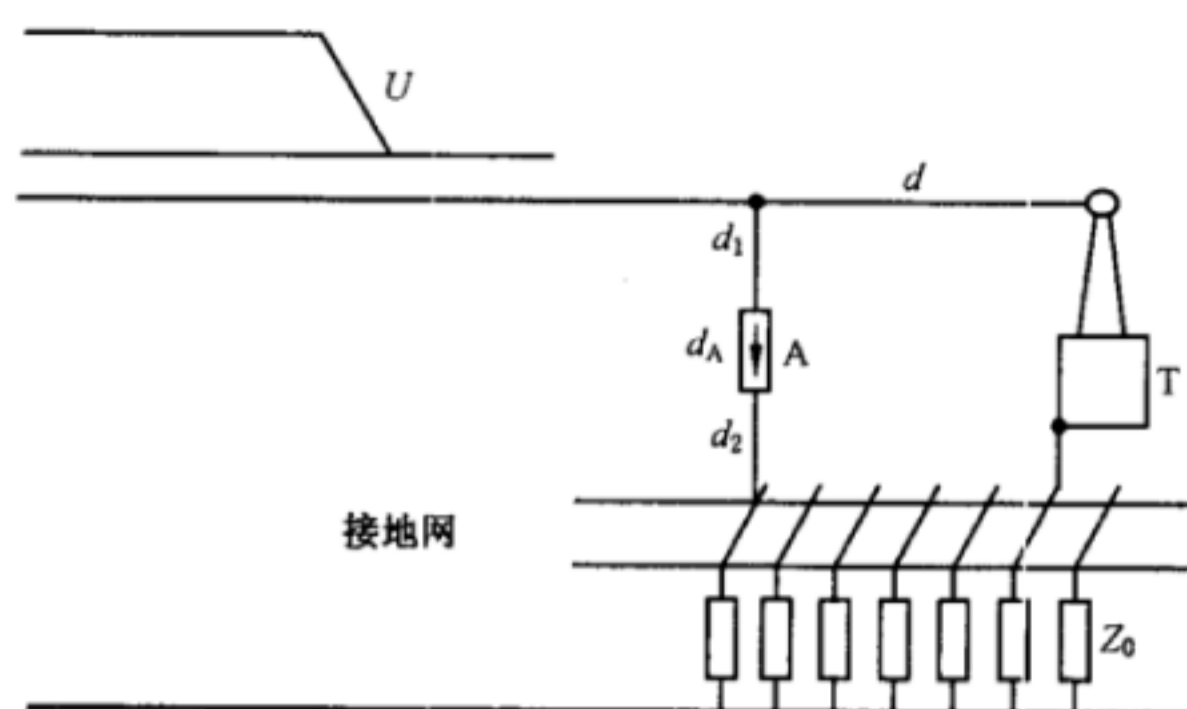
一般情况下,为了确保有效的过电压保护,避雷器应该尽可能靠近所保护的设备,高压引线和接地引线的长度应当尽可能短,而且尽可能直,以减小电感并保证引线上的最小压降。高压端和接地端连接引线连同连接点应保证满足耐受大冲击电流以及在避雷器或设备安装处闪络时的短路电流。对地阻抗应较小,以便使高幅值电流能够安全入地。

避雷器接地端一般连到变电站接地网,图 7 和图 8 分别说明了配电系统和变电站不同的接线方式,其中接地网是影响保护电压水平的参考点,避雷器通过这个点将电流迅速导入地网以提供过电压控制。



- | | |
|-------------------------|--------------------|
| d ——避雷器和被保护设备间的相导线长度; | d_A ——避雷器有效部分长度; |
| d_1 ——避雷器到线路的引线长度; | U ——过电压侵入波; |
| d_2 ——避雷器到地的引线长度; | Z_e ——接地电阻。 |

图7 无接地网避雷器安装(配电系统)



- d ——避雷器和被保护设备间的相导线长度；
 d_1 ——避雷器到线路的引线长度；
 d_2 ——避雷器到地的引线长度；
 d_A ——避雷器有效部分长度；
 U ——过电压侵入波；
 Z_0 ——接地电阻。

图 8 有接地网避雷器安装(高压变电站用)

避雷器和被保护设备之间的连接引线应该尽可能短,以减少由于导线阻抗对快波前过电压引起的电压降。此外,如果避雷器接地引线是过长的环状回路,可能导致避雷器绝缘底座的闪络,因为通常绝缘底座的耐受电压只有几千伏。直接与设备(如变压器油箱)连接时是有效的。但要注意高频电流通过油箱的导电路径,因为这可能会引起电位升高的问题,导致安全风险。

对于最为常见的支架式安装的站用避雷器而言,基本上都会配套安装监测器(或放电计数器)。支架高度通常可达 2 m~7 m。为便于观察,监测器一般安装于离地 1.5 m 的高度处,而接地引线必须从避雷器的接地端(接地底座的上端)连接到监测器然后接地,这样将不可避免会增加一段 2 m~7 m 的引线。为此必须考虑和解决两个问题,第一是引线所引起的附加残压增加,第二是引线的固定以及引线的额定电流问题。

对于倒装或悬挂式安装的避雷器,接地线可能非常长(如超过 20 m),在设计避雷器保护裕度时必须认真加以考虑。

接地效果会影响避雷器保护水平,因此,如果接地系统不是固定在地,需要认真研究快波前过电压的裕度。

在高压系统(特别是范围 II)中,往往很难将避雷器和被保护设备靠得很近。然而,应尽一切努力以减少避雷器及被保护设备之间的距离。为了有效的过电压保护,避雷器及设备之间的距离应该小于 10 m,常见的间隔距离平均大约在 3 m~5 m,这就使在避雷器基础和被保护设备接地端之间的直接短线连接很困难。这种情况下,避雷器一般连接到变电站接地网上,通过变电站接地网和设备接地端连接起来。但是这些位置没有提供低阻抗接地连接,避雷器的过电压保护能力可能会受削弱。而且,当通过高幅值快波前过电压时,在紧靠避雷器本身的接地连线上和被保护设备处可能出现地电位抬高。

众所周知,由于快波前冲击波在接地系统中会迅速衰减,远离注入点的地表电位会迅速下降。这会导致同一接地系统临近位置间的电压有很大差别。为了最大限度减小这种电压差别,应该用尽可能短和直的接地线将设备和避雷器的接地点连接起来,为了避免弯曲的避雷器接地引线和改变避雷器接地引线的方向,有时会有必要凿穿混凝土基础结构。更重要的是要以有效方式降低接地系统的地电位抬高和采取措施释放过电压电流,因此推荐使用高频接地棒。这些高频接地棒可以打入地下 5 m 或更深,视当地土壤电阻率而定。这种接地棒使其与更深的、电阻率更低的土壤层接触。因此,可以改善冲击电流的消散,降低总的接地电阻。当不能采用高频接地棒时,也可以采用埋入地中防腐蚀的水平导体

地网。如果距离较远,则接地连线应直接铺设于避雷器和设备之间高压导线连接路径的地下,以降低回路的电感。

2.3.1.5 高频接地棒

高频接地棒一般和接地系统绑定在一起,当需要提高避雷器电流导入大地速度时采用这种棒,这种棒对于快波前过电压的保护特别重要。如若不可能时,避雷器接地端与被保护设备之间的连线应尽可能短且无弯曲,以避免引起保护裕度的附加降低。

2.3.1.6 机械特性

对避雷器运行中的机械应力的认识常常比较含糊,因而提不出要求,或者可能是要求过高。通常,静态抗弯负荷很少构成避雷器的问题。除静态抗弯负荷外,还必须考虑动态负荷的要求。这可能是由某些原因引起,例如,短路电流通过导线或者大风等。在这种情况下,对于瓷外套避雷器,由于瓷外套的脆性和分散性,避雷器的静态负荷仅能承受动态强度的40%以下。另一方面,规定的顶部允许动态负荷应该通过试验验证其相对应的实际破坏负荷平均值,至少有20%的安全裕度。典型的瓷外套避雷器的最大允许水平拉力见表1。

表1 最大允许水平拉力 F

避雷器额定电压(有效值) kV	2.4~25	42~90	96~216	288~468	600~648
最大允许水平拉力 N	147	294	490,980	980,1 470	水平横向 2 500 水平纵向 2 500

对复合外套避雷器,静态负荷和动态负荷的比率可能是不同的,目前还没有建立统一标准,制造厂一般使用自己的设计准则,由于其机械特性的分散性比较小,所以可以采用较小的比值(而对于树脂浇注外套类,因其特性与瓷外套类似,有脆性,因此,被认为是完全可考虑与瓷外套同样的方式)。由于GB 11032—2010中没有具体的动静负荷的固定比值,因此,在比较样本值和技术数据时必须十分小心。图9指出了适用于瓷外套和树脂浇注外套以及复合外套避雷器的机械性能的确切方法。

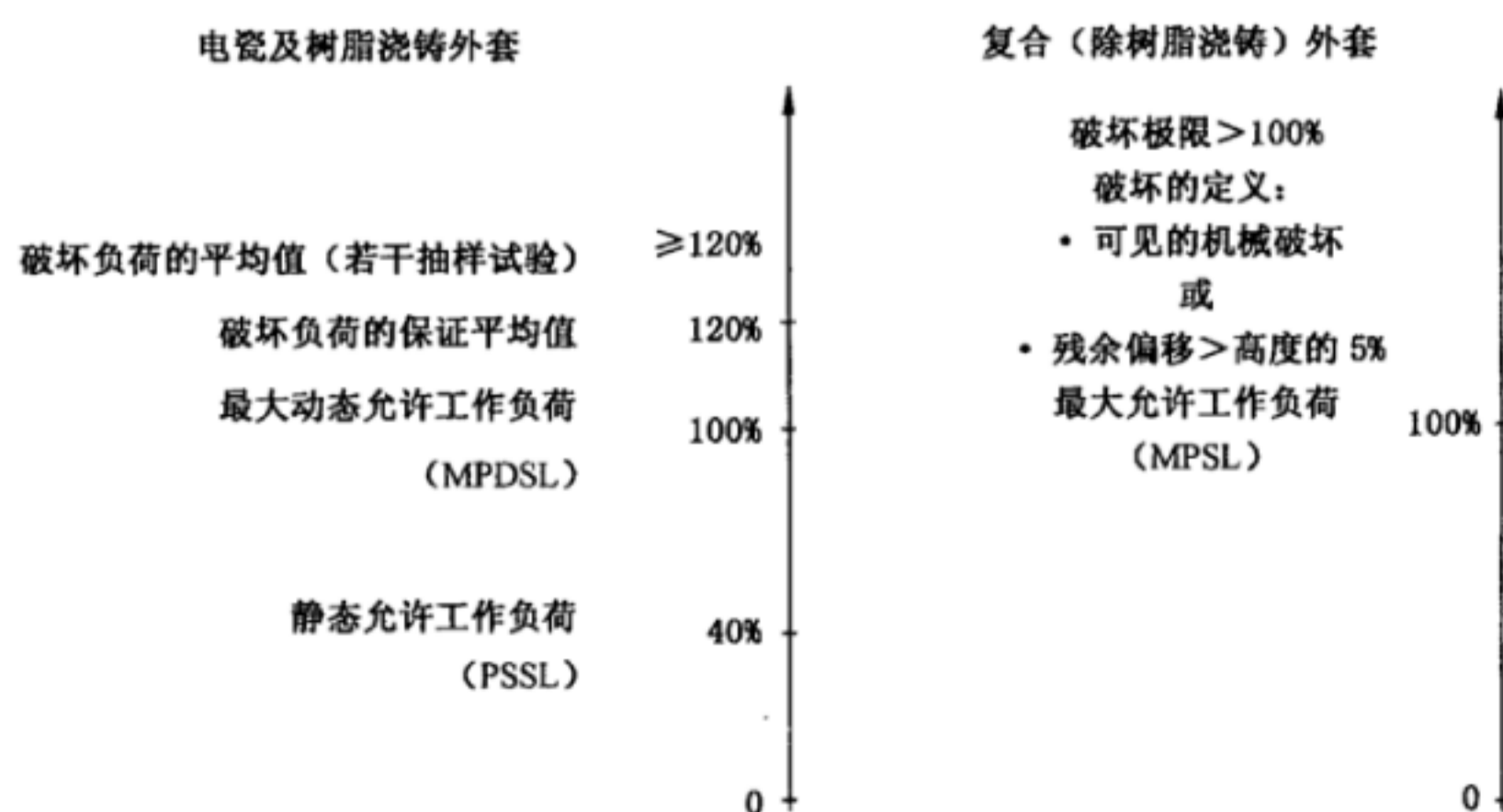


图9 机械负荷定义

与瓷外套相比,复合外套在机械负荷作用下会出现可见的偏移,通常并不考虑它,但是若这种特性可能引出某些问题时,就必须选择机械强度更大的外套(瓷外套在机械负荷下几乎不发生弯曲)。

对于复合外套避雷器,可能会选择不同于传统的基础固定的“直立”安装方式。如选择悬挂式安装,避雷器的机械强度要求最小,但是避雷器的整个结构必须能够长期承受避雷器本身的重量,现有避雷器一般不采用这种安装,设计阶段就应该考虑这些问题。

2.3.2 配电系统避雷器

2.3.2.1 安装

制造厂应当在说明书中明确说明配电系统避雷器应该怎样装配、安装、维护、运输、贮存以及处理。

配电系统避雷器是单节元件避雷器,无均压环,常常直接安装在配电变压器上。这种避雷器可能装有脱离器、支架、故障指示器以及其他野生动物保护器(鸟罩)。

当避雷器过负荷时,脱离器用来将避雷器和被保护设备自动分离,一般直接安装在避雷器接地侧。脱离器应当不仅能够将避雷器和地电位隔离,同时还能指出应该替换的故障避雷器。脱离器的对地连接必须比较灵活,和避雷器底端之间必须有足够的绝缘距离,以便在脱离器动作后,脱离的接地端可以自由垂下,在避雷器下部接地端出现施加的运行电压时,不致引起放电。

脱离器的作用是:避免故障避雷器导致系统永久短路、开关跳闸,这样系统才能继续供电。脱离器确实在人无法触及或者故障避雷器不能被很快更换的地方起了很大作用,脱离器的弱点是如果避雷器被脱离,系统就失去过电压保护,这就是为什么要移去故障避雷器,迅速换上新避雷器的原因。

绝缘支架和脱离器一般配合使用,其作用是在避雷器故障后配电变压器可以继续运行(见图 10),其他种类的支架一般只用于安装。

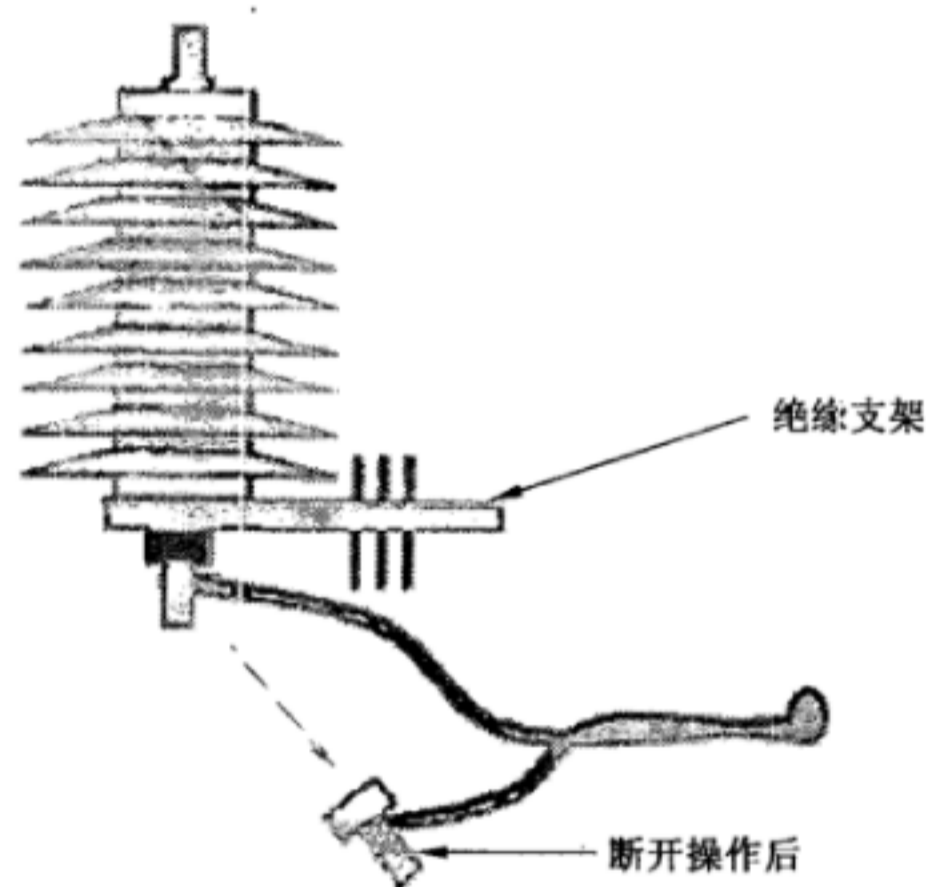


图 10 带脱离器和绝缘支架的配电系统避雷器

如果高压熔断器和脱离器安装在相同的电路中,两个保护设备的响应特性必须能够彼此配合。脱离器必须在熔丝熔断之前及时响应,或者和熔丝同步响应,这样就可避免更换后的新熔丝由于短路依然存在,而再次切断短路电流。

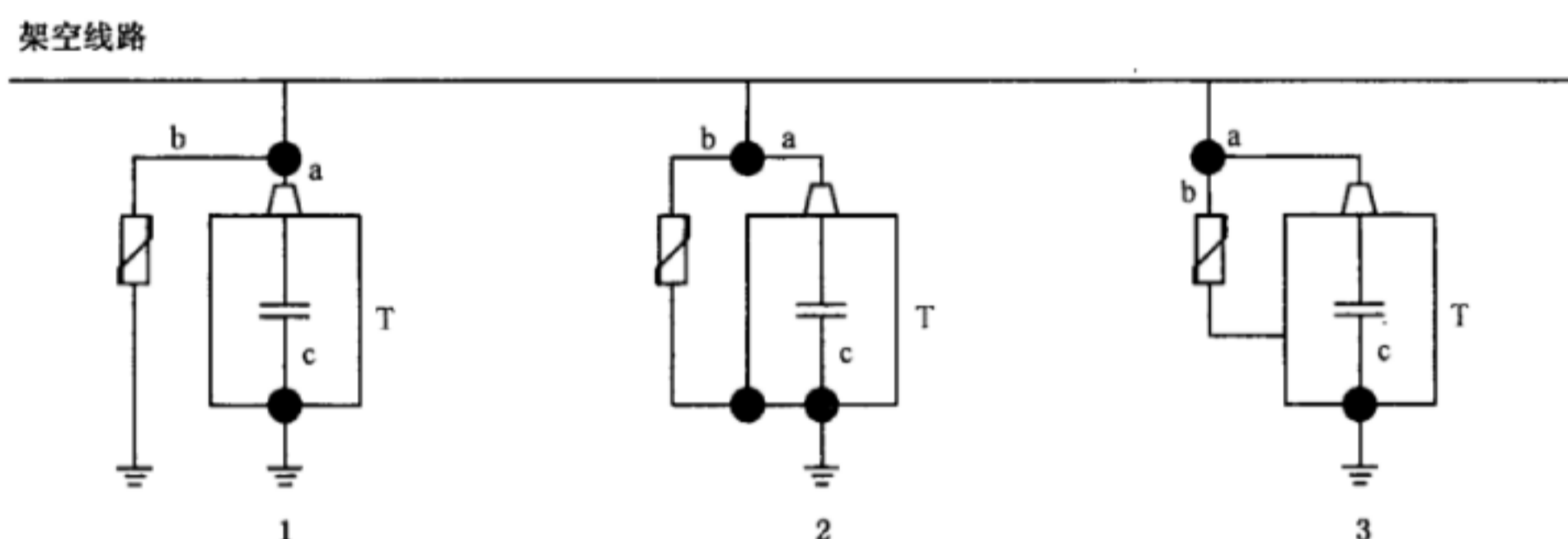
故障指示器用比较明显的颜色警告避雷器已经发生故障,表明避雷器应该被更换。指示器一般安装在高压侧或者直接安装在避雷器接地侧,它不能起到将避雷器隔离的作用。如果避雷器故障,可以被发现并迅速地移去。

为了减少配电用避雷器的外部闪络,需要考虑野生动物保护器。配电用避雷器比较短,动物可能会短接避雷器的高压端和其接地端或其附近的接地点,在避雷器附近安装栅栏或大的野生动物保护器可以起到一定的作用。

2.3.2.2 连接引线

用户通常应能观察到连接引线。选择连接引线的截面积应至少保证通过避雷器的短路电流(给定短路电流持续时间)不应导致连接引线熔化或扯掉。这一点既适用于高压端连接引线,也适用于低压端连接引线。

当考虑快速上升雷电冲击时,配电用避雷器相对于被保护设备的位置非常重要,此时与避雷器串联的引线和与设备并联的引线由于内在电感会产生很大的电压降,这种引线电压降会附加到避雷器的快波前响应特性上,连接引线应当尽可能短而且直,因为冲击电流流过时,由于自感会在连接上产生电感压降,当 $\frac{di}{dt}$ 很高时,如雷电流,此电感压降是应该考虑的。金属氧化物材料本身对较陡的电压和电流响应几乎是同步的,就避雷器和连接引线本身而言,电感压降总是存在,在陡波电流冲击时必须考虑电感压降,从数据手册上可以查到的残压通常仅指避雷器端子间的电压,见图 11。



分析上述三种接地方法:

方法 1:效果差,避雷器和变压器没有相同的接地端,过电压首先到达变压器套管,连接线 b 太长。

方法 2:效果好,避雷器和变压器有相同的接地端,连接线 a 和 b 长度相同。

方法 3:效果非常好,避雷器直接在变压器油箱上接地,连接线 b 几乎为零。在这种情况下,过电压侵入波首先到达避雷器,无延迟地限制过电压。

图 11 三种接地方法

电感压降的计算式为: $U_i = L \cdot \frac{di}{dt}$

设 1 m 长直线的电感为 $L = 1 \mu\text{H}$,雷电流波形为 8/20、幅值为 10 kA,则每米连线的附加电感压降大约为 $U_i = 1.2 \text{ kV}$ 。而对于上升时间为 $1 \mu\text{s}$ 、幅值为 10 kA 的陡波冲击电流,则每米连线的附加电感压降大约为 $U_i = 10 \text{ kV}$ 。因此必须尽可能地消除引线和回环的电感效应,而且,避雷器和变压器必须在同一点接地。

2.3.2.3 配电系统避雷器的接地

在配电系统中,避雷器常常和被保护设备(例如变压器)靠得很近,这种情况下,避雷器接地端应该和被保护设备接地端用非常短而且尽可能直的导线连接在一起。

接地电阻应该尽可能小,以限制接地端地电位升高,减小危险性,确保变压器高压侧不发生闪络。一般接地电阻小于等于 10Ω 就行,接地电阻一般用直流电流或者 50 Hz 交流电流测量,高频下数值可能更大,这就是为什么要使用特殊的接地装置来释放冲击电流。

对于柱上变压器,需要仔细设计接地极,采用接地棒和地网降低接地电阻。应参考可用的接地规程。

变电站中,如果避雷器支架和被保护设备相连,避雷器接地连接端应当通过合适的直导体和主接地

网连接。

2.3.2.4 机械特性

配电系统避雷器由于很短,静态抗弯负荷很小。由于避雷器一般安装在柱上与架空线路连接在一起,安装时最大允许扭矩再加上风力对这种避雷器来说或许是比较重要的。

2.3.2.5 油浸避雷器

配电变压器内装的 MOV 会给变压器提供优异的保护。如果由于雷电或其他原因造成避雷器失效,整个变压器就要更换,因此,这种装置一般适用于单相变压器。

2.3.3 线路避雷器(LSA)

线路避雷器可直接安装在架空线上,通常无间隙线路避雷器(NGLA)比有间隙线路避雷器(EGLA)更容易安装。最简单情况下,没有任何附加机械或电气特性要求的配电线路避雷器就是一个标准的配电用避雷器。

输电线路用无间隙避雷器 NGLA(有时称 TLA),这种避雷器可以直接悬挂在线路导线上,靠近绝缘子,接地连线与杆塔构架连接。对于 NGLA 而言,配合以适当的脱离器一起使用是必要的,但是该脱离器的电气特性通常有别于一般的配电用避雷器的脱离器,因为,当脱离器在不脱离状态时承受的动作用负载比较重。但是在脱离之后,还必须保证避雷器的任何部件(在风中舞动时)不会对地闪络。接地引线的长度一方面要求适当地长,以允许避雷器因风而舞动;但另一方面又应该尽可能短,以便减小电流回路和快波前电流引起的避雷器残压升高。

注意:对较高电压等级无间隙避雷器上要安装均压环(前面已经讲过均压环的作用)。

安装金具的寿命特性,在许多情况下,可能比避雷器本身更关键。因此,在规定金具特性时应特别留意。设计时,应考虑让其承受最小的机械应力,而对其质量要求,则应该考虑极端苛刻的机械应力和环境运行条件。

如果避雷器直接竖立安装在杆塔上,或者倾斜有一定角度,或者和杆塔主结构保持水平,必须确保避雷器有足够的机械强度。不能低估振动、风、以及覆冰对避雷器的影响,这要比电站避雷器所受的此类影响大得多。如果避雷器挂在横担上,应当认真考虑伞裙的方向。

EGLA 的安装应综合考虑各种影响因素,既要允许本体和导线有合适的摆动空间,又要考虑到这种摆动不致于影响到间隙的放电电压。

2.3.3.1 故障清除

与变电站内的避雷器相比,LSA 的电应力过载以及由于雷电冲击而造成的过度能量吸收引起的故障并进而导致避雷器损坏的风险会更高,原因是变电站有屏蔽,可以避免高幅值直击雷。鉴于架空线绝缘一般具有自恢复能力,因而对于电应力过载的线路用避雷器(以下简称线路避雷器)是可以做到不影响线路重合闸的。对于无间隙避雷器(NGLA)而言,在过负荷时可以采用脱离器将线路避雷器与线路隔离。而对于有外串间隙避雷器(EGLA)来讲,将外串间隙的放电电压与线路的最大操作冲击耐受电压(SIWV)相配合,可以使线路重合闸时也不致于引起 EGLA 间隙放电。

3 绝缘配合和避雷器的选择

3.1 引言

绝缘配合决定了介质的耐受能力和电力系统在电磁作用下的响应特性。这要求选择设备的电介质强度时要考虑设备所在的系统可能出现的电压,同时还要考虑运行环境以及保护与控制设备的特性。

3.2 概述了基本原则和绝缘配合的实例,它们会具体地影响或决定避雷器的特性。这包括确定设备保护裕度的程序,各种类型的过电压以及避雷器在设备和电网中的应用。

3.3 和 3.4 给出了应用于标称电压 1 kV 以上交流电力系统中避雷器的选择和应用建议。它适用于 GB 11032—2010 所定义的无间隙金属氧化物避雷器的有关部分,也适用于 GB/T 28182—2011 所定义的额定电压小于等于 52 kV 带间隙避雷器和 IEC 60099-8 所定义的用于架空输电和配电线路上的带间隙线路避雷器。

3.2 绝缘配合概述

GB 311.1 给出了绝缘配合的程序。GB/T 311.2 给出了更详细的应用指南。这个标准解决了范围 I (系统最高运行电压不高于 252 kV)、范围 II (系统最高运行电压高于 252 kV) 中设备绝缘的选取和额定耐受电压的确定。

3.2.1 绝缘配合程序

一个典型的绝缘配合程序包括以下几点:

- 系统分析:运行中有代表性的电压和过电压;
- 设备的配合耐受电压(U_{cw}):选择避雷器的保护特性和安装位置(第一步没有考虑雷电过电压);
- 要求的耐受电压(U_{rw});
- 选择额定绝缘水平。

这些选择和应用建议用于选择避雷器的保护特性和安装位置的分析,也决定雷电过电压下的设备的配合耐受电压。

3.2.2 过电压

电力系统受到干扰时会产生过电压,如系统故障、受到雷击和断路器操作等。过电压所产生的应力会超过设备的设计能力,并给系统运行带来不良影响。过电压的类型在确定避雷器时很重要,因为它决定了保护裕度和能量吸收能力。

电力系统在有避雷器保护和没有避雷器保护两种情况下可能出现的典型过电压与设备绝缘强度的关系如图 12 所示。表 2 综合了电力系统中遭受过电压的典型数据。电力系统中避雷器通常不用于保护工频和暂时过电压。绝缘强度一般会随着冲击波前的变短而稳定增加,但是雷电冲击和不可控制的开关操作仍会产生有危险的过电压,需要避雷器保护。

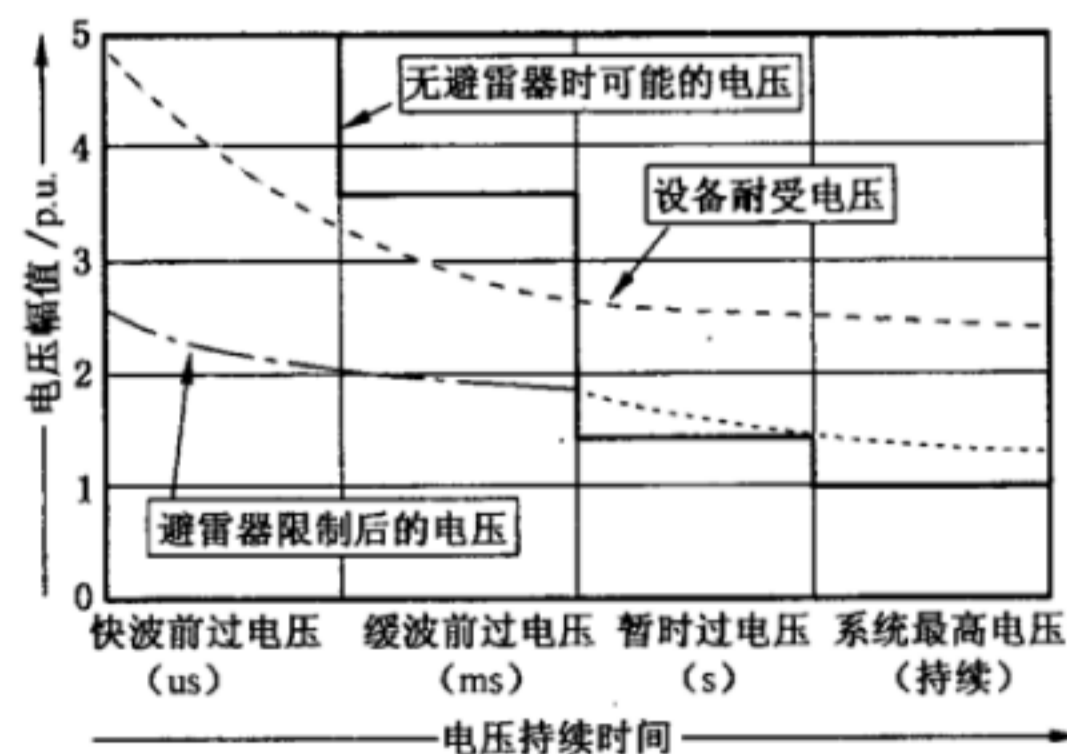


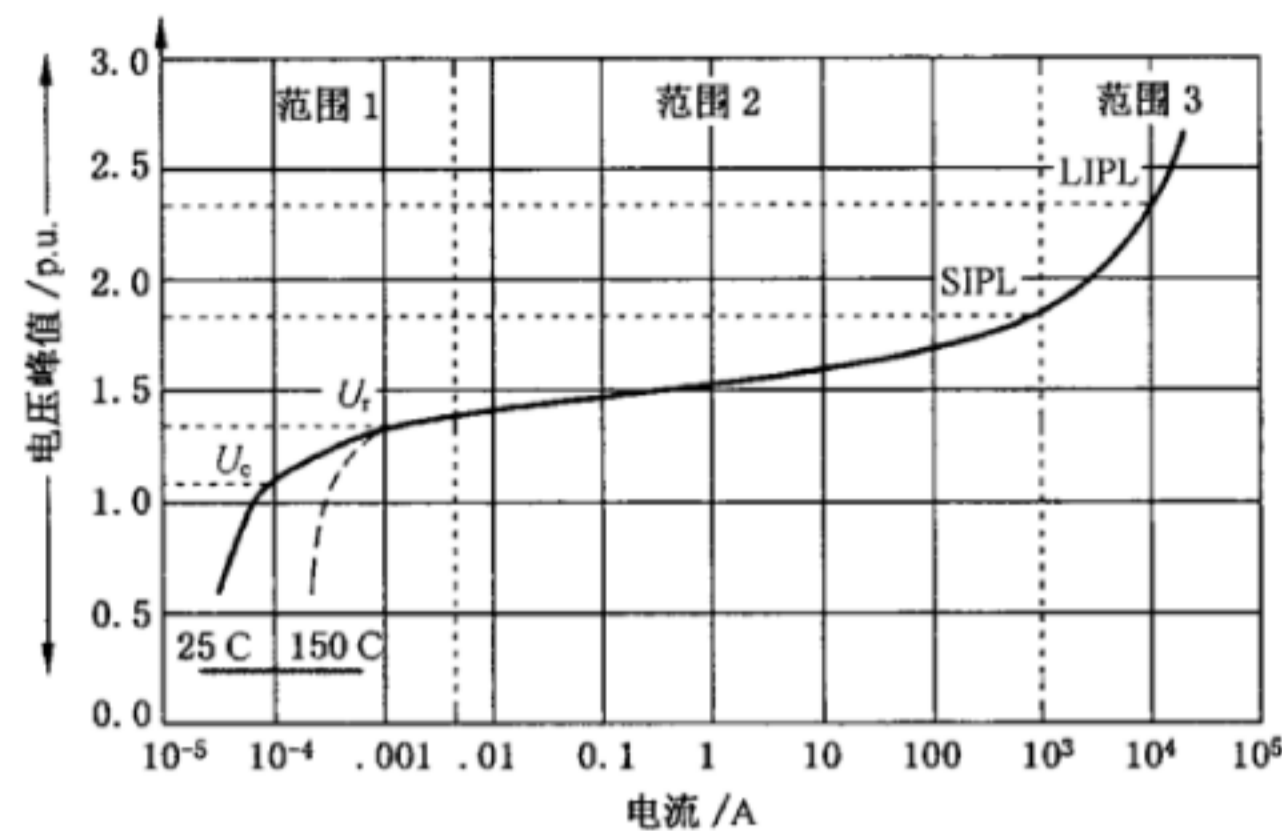
图 12 典型的电压及持续时间(大致相当于 500 kV 电压等级的工况)

表 2 电力系统可能出现的典型过电压

过电压分类			典型过电压倍数 $1 \text{ p. u.} = \sqrt{2} \times U_m / \sqrt{3}$	
暂时过电压	单相接地故障	有效接地系统	1.3~1.4	
		不接地系统	≥ 1.7	
	甩负荷容升效应	200 km 线路	1.02	
		300 km 线路	1.1	
		连接有线路的变压器合闸	1.2~1.8	
操作过电压	线路合闸	空载线路	1.5~2.0	
		无合闸电阻的重合闸	3.0~3.4	
		有一级合闸电阻的重合闸	2.0~2.2	
		有可控合闸的重合闸	1.2~1.5	
	发生故障	非故障相	2.1	
		耦合回路	1.5	
	清除故障		1.7~1.9	
	分合并联电容器组	接地系统	断路器无重击穿	1.7
		不接地系统	断路器发生重击穿 无避雷器	> 3.0
			断路器发生重击穿 有避雷器	约 2~3 (与避雷器的额定电压有关)
	断路器瞬时恢复电压 (TRV) 及恢复电压上升率 (RRRV)	一般回路	TRV	1.7
RRRV			< 2.0	
电感性回路		TRV	约 3.0	
		RRRV 无 TRV 电容	> 4.0	
		RRRV 有 TRV 电容	< 3.0	
进入变电站的雷电陡波过电压	无架空地线		> 4.0	
	有架空地线		< 4.0	

对没有自恢复绝缘能力的电力设备,通常要将过电压限制在其绝缘强度的 85% 以下。另一方面,有自恢复绝缘能力的电力设备上允许出现闪络,可以通过避雷器来限制过电压以达到期望的设备和系统运行性能。

图 13 中给出了典型金属氧化物避雷器的伏安特性。由于电力系统设备在正常电压和暂时过电压下不需要避雷器保护,避雷器主要用于限制雷电和操作过电压。因此避雷器规范确定了避雷器累积的能量吸收能力和相应的电流幅值。当极端暂时过电压下需要避雷器起保护作用时,必须特别注意过电压持续累积的能量以及避雷器并联时电流分担的情况。



范围 1: 稳态运行下的小电流区。

范围 2: 暂时过电压和操作过电压下的高度非线性区。

范围 3: 雷电及操作冲击电流高于 1 kA 的大电流区。

注 1: LIPL——雷电冲击保护水平。

注 2: SIPL——操作冲击保护水平。

图 13 避雷器伏安特性

3.2.2.1 雷电(快波前)过电压

雷电(快波前)过电压一般产生在雷击线路时,有时在设备附近的开关操作也会产生快波前过电压。这些过电压的波头时间一般为 $0.1 \mu\text{s} \sim 20 \mu\text{s}$,波尾时间长达 $300 \mu\text{s}$ 。

雷电冲击电流(通常不高于 200 kA)会在回路上产生电压,这个电压是电磁波在波阻抗上的压降。行波在波阻抗的交界处(设备的连接处)产生反射,当它的电压超过绝缘强度时就会产生闪络或击穿。

雷电是很难预测和量化的,然而统计数据表明大多数雷电流都超过了 10 kA。雷电的发生频繁程度因地区的不同而不同,但是可以根据当地的落雷密度确定。

雷击事件分为两类,雷电直接击中导线或者击中导线附近的地面而在导线上产生感应电压波。当架空地线屏蔽失败或无架空地线时,雷电可能直接击中导线。还有一种特殊情况是在雷击架空地线或者杆塔后发生的,这种现象叫做反击,是一种沿绝缘子反击到导线上的闪络。

雷击对变电站的影响是根据雷击点与变电站的距离而确定的,因为即使只有雷击产生的一小部分电压波到达变电站,只要其幅值和陡度足够高,就会给变电站带来问题。其他因素如变电站的布置也会影响和雷电冲击有关的行波,通常行波会被连接在同一母线上的并联线路分流,降低对关键设备的危险冲击。

快波前过电压也会在分合与开关之间的连接线很短的感性设备时发生。分合空载变压器和并联电抗器是一种可能的情况,它可以产生很多次非常快速的预击穿和重击穿过电压。每次过电压的持续时间和传播都很短但是却会发生多次。一般情况下,设备和开关之间的避雷器可以有效地降低这些快波前操作过电压,同时也会减少开关设备重击穿率。

3.2.2.2 陡波前(特快速瞬态)过电压(VFFO)

陡波前过电压的上升时间小于 $0.1 \mu\text{s}$,它一般是 GIS 中的隔离开关操作或故障,由 SF_6 气体间隙的迅速击穿和几乎无阻尼的冲击波在 GIS 中的传播而产生的。在离开 GIS 时(如到达套管)它们的幅值迅速衰减,同时其波前时间变长,达到了快波前过电压的范围。

一般情况下,避雷器不能有效防护陡波前过电压有两个原因:第一,过电压的电压幅值一般低于避雷器的保护水平;第二,保护效果受到被保护设备和避雷器之间的距离以及避雷器尺寸的影响。

3.2.2.3 操作(缓波前)过电压

在操作时的初始电压与最终电压幅值和极性不同的场合下,会产生缓波前过电压。如果不考虑能量损失,从初始状态过渡到最终状态,电压的过冲可以达到 200%。在电力系统中,由于能量损耗,一般只有前两个或三个周期的瞬态振荡才有较高的幅值。

缓波前冲击波波形的范围很宽,它取决于相关的电路。通常波头上升时间从 20 μs 到 5 ms。

线路合闸和重合闸的操作过电压可以产生通过避雷器高达约 2 kA 的电流。由于目前金属氧化物材料的优良非线性,确定这一范围内电流的准确幅值就不那么重要。对缓波前过电压来说电流的波前上升时间可以忽略。但由于避雷器只能吸收有限的能量,确定过电压的准确持续时间是非常重要的。

一些并不属于线路分合的开关操作也可能产生过电压,如操作并联电容器和电抗器,旁路串联电容器等容性设备时,由于过大的电流通过断路器分断触头而产生的过电压。

线路操作包括线路和设备的快速重合闸,这种操作很容易引起重燃或重击穿,电缆线路在超高压下有很强的储存电荷的能力,由于在重击穿时释放出很大的能量,它将考验避雷器的能量吸收能力。

3.2.2.4 暂时过电压

暂时过电压(TOV)是一种相对地或相对相的振荡过电压,有较长的持续时间并且是无阻尼或者弱阻尼的。在这种情况下,暂时过电压的幅值是可以确定的,它对绝缘的影响按稳态考虑。引起暂时过电压的典型原因如下:

在大部分电力系统中,过电压由接地故障产生。附录 A 给出了决定暂时过电压幅值的导则。过电压的持续时间对应于故障时间(直到故障清除)。在中性点接地系统中一般不超过 1 s。中性点谐振接地(消弧线圈接地)系统,如果有接地故障清除装置的,故障持续时间通常小于 10 s,如果没有接地故障清除装置,其持续时间可能达到几个小时。

甩负荷时随着负荷的切除,断路器操作的电源端会有电压升高。过电压的幅值取决于切除的负载和供电变电站的短路容量。发电机变压器侧全负荷断开时,暂时过电压有很高的幅值,这个幅值取决于励磁和超速情况。甩负荷过电压的幅值并不是固定的。精确计算需要考虑很多参数,应考虑下述典型的过电压值:

- 在中等大小的电力系统中,由完全甩负荷引起的相对地过电压的幅值一般小于 1.2 p. u.。过电压的持续时间取决于电压控制设备的动作情况,有可能达到几分钟;
- 在较大的电力系统中,当发生电容性升高(Ferranti 效应)或者共振效应时,由完全甩负荷引起的相对地过电压可以达到 1.5 p. u. 甚至更高。其持续时间可以达到几秒钟;
- 当发电机变压器甩负荷时,汽轮发电机的暂时过电压幅值可以达到 1.4 p. u.,而水轮发电机则可以达到 1.5 p. u.,其持续时间大约为 3 s。

下述原因引起的暂时过电压则需要考虑电力系统的性质:

- 谐振效应,例如当空载长线充电或系统之间的共振;
- 长线上的电压升高(Ferranti 效应);
- 谐振过电压,例如分合变压器时;
- 通过互联变压器绕组的反馈,例如有共同的二次母线的两个变电站故障清除时或者三相负载不对称变压器的一相动作时。

由铁磁谐振引起的暂时过电压不能作为避雷器选择的基础。使用避雷器作为额外负荷去阻尼掉铁磁谐振不是有效的方法,也没有经过证实。同样的看法也适用于线性谐振。铁磁谐振有多种形式,铁磁谐振的高次谐波不会产生过电压,但基波铁磁谐振可能会产生很高的暂时过电压。

需要注意引起暂时过电压的两种起因的次序,例如由接地故障引起的甩负荷,因为这两种过电压都相当严重。在这些情况下,甩负荷的容量取决于故障的位置,此时要慎重确定避雷器的安装位置。

由接地故障和甩负荷共同引起的暂时过电压比其中一种情况单独作用下引起的暂时过电压都要高。当这两种情况共同发生的可能性比较大时,要综合考虑电力系统的实际结构。

3.2.3 绝缘配合

绝缘配合可以分为两个基本类别:线路绝缘配合和变电站绝缘配合。线路绝缘配合主要防止由雷电或者线路上开关操作所引起的线路故障,而变电站绝缘配合主要保护变电站的设备不受线路上雷电侵入波的损害,以及在变电站开关操作时对当地和远方设备的损害。

3.2.3.1 线路绝缘配合

线路运行中的绝缘配合性能可以分为雷电和操作两个基本类别。评估它们性能的方法主要基于预期的快波前和缓波前过电压以及规定的绝缘水平。由于线路绝缘是可自恢复的,其性能通常都是由统计法确定。

3.2.3.1.1 雷电过电压

实际上,并不能完全防止雷击导线,除非所有相导线完全用架空地线包围起来。此外,为了保证不发生闪络而屏蔽所有导线是不经济的。有些地方接地电阻很大,从经济角度考虑,架空地线并不能充分发挥作用。

有效的架空地线可以拦截大多数高幅值的雷电流,根据雷电流的严重程度和杆塔的设计,再适当降低杆塔接地电阻,就能使得绝缘子的闪络或故障降到最低。

3.2.3.1.2 绕击率

绕击率是指雷绕击到相导体上的概率。并不是所有这些绕击都会导致闪络。然而,如果雷击到相导体上所产生的电压超过线路的临界闪络电压,就会发生闪络。

3.2.3.1.3 反击率

反击率是雷击到杆塔或架空地线上,并导致绝缘子闪络的概率。雷电流使杆塔电压升高,由此在线路绝缘上产生了一个电压。如果电压超过了线路的绝缘强度,就会产生由杆塔到导线的反击闪络。

反击是雷电引起线路供电中断的主要原因之一。当地的接地情况(土壤电阻率和接地设计)对反击影响较大。

3.2.3.1.4 操作过电压

目前,实际上所有的超高压线路都是采用概率方法进行设计的。这种方法适用于标称电压为330 kV 及以上的线路,但是不适用于220 kV 及以下的线路。对220 kV 及以下的线路,由于较低电压等级的操作过电压幅值较低,雷电工况下对线路绝缘的要求已提供足够的操作波绝缘强度。

3.2.3.1.5 闪络率:统计配合因数

GB/T 311.2 假定过电压和电气强度的分布可以通过它们的分布曲线图的每一个点来定义。统计过电压定义为有2%概率的过电压超过该数值,而统计绝缘耐受能力(电压)是指绝缘具有90%的耐受概率。

统计配合因数是统计耐受电压与统计过电压之比,闪络率由闪络与配合因数关系图(GB/T 311.2)得到。统计配合因数和闪络率的相互关系显示过电压波形的改变只会对它产生轻微的影响。

3.2.3.1.6 操作冲击闪络率

操作冲击闪络率是所加电压和耐压强度关系的数值积分。所加操作过电压的分布可以由三种概率

密度函数中的一种来近似,这三种函数为:高斯、正偏斜极值和负偏斜极值,而耐压强度由等效的大量并联绝缘子的耐压分布得到。

操作冲击闪络率可以采用统计法研究。

3.2.3.2 变电站绝缘配合

变电站运行中的绝缘配合性能取决于变电站和线路的情况。绝缘配合研究的复杂性决定于分析深度和采用的模型。电力系统暂态分析具有主观性。

3.2.3.2.1 快波前过电压(雷电)的保护

保护变电站不受雷击包括两个基本任务:

- 防止雷电直接击中设备或者母线。这可以通过对变电站屏蔽做到。此外可以用避雷器保护设备。
- 保护变电站设备不受电网产生的侵入波的危害。这保护取决于线路的设计、变电站的布置和避雷器的应用策略。侵入波的严重性是根据线路上的雷击点到变电站的最小距离来估计的,根据线路的电气特性,它会通过电晕逐渐衰减。

变电站内避雷器安装位置的主要影响因素是线路和变电站的屏蔽性能。即使相关的线路没有架空地线,通常也要给变电站安装架空地线和避雷针。变电站避雷针/线降低了当变电站遭受大雷电流冲击时发生高压和陡波冲击的可能性。但是,应该注意大多数的雷击作用在线路上,它会产生从线路侵入到变电站的行波。如果线路有架空地线,进入到变电站的侵入波能量远远小于线路没有架空地线的情况,流过避雷器的雷电流很小,避雷器的残压很低,从而更好地保护设备。

3.2.3.2.1.1 变电站的屏蔽

敞开式(AIS)变电站屏蔽的基本设计和线路的稍有不同。虽然对于变电站母线来说,采取与线路相同的绕击跳闸率是可行的,但是对于特殊的设备基于绕击跳闸率的设计却很难实现。因此为了简便,变电站的设计是以设计电流作为基础的。

另外一个不同是变电站可以使用避雷针或架空地线中的一种,或者都使用,具体由设计者决定。

3.2.3.2.1.2 敞开式变电站;来自雷击线路的侵入波

变电站通常有防直击雷的避雷针或架空地线,保护其设备不直接遭受雷击,因此变电站的雷击通常来自线路的侵入波。整个过程可以概括如下:

- a) 评估对开路断路器保护的需求和类型。首先评估开路断路器的需求,如果需要使用避雷器,那么在变电站的初始研究时就要把它们考虑进去。
- b) 选择侵入波:应该使用平均无故障时间(MTBF)的方法。
- c) 选择可能的雷电冲击保护水平:根据电压等级,可能的雷电冲击保护水平通常为1个至3个值。
- d) 评估正常和意外条件:对于多条进线的变电站,意外条件应该包括有些线路断开。然而,所有线路断开的可能性较小,很少考虑所有线路断开的情况。
- e) 选择避雷器的类型、额定电压和初步的安装位置:通常情况下,避雷器安装在变压器端,也可能在变电站线路的入口处。
- f) 按照如下的GB 311.1绝缘配合程序:

有架空地线的线路上的侵入波在幅值和陡度上都低于没有架空地线线路上的侵入波。很多情况下,这允许避雷器和被保护的设备有一定距离。对于一条有架空地线的进线,避雷器应安装在能保护所有设备的地方,其中优先保护变压器(因为从风险考虑这是最关键的一点)。

当侵入波到达变电站的入口时,基于以下几点估计侵入波幅值、波形(陡度)和波尾时间:

- 变电站和雷击点之间的距离;
- 雷电流的幅值;
- 雷击类型——绕击或反击。

反过来,到达变电站的侵入波的数量是距离、反击闪络率和绕击率的函数。因为雷电流、反击闪络率、绕击率都是统计数据,侵入波的幅值和波形是随机的,必须按概率来考虑。侵入波的统计数据是侵入波的幅值和波形每年等于或者大于特定陡度和幅值的电流的概率。

侵入波数量的倒数是间隔期或每年中侵入波之间的平均时间。也就是说,选择的侵入波幅值超过了保护值,例如 100 年一次的侵入波。如果这百年一遇的侵入波在变电站所产生的电压恰好等于绝缘强度,那么设备发生故障的平均时间就是 100 年。

对于多路进线的变电站,情况更为复杂,因为每条线路都可能给变电站带来不同数量的侵入波。对于变电站变压器和变压器母线上的所有设备,遭受的侵入波的数量是所有进线上侵入波的总和。然而对于其他母线上的设备,只考虑单根线路上的侵入波,因为它在这条母线上产生了最严重的电压。

3.2.3.2.1.3 多重雷击(断路器开路情况下)

多重雷击发生在线路断路器和终端设备上,特别是没有架空地线的线路。故障清除后,断路器的断开时间可能超过 500 ms,即在第一次雷击后 30 ms~300 ms 内,终端设备可能遭受多重雷的侵袭。

一般来说,电力系统中的断路器可能发生此种情况时,应给予保护。通常情况下,保护包括在断路器线路侧安装避雷器等方式。

3.2.3.2.1.4 电缆连接

当用短电缆来连接设备与敞开式变电站时,通过避雷器提供足够保护裕度的预防措施会比较复杂。

因为电缆和线路之间阻抗比很低,只有一部分架空线路上产生的雷电侵入波可以传入到电缆。当行波在 1 km 以上的电缆里向前或向后传播时,行波会通过自然电阻损耗而衰减。对于小于 1 km 的电缆,由于多次反射和阻尼不足,可能在电缆终端出现过电压。因此,短电缆的一端或两端需要避雷器保护。对于低电压系统这种问题可能更严重。

总之,电缆连接的变电站比同样大小的敞开式变电站保护效果更好。

架空线路和电缆的连接处应安装避雷器以保护电缆头。保护距离可按照敞开式变电站作保守的估计。雷击时如果有一条以上的线路通过电缆和变电站连接,避雷器就有足够的保护能力保护变电站。如果雷击时连接变电站的电缆是断开的,则需要经过计算确定电缆的开口端是否需要一个额外的避雷器来保护。这也适用于架空线路一端断开的情况。

3.2.3.2.1.5 GIS 变电站的保护

一般来说,GIS 变电站比敞开式变电站有更好的保护效果,因为它的波阻抗比架空线路要小很多。由于 GIS 变电站的复杂性,不同的操作可以产生陡波冲击,推荐用磁暂态程序来研究变电站的情况。GIS 不允许有闪络,因为闪络造成永久性损害的可能性非常高。

与敞开式变电站不同,GIS 中 SF₆ 不能简单地认为是可以随后再检查的自恢复绝缘,因此任何可能由闪络带来隐患的地方都需要消除。作为一般原则,避雷器应该安装在连接到 GIS 的线路入口端,控制进入 GIS 之前的电压。

a) 快波前过电压的保护

SF₆ 被击穿的速度快,结果导致快波前和陡波前过电压的出现。

对于敞开式变电站使用一般公式会导致偏于保守的计算结果。使用计算机模型确定 GIS 配合雷电冲击耐受时的电压或者保护范围是很必要的。

如果变压器与线路入口端避雷器的距离过大,或者在线路入口处的避雷器被断开时变压器上预期会出现很大过电压,就需要在变压器侧再加一个避雷器。对大型 GIS 变电站,可能需要在内部合适的地方安装避雷器。

如果不能使用敞开式避雷器对线路入口提供足够的保护,可以通过在 GIS 内部线路入口安装避雷器来更好地限制快波前过电压。虽然这种避雷器比敞开式避雷器价格要高,这消除了户外避雷器引线产生的影响,不需要装额外的避雷器,这可能是更经济的解决方案。

当由于保护范围需要在 GIS 内部安装额外的避雷器,就不应使用近似公式,而应当进行行波计算。

b) 陡波前过电压的保护

避雷器一般不可能保护在 GIS 内产生的具有高频率和低幅值的陡波前过电压。GIS 变电站的布置和设备设计可能减少这种风险。

3.2.3.2.2 缓波前过电压(操作过电压)的保护

3.2.3.2.2.1 变电站操作过电压的配合方法

GB/T 311.2 给出了变电站过电压绝缘配合的方法。虽然变电站绝缘配合的方法与线路上的类似,但也有较大差异:

- a) 变电站绝缘和线路绝缘必须要协调;
- b) 并联绝缘子数量 n ; 通常在同一相上并联绝缘子的数量;
- c) 变电站设备的不同电介质的击穿强度;
- d) 变电站中设备(变压器)的绝缘强度用雷电耐受电压描述,空气间隙(母线)绝缘强度用临界闪络电压来描述;
- e) 变电站操作过电压闪络率的设计值可能是线路设计值的十分之一。IEC 给出了系统中每个电压等级的操作冲击耐受电压和雷电冲击耐受电压。

IEC 推荐的相对地和相对相空气间隙随着电压等级升高而增大。

3.2.3.2.2.2 变电站设备的操作

除了线路操作,很多其他类型的设备如电容器、电抗器和变压器都是在有负载或故障的情况下操作。通常情况下,隔离开关只用来断开母线,也有可能断开空载变压器,负荷开关和断路器用来断开负载,而只有断路器才能安全地切断大多数故障。

开关操作负载和故障电流时在开关(断口)可以产生严重的瞬态恢复电压(TRV)。如果瞬态恢复电压高于开关内介质恢复强度,开关就会重击穿或重燃,单次或多次的重击穿瞬态过电压会导致开关故障,以及/或者对未保护的设备造成伤害。如果设备受避雷器的保护,避雷器也可能由于开关重击穿吸收过多的能量而损坏。

3.2.4 绝缘配合研究

绝缘配合研究的复杂程度取决于分析的深度和采用的模型。电力系统暂态分析是有主观性的。对于简单的情况有基本的经验方法和公式。然而,当需要更准确的结果或者对于包括行波和非线性效应的复杂的线路和设备,通常采用电磁暂态分析工具来分析。

3.2.4.1 计算指导和建模技术

GB/T 311.4 给出了有代表性网络和设备,关于雷电和操作的瞬态或暂时过电压,有多种分析类型的细节和例子的绝缘配合指导技术报告。它还讨论了 GB/T 311.2 中绝缘配合的确定性法和统计法。

3.2.4.2 研究步骤

有些情况比较容易检验,例如 GB/T 311.2 中给出的由统计法得来的经验公式和规律,可以用来做初步的评价。对于更加复杂的情况或者实际应用,使用这些由简单公式得出的结果则显得过于保守。对于这种情况,通过详细的计算机模拟可以得到更好的结果,这可能结合现实的线路和变电站结构,包括杆塔和接地的暂态过程等重要特性,参数与频率有关及有电晕的多相耦合线路的准确模型,主要设备如电容式电压互感器的电容量,避雷器的非线性和其他更多 GB/T 311.4 中提到的特性。图 14 给出了根据避雷器合理应用来进行绝缘配合的程序。避雷器参数的确定,可以(但不总是)考虑最恶劣的工况,最恶劣工况与雷电和操作保护水平以及避雷器的通流能力有关。

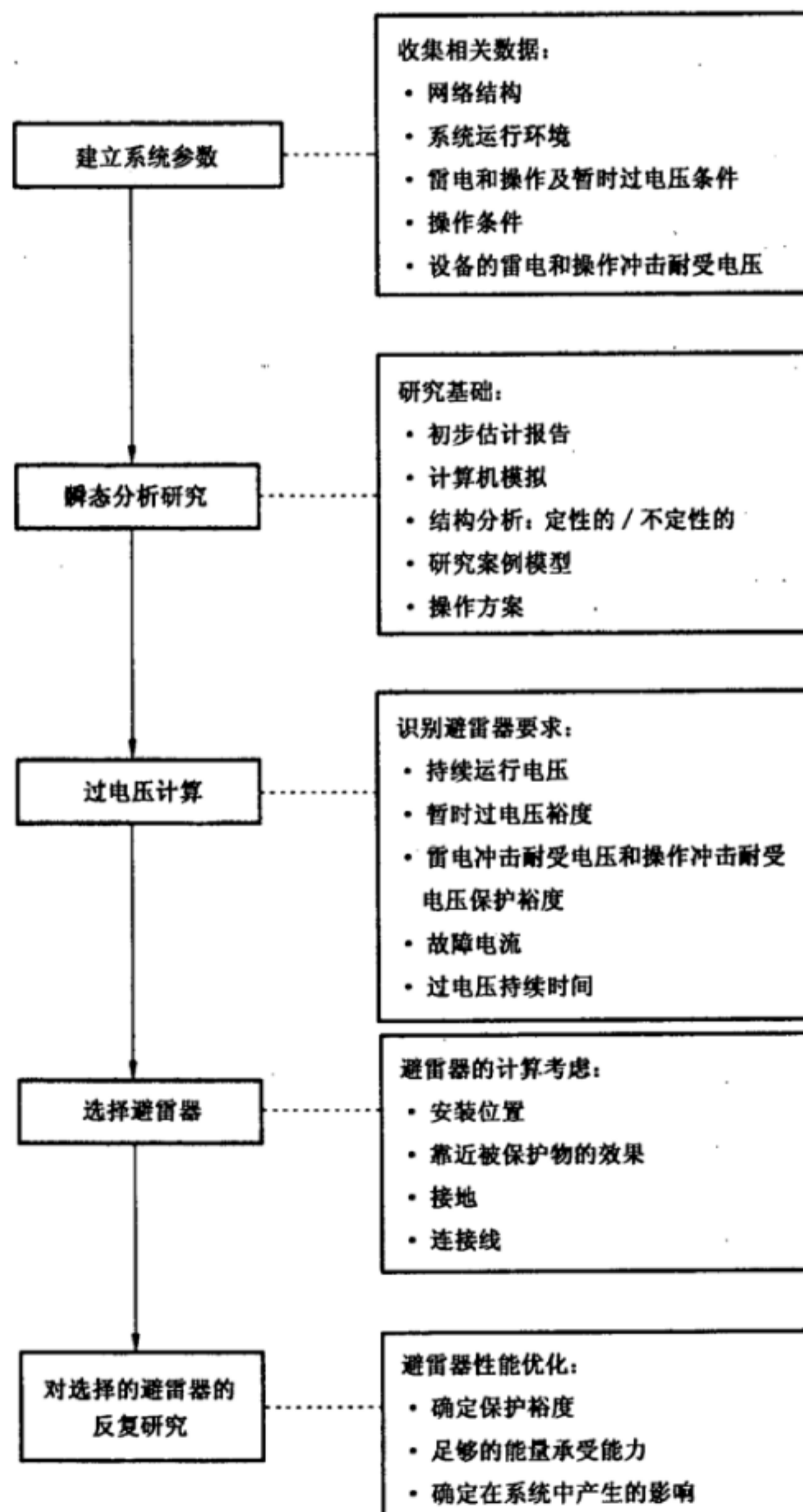


图 14 选择避雷器进行绝缘配合的典型步骤

附录 B 给出了避雷器的建模技术。

3.3 避雷器的选择

在线路和变电站绝缘配合中,避雷器是必要的保护装置。大多数避雷器一般用来保护高压变电站和配电设备不受快波前和缓波前过电压的侵害。为了确保避雷器的可靠性和系统的安全性,要根据适当的运行条件选择合适的避雷器,其次,避雷器的保护水平和能量吸收能力要接受所有过电压的考核。

3.3.1 高压变电站选择避雷器的一般步骤

图 15 所示的反复优化过程是为高压变电站设备选择避雷器的标准程序。下述文字是对图 15 的简要解释:

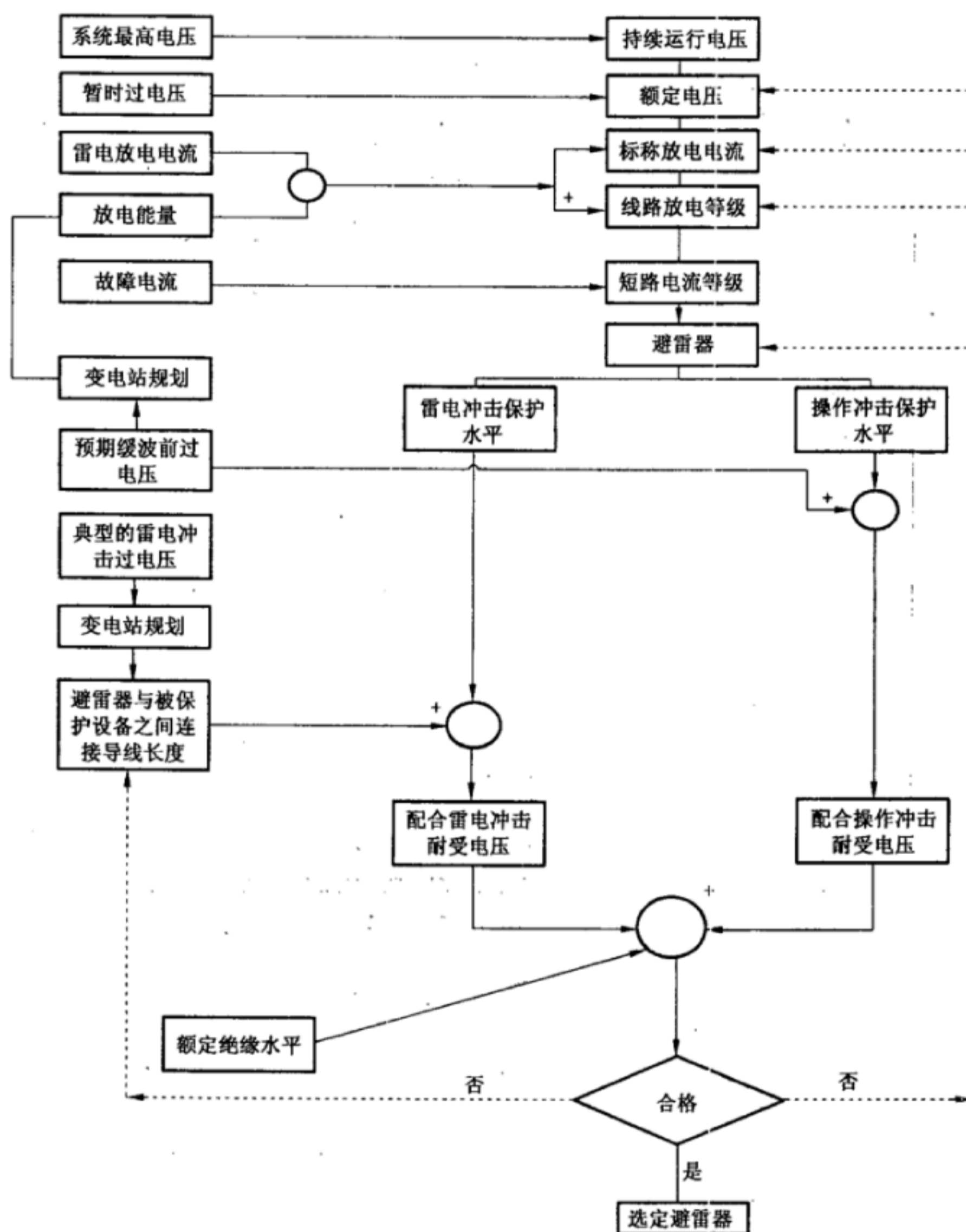


图 15 选择避雷器的标准流程

- a) 根据电力系统最高运行电压来确定避雷器的持续运行电压;
- b) 根据暂时过电压来确定避雷器的额定电压;
- c) 估计通过避雷器的雷电放电电流大小和概率,确定避雷器的线路放电要求,选择标称放电电流、大电流冲击耐受值和避雷器的线路放电等级;

- d) 根据故障电流选择短路电流等级；
- e) 选择能够满足以上要求的避雷器；
- f) 确定避雷器雷电和操作冲击保护特性；
- g) 避雷器和所保护设备之间的距离(避雷器尽可能靠近被保护的设备)；
- h) 考虑缓波前过电压和系统的结构,确定被保护设备的操作冲击耐受电压；
- i) 确定被保护设备的雷电冲击耐受电压时要考虑：
 - 1) 根据连接到避雷器的架空线路上的雷电活动情况和所保护设备的可接受故障率,确定有代表性的侵入的雷电冲击过电压；
 - 2) 变电站的布置；
 - 3) 避雷器和所保护设备之间的距离；
- j) 从 GB 311.1 中确定被保护设备的标准绝缘水平；
- k) 如果要用较低额定绝缘等级的设备,通过反复优化就应选用有较低的额定电压、较高的标称放电电流、较高的线路放电等级的避雷器,以及对避雷器进行不同的设计或者减小避雷器和所保护设备之间的距离等进行研究。

要注意避雷器额定电压如果取得太低,有可能降低其运行可靠性。

3.3.1.1 选择持续运行电压 U_c 和额定电压 U_r

避雷器的持续运行电压 U_c 要高于或等于作用在避雷器的最高实际运行电压。对于相对地避雷器, U_c 通常要高于 $U_m/\sqrt{3}$ 。 U_m 为系统运行或避雷器安装点的最高线电压的工频电压有效值。系统最高线电压由相应的工频电压和可能存在的电压谐波决定。在一般系统中,谐波增加的峰值电压可在 1.05 倍的工频电压的安全系数中考虑。作为一般原则,持续运行电压应为：

——在中性点直接接地或有自动故障清除保护的非直接接地系统中,等于或高于最高运行线电压除以 $\sqrt{3}$ ；

——在经消弧线圈接地或中性点绝缘而且没有自动故障清除系统中,等于或高于最高运行线电压。

注：对于这些系统,1.05 倍的安全系数已经考虑在包括这些系统接地故障极限持续时间与避雷器的工频电压耐受时间特性中。

如果避雷器安装点的最高运行电压不太清楚时,应该用系统最高电压或设备的最高电压代替。

如果避雷器被安装在小于制造厂所要求与带电体或接地体的最小距离(最小距离一般为避雷器高度的 1.5 倍~2 倍),必须验证沿避雷器的电压分布是否满足设计要求,以及它对选择持续运行电压的影响。

避雷器额定电压的选择是基于避雷器安装点的系统暂时过电压,并考虑到它们的幅值以及相应的持续时间,以确定合适的额定电压。暂时过电压包括工频过电压和谐振电压,本导则中所指的暂时过电压主要指工频过电压,一般不包括谐振电压。

应该特别考虑接地故障过电压和甩负荷引起的暂时过电压,具体情况见 3.2.2.4。

与避雷器的额定电压有关的还有两个重要参数,一个是避雷器的工频参考电压($U_{a.c.ref}$)。它是在避雷器通过工频阻性参考电流时的工频电压峰值除以 $\sqrt{2}$ 。避雷器工频参考电流的数值,一般是由制造厂根据电阻片直径的大小以及避雷器元件中并联电阻片柱数的多少确定的。工频参考电压在避雷器伏安特性曲线的拐点附近。因此,在物理意义上,在这一点以后,外加电压略有增加,电流就会增加很多,避雷器的保护作用将会很明显。一般规定避雷器的工频参考电压,在数值上应该等于或高于其额定电压。所以,正确选择动作负载试验的试品必须测量工频参考电压。多个元件串联组成的避雷器的工频参考电压是每个元件的工频参考电压之和。

另一个重要参数是避雷器的直流参考电压($U_{a.c.ref}$)，它是在避雷器通过直流参考电流时测出的直流电压平均值。如果电压与极性有关，则取低值。国外(包括进口)的金属氧化物避雷器一般没有这个数据。我国对直流参考电压从20世纪80年代沿用至今，主要是方便现场验收和运行中检查避雷器是否老化或性能改变。国内生产的避雷器的规范中都有这个数据，是验收的依据之一。在动作负载试验时也需要测量这个数据。应用在系统标称电压330 kV及以下的避雷器，其直流参考电压一般约为避雷器的工频参考电压乘以 $\sqrt{2}$ 。330 kV以上的避雷器，比值略低于 $\sqrt{2}$ 。直流参考电流的数值，一般应用在系统标称电压500 kV及以下的避雷器，都使用1 mA。在系统标称电压750 kV及以上的避雷器，由于电阻片直径的增大或避雷器元件中并联电阻片柱数增多，采用的直流参考电流，往往大于1 mA，其直流参考电流与直流参考电压由制造厂提供。

为了满足耐受暂时过电压的要求，应选择合适的额定电压。在标准中额定电压的定义是在动作负载试验中施加大电流冲击或长持续时间电流冲击之后避雷器能够耐受10 s的最大工频电压。因此，按照标准，额定电压是避雷器能够耐受10 s的暂时过电压最小值。对于其他持续时间的暂时过电压的耐受能力，制造厂应以额定电压 U_r 或 U_c 的倍数与耐受时间的关系来表示，即避雷器的工频电压耐受时间特性(曲线)。GB 11032—2010规定，制造厂应提供避雷器在预热到60℃并分别经受大电流或线路放电等级能量负载后，允许施加在避雷器上工频电压的持续时间而不发生损坏或热崩溃的相应工频电压数值。提供的资料应为工频电压与时间的曲线，且在曲线上应标明施加工频电压前注入的冲击能量。

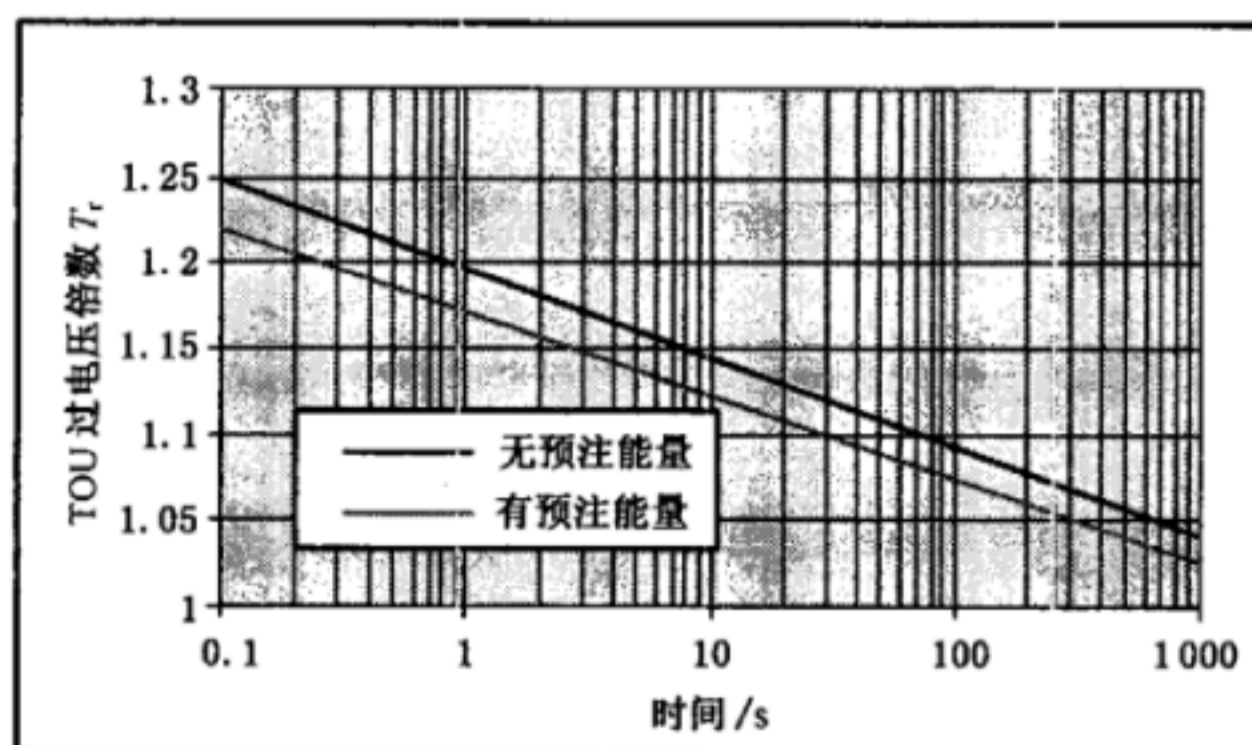
注1：避雷器的额定电压必须根据由系统的条件(例如雷电、操作及暂态过电压)确定的工频电压耐受时间特性曲线选择。

注2：工频电压耐受时间特性曲线也可以通过计算建立。

注3：工频电压耐受时间特性曲线应覆盖0.1 s~20 min时间范围，对于用于中性点绝缘或谐振接地而没有接地故障清除的系统，时间应该延伸到24 h。

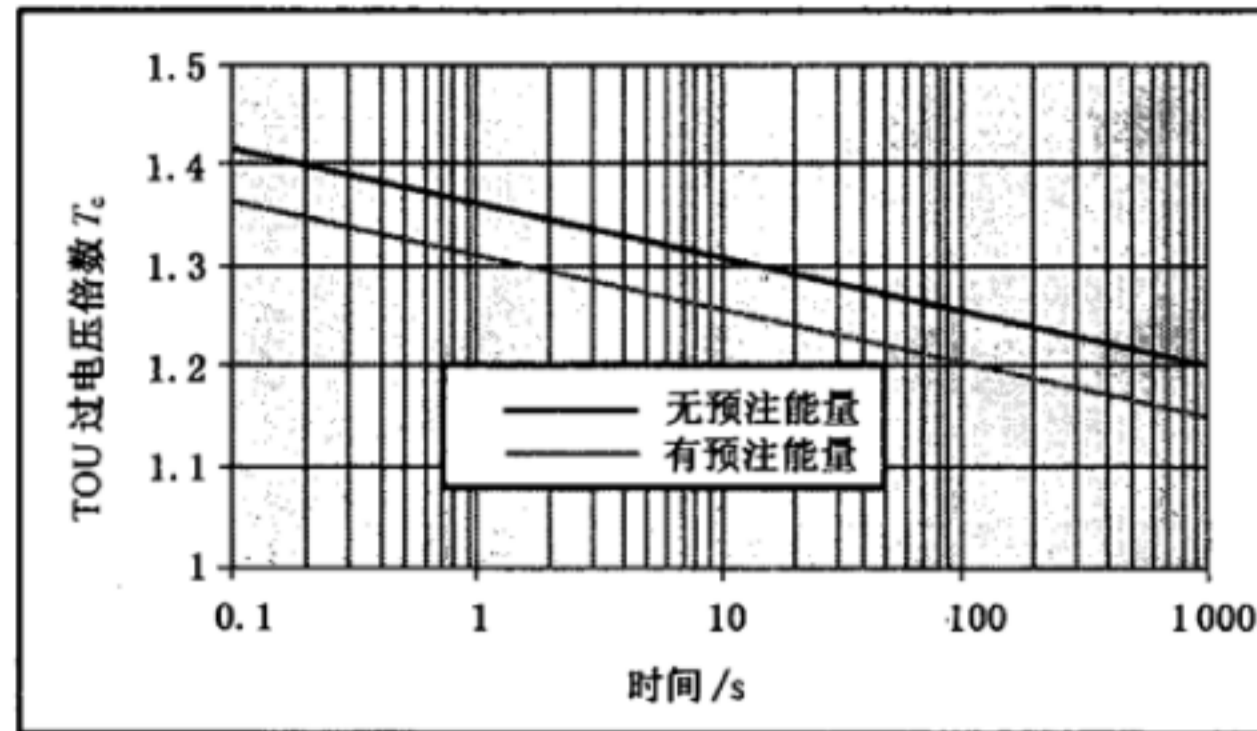
影响工频电压耐受时间特性的因素有周围环境温度、吸收的能量(即施加工频过电压前电阻元件的起始温度)和工频过电压后施加的电压。因此，制造厂通常提供几个预加或不预加能量的工频电压耐受时间特性曲线。

有两种方法可以表示工频电压耐受时间特性，分别是： T_r 以额定电压的倍数表示和 T_c 以持续运行电压的倍数表示。这两种方法分别在图16a)和图16b)中表示。要注意这两个例子并不是对于同一个避雷器，因此工频过电压的耐受能力并不相同。



a) 按额定电压倍数给出的避雷器工频电压耐受时间特性

图 16 避雷器工频电压耐受时间特性



b) 按持续运行电压倍数给出的避雷器工频电压耐受时间特性

图 16 (续)

对按额定电压倍数给出的避雷器暂时过电压耐受能力,在所考虑的持续时间内, T_e 乘以 U_r 一定要高于或等于预期的暂时过电压。

对按持续运行电压倍数给出的避雷器暂时过电压耐受能力,在所考虑的持续时间内, T_e 乘以 U_c 一定要高于或等于预期的暂时过电压。

典型的电站用避雷器的额定电压、持续运行电压和避雷器直流 1 mA 参考电压如表 3 所示。

表 3 典型的电站用避雷器参数

电力系统标称电压 U_n (有效值) kV	避雷器额定电压 U_r (有效值) kV	避雷器持续运行电压 U_c (有效值) kV	避雷器直流 1 mA 参考电压(不小于) kV
3	5	4	7.2
6	10	8	14.4
	12	9.6	17.4
10	15	12	21.8
	17	13.6	24
35	51	40.8	73
66	84	67.2	121
110	96	75	140
	102	79.6	148
	108	84	157
220	192	150	280
	204	159	296
	216	168.5	314
330	288	219	408
	300	228	425
	312	237	442
500	420	318	565
	444	324	597
	468	330	630
750	600	462	810
	648	498	875

3.3.1.2 标称放电电流和线路放电等级的选择

标称放电电流用于金属氧化物避雷器的分级。但是仅用标称放电电流值并不足够表达避雷器的性能,还需要线路放电等级或者通常所要求的能量耐受能力作为补充。标称放电电流以及大电流冲击的关系见表4。

表4 避雷器的分级

线路放电等级	—	1	2	3	4	5
标称放电电流/kA	5	10	10	10	20	20
大电流冲击/kA	65	100	100	100	100	100
操作冲击电流/A	—	125和500	125和500	250和1000	500和2000	500和2000

高压变电站使用线路放电等级为2级~5级的避雷器。在中压系统,主要使用标称放电电流5kA和10kA,线路放电等级为1级的避雷器。对于特定的设备,例如保护电缆、旋转电机和电容器组等,即使这些设备也在中压系统中,可能需要选择更高的线路放电等级。

国内通常按用途分类,表5给出按其标称放电电流和用途分类,供设计和用户选型参考。

表5 按避雷器标称放电电流和用途分类

标准标称放电电流	20 000 A	10 000 A	5 000 A	2 500 A	1 500 A
额定电压 U_r (kV rms)	$360 < U_r \leq 756$	$3 \leq U_r \leq 468$	$U_r \leq 132$	$U_r \leq 36$	$U_r \leq 207$
避雷器使用场合	电站用避雷器 线路避雷器	电站用避雷器 线路避雷器 电气化铁道用避雷器	电站用避雷器 线路避雷器 发电机用避雷器 配电用避雷器 并联补偿电容器用避雷器 电气化铁道用避雷器	电动机用避雷器	电机中性点用避雷器 变压器中性点用避雷器 低压避雷器

3.3.1.3 避雷器的雷电能量

雷电冲击能量(W)可通过式(1)计算得到:

$$W = \{2U_r - N \cdot U_{pl} [1 + \ln(2U_r/U_{pl})]\} \times \frac{U_{pl} \cdot T_1}{Z} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- ln —— 自然对数;
- U_{pl} —— 避雷器雷电冲击保护水平;
- U_r —— 线路绝缘负极性雷电冲击放电电压;
- Z —— 线路波阻抗;
- N —— 连接到避雷器(变电站)的线路数;
- T_1 —— 包括第一次和后续雷击(多重雷击)的等效雷电持续时间(典型数值为 3×10^{-4} s);

W ——能量(如果在配电系统中变电站之间的距离小,该能量会因为分流而降低)。

这个公式来自于呈指数递减的过电压的整合。

3.3.1.4 操作过电压下避雷器的能量

避雷器在操作过电压下产生的热能决定于操作过电压的幅值、波形、电力系统的阻抗和结构、避雷器的保护特性和短时间内的操作频率。总之,所选择避雷器的能量耐受能力必须比最严重运行情况下所积累的能量大。避雷器的能量要求决定于在绝缘配合步骤中有代表性的过电压。在大多数实际情况中,由于开关操作具有统计性,加上避雷器的非线性,通常产生的操作过电压波形很复杂,可通过计算机仿真来模拟研究,也可以对应线路放电等级下的避雷器的分级方法进行初估:假设整条线路在预期的操作冲击电压下充电,然后在两倍线路的波传播时间内,对预期保护水平的避雷器放电,就可以推导避雷器能量的简化计算,见式(2)。

每次操作的能量:

$$W = U_{ps} \times \frac{(U_{rp} - U_{ps})}{Z_s} \times \frac{2L}{c} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

L ——线路长度;

c ——光速;

Z_s ——线路波阻抗;

U_{ps} ——避雷器的操作冲击保护水平/残压;

U_{rp} ——没有安装避雷器时的代表性最大操作过电压。

3.3.1.5 操作过电压的保护

金属氧化物避雷器适用于限制线路合闸和重合闸过电压以及断路器操作感性、容性负载所引起的过电压,通常不限制幅值较低的操作过电压。

对避雷器限制操作过电压,波前时间的影响可以忽略。如果在变电站安装了相似等级的带间隙和无间隙避雷器,可以不考虑变电站中的距离影响,但不建议有间隙和无间隙避雷器混合使用。

避雷器通常安装在相-地之间,如果使用无间隙金属氧化物避雷器将操作过电压限制到很低的水平时,不管变压器中性点接地状况如何,相-相过电压将达到相-地避雷器保护水平的两倍。相-相过电压由两个相-地过电压分量组成,通常两者是 1:1。如果需要更低的相-相保护水平,则需要增加相-相避雷器。

用避雷器抑制操作过电压,需考虑能否耐受操作冲击电流,它可能使电阻片击穿、破裂、闪络,以及发热所引起的热崩溃。可通过预测可能出现的过电压幅值,采用具有耐受操作冲击电流和能量吸收能力的避雷器来控制。

操作过电压对高压电力系统更为严酷,它对高压网络的设备比中压更危险。实际上,操作过电压保护对标称电压高于 220 kV 的电力系统是重要的。

对 220 kV 及以下,设备的标准绝缘水平对操作过电压足够高,因而不必考虑对操作过电压的保护(旋转电机除外)。使用避雷器保护 220 kV 以下的无功补偿设备时,需要注意校核操作过电压的能量。

用避雷器抑制设备上的操作过电压,其代表性过电压等于操作冲击保护水平。除了输电线路外,可忽略行波的影响,设备上的电压就等于避雷器上的电压。当不装相对相避雷器时,相对相过电压最高会达到上述值的两倍。

用避雷器抑制操作过电压时,过电压的统计分布会发生明显变化。与预期的操作过电压幅值相比,操作过电压下残压越低,变化越明显。在这种情况下,很小的绝缘耐受偏差都会对故障率产生大的影响。为了控制这种影响,建议根据实际的统计分布确定 2% 统计过电压或根据避雷器的保护水平和 2%

统计过电压的相关性决定配合系数[见式(3)~式(5)]。

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} \leq 0.7 \quad K_{cd} = 1.1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$0.7 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} \leq 1.2 \quad K_{cd} = 1.24 - 0.2 \frac{U_{ps}}{U_{e2}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} > 1.2 \quad K_{cd} = 1.0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

而设备的配合操作冲击耐受电压为：

$$U_{cw} = K_{cd} \times U_{ps} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中：

- U_{ps} —— 避雷器操作冲击保护水平；
- U_{e2} —— 2%统计操作过电压(相对地)幅值；
- U_{cw} —— 设备的配合操作冲击耐受电压；
- K_{cd} —— 确定的配合系数。

注：系数 1.0~1.1 是考虑到由于避雷器引起了过电压分布曲线的截断，幅值等于保护水平的过电压出现频度增大。残压越低，这个频度越高。由于设备耐受电压的不确定性，耐受电压和保护水平之间的裕度应该随着过电压频度的增加而增加，以维持一定的故障率水平。

如果 U_{e2} 小于 $U_{ps}/1.2$ ， U_{cw} 的计算可不考虑避雷器的保护。

3.3.1.6 雷电过电压的保护

变电站规模的大小明显影响避雷器对雷电过电压的保护效果。避雷器不能同时保护相距较远的线路入口和变压器以及其他间隔(回路)的设备。因此，关键设备通常需要专门的避雷器保护，并加装出线避雷器去控制侵入变电站的过电压。

避雷器对变电站内设备的保护范围可以使用 EMTP 等电磁暂态程序计算。

在配电系统中，设备并没有受到雷直击导线或反击的保护，需要考虑感应雷过电压。

3.3.2 特高压(UHV)避雷器

3.3.2.1 特高压(UHV)避雷器的选择

基本上其他所有避雷器的选择程序也同样适用于特高压避雷器。特高压避雷器的参数可以参见 GB/Z 24845—2009。表 6 是 1 000 kV 交流系统用无间隙金属氧化物避雷器主要技术参数。

表 6 1 000 kV 变电站金属氧化物避雷器主要技术参数

项 别	避雷器主要参数
系统标称电压(有效值)/kV	1 000
避雷器标称放电电流(峰值)/kA	20
避雷器额定电压(有效值)/kV	828
避雷器持续运行电压(有效值)/kV	638
陡波冲击残压(峰值)/kV	≤1 782
雷电冲击残压(峰值)/kV	≤1 620
2 kA 操作冲击残压(峰值)/kV	≤1 460
直流参考电压/kV	≥1 114

表 6 (续)

项 别		避雷器主要参数
0.75 倍直流参考电压下的漏电流/ μA		≤ 100
工频参考电流(峰值)/mA		24
工频参考电压(峰值/ $\sqrt{2}$)/kV		≥ 828
持续运行电流	阻性电流(基波峰值)/mA	≤ 3
	全电流(有效值)/mA	≤ 20
2 ms 方波耐受电流/A		8 000
大电流冲击耐受电流值/kA		100/柱
线路放电等级/每柱		5 或 6
并联柱数		4
柱间电流分布不均匀系数		≤ 1.10
绝缘底座绝缘电阻/M Ω		$\geq 2\,000$
注 1: 对于典型的 4 柱并联结构而言,直流参考电流通常为 8 mA。 注 2: 对于典型的 4 柱并联结构而言,工频参考电流通常为 24 mA。 注 3: 4 柱并联结构是经过验证的典型的结构,只要所有性能可以满足要求,其他柱数也是允许的。		

3.3.2.2 特高压的绝缘配合

依据 GB/Z 24842—2009,特高压绝缘配合包括输电线路和变电站,是实现一个可靠和经济的特高压电力系统的关键因素。试验示范工程已经用计算机辅助计算和模拟方法精确地设计复杂的绝缘配合。

特高压避雷器的优异的保护水平是特高压电力系统绝缘水平的决定性因素。当雷电过电压超出 GIS、变压器等设备的非自恢复内部绝缘的设计时,最佳绝缘配合基于高性能避雷器。特高压金属氧化物避雷器是限制操作过电压和雷电过电压的主要装置,其保护水平是变电站设备以至线路绝缘配合的基础。避雷器按其安装位置可分为母线侧(线路断路器变电站侧)避雷器和线路侧(线路断路器线路侧)避雷器。避雷器的保护水平与其额定电压相关。避雷器额定电压的选择主要取决于工频过电压的大小和持续时间。

以特高压试验示范工程为例,用电磁暂态程序和精确的计算机辅助计算可以算出这些数值。母线侧最大工频过电压为 1.3 p. u.,因此母线侧避雷器的额定电压按母线侧最大工频过电压 1.3 p. u. (826 kV)选为 828 kV;线路侧最大工频过电压为 1.4 p. u. (889 kV),但持续时间较短(小于 0.5 s)。利用避雷器的工频电压耐受时间特性曲线,当工频过电压的持续时间较短时,耐受电压的数值可以较高。因此线路侧避雷器额定电压也可选为 828 kV,这对于降低线路过电压水平,同时降低断路器外侧设备以及线路的绝缘水平有重要意义。

避雷器的标称电流分类通常是 20 kA,通过使用多柱的、线路放电等级 5 级避雷器,以满足降低雷电冲击保护水平的要求。为了有效地抑制过电压,避雷器需要安装在关键的地方,如线路入口端,母线和变压器处。一般都用电磁暂态计算程序确定避雷器在变电站中的安装位置,使各种设备的雷电冲击耐受电压更合理。

线路杆塔高度和变电站空气间隙主要取决于操作过电压抑制水平。因为经济原因,希望将操作过电压水平降低到 1.6 p. u. ~1.7 p. u.,有几个可能的解决方案:

- 在线路入口端安装操作冲击保护水平较低的多柱避雷器；
- 在线路杆塔处安装无间隙线路避雷器；
- 多柱的 GIS 避雷器可能有更高的电压应力,进而需要有更高的荷电率(U_c/U_r)；
- 断路器选相操作；
- 断路器使用合闸或分闸电阻；
- 单相重合闸；
- 上述措施的组合。

这些可能性有助于优化经济设计、缩小特高压设备的尺寸和增加线路的传输功率。一般需要通过电磁暂态计算来确定所采用的降低操作过电压的方式和相应的要求。

3.3.2.3 机械设计

敞开式变电站特高压避雷器的重量和高度都很大,还要满足一定烈度的地震要求,并保证在避雷器内部短路下不爆炸,机械设计是一个重要问题。GIS 避雷器还要通过严格的运输试验的考核。为了保证避雷器的安全可靠,特高压试验示范工程敞开式变电站用的瓷套式避雷器通过了 63 kA 短路试验。GIS 避雷器也通过了要求的运输试验。在重污秽地区,瓷套式避雷器还要通过Ⅲ级以至Ⅳ级的污秽试验,是一个严格考验。

避雷器使用复合外套的设计可能有利于降低高度和减少爬电距离,同时它的重量也较小。对于悬挂在线路杆塔上的避雷器,复合外套更具有优越性。

3.3.3 配电系统避雷器的选择

这些系统的线路很少有架空地线防护,因此经常直接遭受雷击。对于这种类型的避雷器最需要注意的是由雷电引起的瞬态过电压。操作冲击对配电系统设备影响很小,可不考虑。

图 15 所示的高压避雷器选择程序,也适用于保护配电设备的配电用避雷器,但关于雷电保护特性选择的只有 3.3.1 的 a)~g)合适。

3.3.3.1 能量吸收能力

配电用避雷器必须吸收的能量主要是与雷电放电有关的能量。由于避雷器产生的热量是残压的函数,残压越高,散出的能量就越多。配电用避雷器一般应可以通过 65 kA 或者 100 kA 大电流冲击。通常配电用避雷器不以能量表示,只给出通过的电流,这是一种间接的评估能量吸收能力的方法。

3.3.3.2 暂时过电压的考虑

配电系统不会很好监视其过电压水平,因而很多情况下不能了解到实际状况,所以当发生系统接地故障时都假定为最坏的情况。由于在配电系统中的暂时过电压最经常是由接地故障所引起,而且很少知道非故障相的电压上升幅度,一般以最坏情况决定避雷器的参数,最坏的情况下,电压的上升取决于系统中性点的配置。

配电系统最常见的 4 种系统中性点配置是:

- 四线多点接地的星形连接系统,故障因数 1.25；
- 三线,低阻抗接地系统,故障因数 1.4；
- 三线,高阻抗接地系统,故障因数 1.73；
- 三角连接的系统,故障因数 1.73。

对于上面的每一个系统,故障因数是用来确定系统中非故障相的暂时过电压升高的倍数。电压升高是线路对地电压乘以故障系数。通过制造厂提供的暂时过电压数据来选择持续运行电压和额定电压,参见图 16a)和图 16b)。

3.3.3.3 故障模式

配电用复合外套避雷器按 GB 11032—2010 测试,耐受故障电流为 10 kA~20 kA 时,避雷器没有明显地粉碎散开。值得注意的是,按照 GB 11032—2010,当制造厂宣称避雷器有短路电流等级时,必须进行短路电流试验。如果制造厂未宣称避雷器有短路电流等级时,避雷器故障下有可能出现严重粉碎性爆炸。

3.3.4 线路避雷器的选择和使用

线路故障及跳闸对该回路的安全供电有重大的影响,因此,采取措施以降低这种故障就越来越重要。为了降低一条架空线路的跳闸率,可以在整条线路或选择部分杆塔上安装避雷器以防止线路绝缘的闪络或击穿。架空线路避雷器可以应用在配电和输电线路路上。

线路避雷器的保护特性要与线路绝缘的雷电冲击耐受电压和操作冲击耐受电压相配合。由于线路避雷器直接和线路绝缘子并联安装,所以只有安装在超高压或非常长的绝缘子旁边时才需考虑距离的影响,一般情况可不考虑。

线路避雷器也可以安装在多回路杆塔上的其中一回路上,以防止多回路同时跳闸,也可以降低无保护回路的跳闸概率。

在单回路或多回路上安装线路避雷器,加上单相或快速多相重合闸,可以更好地控制操作过电压并提高系统可靠性。

线路避雷器还可以应用在:已建线路升压改造、新建的紧凑型线路、扩大变电站避雷器的保护范围以及降低市区内接触及跨步电压的风险。

3.3.4.1 雷电过电压

雷电过电压是由雷击在架空线路或其附近所造成的。在很多地区,线路跳闸超过 50% 是由于雷电过电压引起线路绝缘子(串)闪络。目前大多数线路避雷器是用以改善架空线路的防雷性能,降低线路的对地跳闸率。

架空线路的绝缘一般是可以自恢复的,因此,不适宜于用一个固定的配合电流来计算保护裕度。而代之以,加在线路上的雷电流分布概率来计算出闪络概率。典型的方法是,使用百分之五十闪络电压 $U_{50\%}$ 加上典型的 3% 的标准偏差 σ 来计算闪络概率。线路的绝缘也是波前和波尾的函数。与当地的雷击密度结合起来,就可以得出单位长度每年的雷电闪络概率。闪络概率是衡量线路耐雷电性能的尺度。

3.3.4.1.1 雷电冲击对架空线路的影响

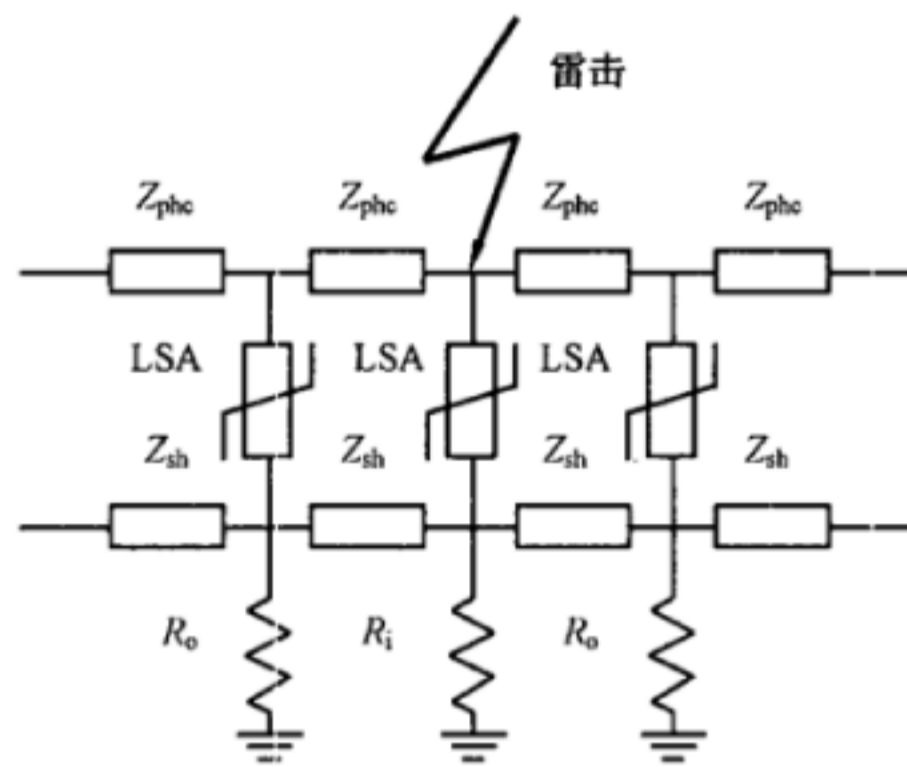
有三种情况可以在架空线路上产生雷电过电压:雷电直击在导线上,雷击在架空地线或杆塔上,以及雷击附近的接地物体,在线路上的感应过电压。

3.3.4.1.2 雷电直击在导线上

雷电直击可能发生在无架空地线线路或有架空地线线路绕击在导线上。对于无架空地线线路,直击在导线上的次数要比有架空地线的线路多得多,这与雷电流的分布有关。由于它比有架空地线时要严酷一些,一般需要进行系统研究以确定避雷器的雷电放电能量要求。避雷器的能量要求的选择,取决于预期的避雷器跳闸率和故障风险率。

绕击故障闪络的电流幅值是在电流强度曲线的末端,一般小于 20 kA,但波尾则长于反击时的电流。

如图 17,雷直击导线时,由于没有其他的电流对地通路,大部分电流都通过最近的避雷器流入地中。由于档距间的电感限制,相邻的避雷器只释放部分能量。如果被击杆塔由于土壤被电离使接地电阻降低,相邻的避雷器分流的效果就更差。由于避雷器优异的非线性伏安特性,电流幅值较低的波尾处的电流基本没有被分流。被击中杆塔的接地电阻 R_i 越低,通过该线路避雷器的电流就越大。



- Z_{sh} ——架空地线的波阻抗；
- Z_{phc} ——相导线的波阻抗；
- LSA——线路避雷器；
- R_i ——最靠近的杆塔(被击导线的杆塔)接地电阻；
- R_o ——邻近杆塔的接地电阻。

图 17 雷电直击在有线路避雷器的一相上

由于雷直击在档距中的某一地方时,电流会沿导线流向两侧,所以,两侧杆塔上必须要有线路避雷器以防止闪络。由于这个原因,在直击或绕击下,避雷器必须安装在连续的杆塔上才能有效地防止闪络。

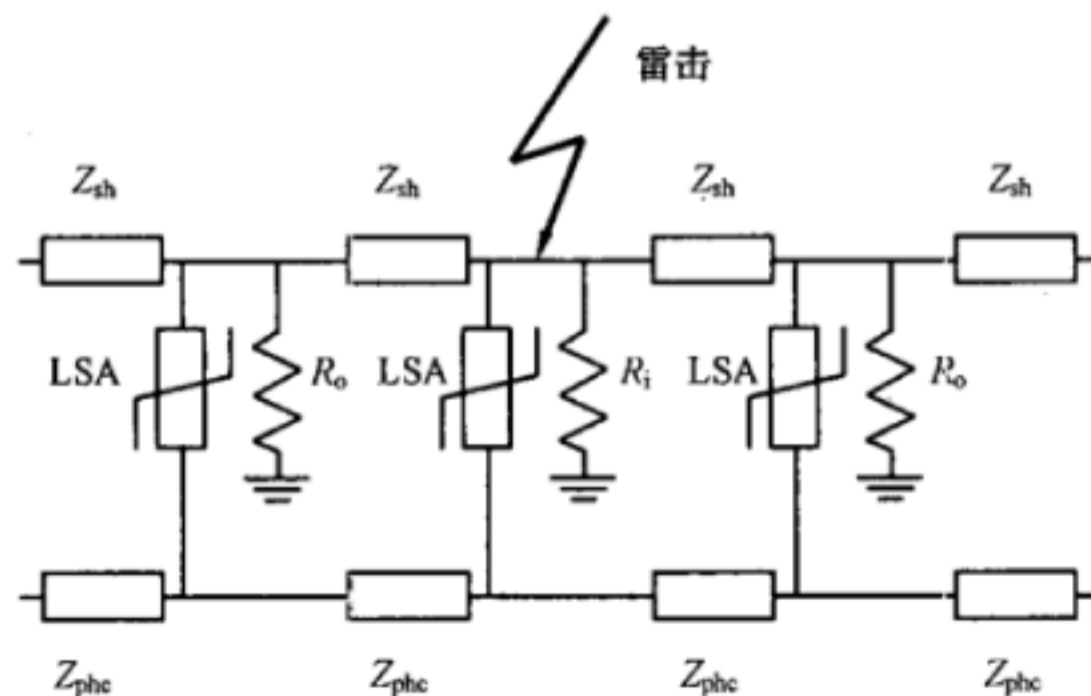
线路避雷器也用以代替架空地线,特别是在接地条件很差时。三角形排列的输电线路,相对于其他两相,最顶的一相起到了架空地线的作用,通过安装线路避雷器可以防止闪络。这时应考虑其作为架空地线的短路电流影响。

为了消除配电线路的直击雷闪络,应该每个杆塔都安装避雷器。

3.3.4.1.3 雷击架空地线或杆塔,反击(逆闪络)

这些事件发生在雷击架空地线或杆塔上,造成绝缘子上电压升高,引起杆塔对导线闪络。因此,称为反击,这是雷击引起跳闸的主要原因。当地的接地条件(土壤电阻率和塔脚接地设计)对反击性能起主要影响。

架空地线主要拦截雷击导线。大多数的电流将从杆塔入地。流过线路避雷器的电流相对较小(见图 18),在发生反击时,架空地线能减少避雷器吸收的能量,但如果接地电阻较大,避雷器吸收的能量也较大。



- Z_{sh} ——架空地线波阻抗；
- Z_{phc} ——相导线波阻抗；
- LSA——线路避雷器；
- R_i ——距离最近的(被击架空地线的杆塔)接地电阻；
- R_o ——邻近杆塔的接地电阻。

图 18 雷击在安装有线路避雷器的架空地线和杆塔上

三相都安装线路避雷器或仅在对架空地线耦合系数最低的相安装线路避雷器能降低反击跳闸率,在高接地电阻地区,一般安装在下面的一相。为确定线路避雷器的安装位置、安装数量及被保护相,有必要进行系统研究。在高接地电阻地区,重要的是不仅在该区的杆塔上安装线路避雷器,还要在离开该区的一、两个杆塔上安装,否则可能会引起其他临近无线路避雷器的杆塔上绝缘子的闪络。

三相导线垂直排列时,最低相的耦合电压最低,电压应力最大。线路避雷器可以只安装在最下相。线路避雷器在预期的反击下动作,有效地产生一个对地通道并提高非故障相的耦合电压。耦合电压提高后能降低没有安装线路避雷器的对应相的反击闪络率。

对配电系统,保护配电变压器用避雷器也能够为线路提供部分保护。如果安装线路避雷器以减少线路闪络,应首先安装在绝缘强度较弱的杆塔上,如线路终端杆或拉线杆上。

另外一种特殊的情况是正在建设的配电线路与有架空地线的输电线路共用一个杆塔的闪络。配电线路不太可能遭受直击雷,但由配电线路对(输电线路)架空地线的耦合最弱,配电线路上的绝缘强度也较低,很容易发生反击。配电线路闪络后与输电线路间的耦合增强,使输电线路不太可能产生反击。输电线路的雷电性能的提高是以损失配电线路的雷电性能为代价的。这种情况可以通过在配电安装线路避雷器弥补,通常在每一个杆塔上,至少在每塔的一相上安装。

3.3.4.1.4 雷击附近物体及地面

发生在架空线路附近的雷击,可能在相导线上感应一个过电压而引起闪络。这个感应过电压很少超过 300 kV。因为输电线路的绝缘子的雷电耐受电压通常高于 300 kV。所以,只考虑感应过电压对配电架空线路的作用。闪络发生在相导线到杆塔接地,其电流流向如图 17 所示。

对于易于受感应电压造成闪络的,一般要求每 200 m~400 m 安装一组三相线路避雷器,以降低感应过电压的影响。

3.3.4.2 缓波前过电压

输电线路的高速重合闸在相导线上产生行波,如果不控制的话,它可能产生导线对横担闪络。在线路末端开路的情况下特别危险,可能引起加倍的冲击。有多种不同的方法控制操作过电压,如合闸电阻、分合闸控制或线路避雷器。与限制雷电过电压不同,线路避雷器需要在几个杆塔上连续安装。线路避雷器用以抑制操作过电压,只需要在线路的两端,以及视乎线路绝缘的操作冲击耐受电压和线路长度,可能沿线再安装一两个地方。通常大概在中间、线路的三分之一或三分之二线路长度的位置。安装在线路两端的避雷器一般在终端杆塔上,通常变电站型避雷器即可。抑制操作过电压时,线路避雷器需要在三相上安装。

这种用途的线路避雷器一般用在 220 kV 及以上的线路。与合闸电阻和/或控制开关比较,这种避雷器的优点是:它们还能够在断路器重击穿时保护系统、不需要维护、也不受电压谐波影响等。对非常长的或操作冲击电压耐受能力低的线路,无间隙线路避雷器加上分合闸控制,可能是最经济的解决办法。

3.3.4.3 线路避雷器的种类

线路避雷器有两种不同的形式,无间隙线路避雷器和带间隙线路避雷器。它们各有某些不同的特征,使得它们适用不同的环境中。无间隙线路避雷器的试验根据 GB 11032—2010,带间隙避雷器根据 DL/T 815—2002 或 JB/T 10497—2005 进行。当前线路避雷器一般是复合外套型,它比瓷外套有显著的优点。

安装在杆塔上的线路避雷器与变电站避雷器承受不同的机械应力,安装后可能由于风力、线路的摆动和振动而移动,因此重要的是,选择合适的附属金具,以避免机械疲劳和类似的问题。

因雷击能量太大而使线路避雷器在电气上过负荷而损坏的风险比较大;与此不同,由于变电站有直击雷保护,安装在变电站的避雷器遭遇这种风险的可能性较小。架空线路的绝缘一般都是可以自恢复

的,如果避雷器在过载损坏后,可以通过脱离器与线路脱离的话,即使线路安装了无间隙金属氧化物避雷器后,仍然可以使用快速自动重合闸。或在带间隙线路避雷器的情况下,如果间隙的放电电压高于系统中出现的最大的操作过电压,线路就可以重合而不会引起间隙的放电。

根据 GB 11032—2010,短路试验中只要碎片落在规定的范围内,可以允许避雷器破碎倒下。机械上保持完整对线路避雷器来说特别重要,甚至需要故障后还有一定的强度。对这种情况,在制造厂和用户之间会有不同的测试程序和要求(例如:在试验后,要求带间隙线路避雷器的本体或无间隙线路避雷器仍可以从顶部吊起运走)。

3.3.4.3.1 无间隙线路避雷器的选择

无间隙线路避雷器适用于所有系统电压等级,并且可以保护雷电和操作过电压。

无间隙线路避雷器和通常的避雷器选择只有很小的区别。最明显的差别是,在高于配电电压等级的线路避雷器上也用脱离器。无间隙线路避雷器选择推荐使用图 19 的反复优化程序:

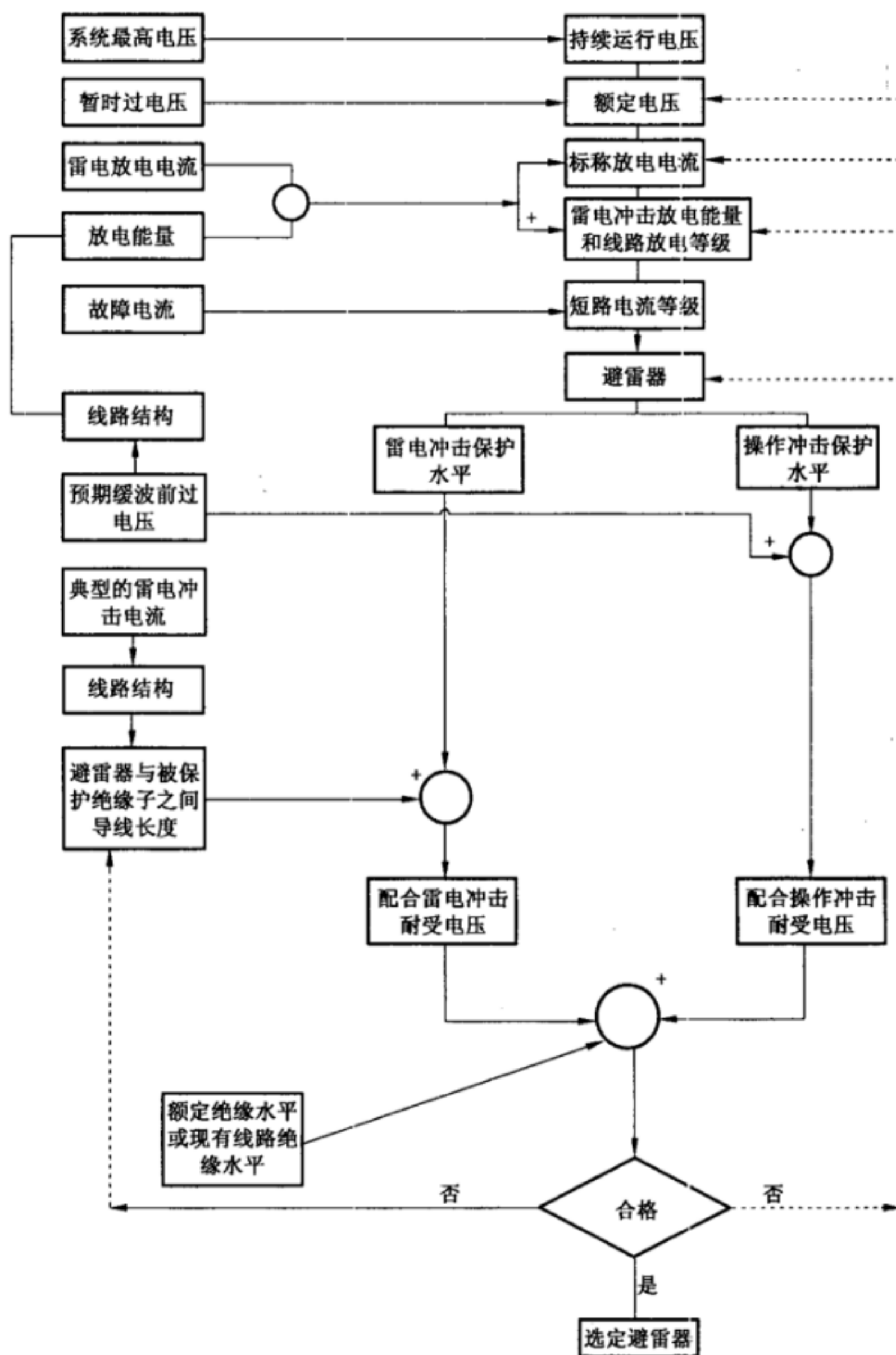


图 19 选择无间隙线路避雷器的流程图

- 考虑最高系统工作电压来确定避雷器的持续工作电压。
- 考虑暂态过电压以确定避雷器的额定电压。
- 估计预期流过避雷器的放电电流幅值,电荷(或通过避雷器的能量)及概率,考虑一个可接受的避雷器故障率下,确定线路放电要求和选择避雷器的标称放电电流、大电流冲击数值、线路放电等级和雷电冲击放电能力。

注:雷电放电电流和相关的放电能量可能显著地高于变电站的避雷器,特别在无架空地线线路上。操作冲击电流则可能低些。

- 考虑预期的故障短路电流,选择短路电流额定值。
- 选择一个符合上述要求的避雷器。
- 确定避雷器的雷电和操作冲击保护特性。
- 考虑避雷器在过负荷时,脱离器动作有足够的空间下,将避雷器装在靠近要保护的绝缘子。
- 考虑有代表性的缓波前过电压和系统结构,确定与被保护设备配合的操作冲击耐受电压。
- 考虑下列因素,确定与被保护设备配合的雷电冲击耐受电压:
 - 由安装避雷器的线路的雷电特性(对地闪密度、雷击线路的方式、接地电阻等)和可接受的被保护设备闪络率,确定有代表性的雷电流冲击;
 - 线路结构;
 - 避雷器和被保护绝缘子之间连线的长度。
- 由 GB 311.1 确定设备的额定绝缘水平。
- 如果设备希望用较低的额定绝缘等级,则需要探讨使用一个较低的额定电压、较高的标称放电电流、较高的线路放电等级、较高的雷电冲击放电能力的避雷器,或缩短避雷器和被保护绝缘子的连线。

注 1: 避雷器的额定电压较低可能降低其运行可靠性。

注 2: 线路的绝缘水平可以与 GB 311.1 给出的不同。

注 3: 通常避雷器也可能安装在现有的线路上。这时就要与现有线路比较以进行操作和雷电冲击耐受电压的配合。

注 4: 应该考虑避雷器雷电放电过负荷的风险,并且在计算线路的闪络和跳闸率中权衡轻重。

3.3.4.3.2 额定电压

与变电站避雷器的选择相似,线路避雷器的最低持续运行电压和额定电压的最初选择是以系统的工况为基础。其后考虑线路绝缘的雷电冲击耐受电压和操作冲击耐受电压再作选择。

避雷器额定电压的选择应使其雷电和操作冲击的残压低于线路的雷电和操作冲击耐受电压。通常线路雷电冲击耐受电压和避雷器保护水平之间有足够的裕度,所以额定电压的选择不是很难。特别大的裕度也没有什么好处,不推荐使避雷器达到最低可能的额定电压,因为这样避雷器可能会承受不必要的高的工频过电压应力,从而增加风险。通常无间隙线路避雷器会选择比变电站避雷器高一些的额定电压或低一些的线路放电等级。这样的选择也保证了避雷器不必承受应由电站避雷器承受的高的操作过电压能量和电容器放电。

3.3.4.3.3 避雷器的等级和能量要求

选择无间隙线路避雷器要考虑它们的等级,对于额定电压高于 52 kV 的线路避雷器还要按照 GB 11032—2010 考核它们的雷电冲击放电能力。根据使用情况,有避雷线线路上的无间隙线路避雷器的标称放电电流通常为 5 kA 或 10 kA,线路放电等级为 1 级~3 级。

对无架空地线线路防雷用的无间隙线路避雷器,根据雷电活动水平以及预期跳闸率,标称放电电流为 10 kA 或 20 kA,线路放电等级为 2 级~4 级。

用以限制操作过电压的无间隙线路避雷器的线路放电等级可以等于变电站避雷器,或在许多情况下可以低一级。因为线路较长时,避雷器大约装在线路的中间,线路的长度减少了,降低了操作过电压能量。通常标称放电电流为 10 kA 或 20 kA,放电等级 3 级~5 级。

3.3.4.3.4 故障清除和脱离器

无间隙线路避雷器直接跨接在线路绝缘子上,由于架空线路的绝缘是自恢复性的,避雷器过负载时应能够快速切断避雷器,线路可以自动重合。安装脱离器使过负载的避雷器与线路隔离可以实现这一点。由于变电站的绝缘一般是不能够自恢复的,即变电站不可以在无保护下重新合闸,变电站的避雷器通常不使用脱离器。

脱离器和无间隙线路避雷器串联,也可以作为指示器,使得容易用肉眼发现过负荷的故障避雷器。

与配电用避雷器脱离器比较,输电线路避雷器脱离器要求更大的能量,即比配电避雷器脱离器耐受更大的雷电流和长持续时间的冲击电流。实际上,脱离器应通过线路避雷器的所有型式试验,最关键的是要证实脱离器仅在线路避雷器过负载故障时才动作,且动作速度足够快。对中性点非直接接地系统且无架空地线线路,线路的短路电流很小,例如:只有几十安,这对脱离器的动作是个矛盾。

通常脱离器的机械部分是其最薄弱环节。因此,连接无间隙线路避雷器到导线或接地的线一定要足够长,以保证在避雷器或导线运动时,脱离器不会由于机械疲劳而折断。

在无间隙线路避雷器脱离器动作以后,线路的绝缘应最好有和安装避雷器以前同样的雷电冲击和操作冲击耐受电压水平,因为要有一段时间才能更换有故障的避雷器。被隔离的避雷器与杆塔之间的绝缘强度应足够,避免避雷器再次放电。

3.3.4.3.5 无间隙线路避雷器的使用

无间隙线路避雷器可防护雷电以及操作过电压,它适用于提及的各种条件。

但是,在闪密度地区,接地故障电流小于 20 A 的系统(中性点经补偿或非直接接地)架空线路上使用带脱离装置的无间隙线路避雷器时,应特别考虑所用脱离器在接地故障电流下是否可能不动作。当避雷器发生故障时,脱离器不动作将使线路不能脱离接地。

无间隙避雷器如果安装在每个杆塔上,可使输电线路设计更为紧凑,空间显著地小于传统线路。无间隙线路避雷器也可以使用在原有杆塔和线路的基础上实现现有线路的升压,特别是对旧的和非常用的输电电压。例如线路升压运行时,在中等雷电活动地区,只在顶相上安装线路避雷器以代替架空地线,也可以装在有架空地线的线路三相上,关键是它可以防护快波前以及缓波前的过电压。

无间隙线路避雷器可作为变电站的线路入口保护装置。在靠近变电站的线路终端塔上(该杆塔的接地与变电站接地系统不连接),所有的相上都装无间隙线路避雷器,这或多或少地可以消除靠近变电站的线路反击。从而降低侵入波的陡度和幅值,改善电站避雷器的保护性能。对 GIS 变电站,可以仅用户外变电站入口处的避雷器代替金属全封闭 GIS 避雷器。使用避雷器并联可能是最经济的解决方法。这种额定电压相同的并联避雷器,只是为了降低保护水平,而不必考虑分流。

典型的无间隙避雷器电气参数见表 7。

表 7 典型的无间隙线路避雷器参数

单位为千伏

避雷器 额定电压 U_r	避雷器持 续运行电 压 U_c	标称放电电流												系统 标称 电压
		20 kA 等级				10 kA 等级				5 kA 等级				
		陡波 冲击 电流 残压	雷电 冲击 电流 残压	操作 冲击 电流 残压	直流 1 mA 参考 电压	陡波 冲击 电流 残压	雷电 冲击 电流 残压	操作 冲击 电流 残压	直流 1 mA 参考 电压	陡波 冲击 电流 残压	雷电 冲击 电流 残压	操作 冲击 电流 残压	直流 1 mA 参考 电压	
有效值		峰值 \leq		\geq	峰值 \leq		\geq	峰值 \leq		\geq	有效值			
17	13.6								57.5	50	42.5	25	10	
51	40.8								154	134	114	73	35	
54	43.2								163	142	121	77		
96	75					288	250	213	140	288	250	213	140	66
108	84					315	281	239	157	323	281	239	157	110
114	89					341	297	252	165					
216	168.5					630	562	478	314					220
312	237					847	760	643	442					330
324	246					880	789	668	459					
444	324	1 238	1 106	907	597	1 137	1 015	900	597					500
468	330	1 306	1 166	956	630	1 198	1 070	950	630					

3.3.4.3.6 带间隙线路避雷器的选择

带间隙线路避雷器仅用于雷电过电压保护。与无间隙线路避雷器的另一个不同点是，避雷器本体仅承受很小的持续运行电压。因此，带间隙线路避雷器的额定电压的选取与无间隙线路避雷器不同。另一个重要特点就是它的间隙特性要与被保护线路绝缘的雷电冲击耐受电压和操作冲击耐受电压配合。带间隙线路避雷器的选择包括避雷器本体和串联间隙。

国内的外间隙避雷器又可以分为间隙有绝缘件（一般为复合绝缘子）支撑和无绝缘件支撑两种。

下面的反复优化过程和图 20 所示流程图，给出了带间隙线路避雷器的选择建议：

- 根据系统最高运行电压和间隙放电时的暂时过电压，以确定带间隙线路避雷器的额定电压；
- 估计通过带间隙线路避雷器的雷电放电电流幅值、电荷（或通过带间隙线路避雷器的相关能量）和概率，考虑可接受的带间隙线路避雷器故障率情况下，选择标称放电电流、大电流冲击值和雷电冲击放电能力；
- 根据预期的故障电流，选择短路等级；
- 选择一个满足以上要求的带间隙线路避雷器；

注：特别是在线路没有屏蔽的情况下，雷电放电电流和放电能量可能明显高于应用在变电站的避雷器。

- 根据系统最大缓波前过电压，确定带间隙线路避雷器（在避雷器本体短路之下）的绝缘耐受；
- 确定带间隙线路避雷器的雷电冲击保护特性包括快波前放电电压、标准雷电冲击放电电压、标称放电电流和大电流下的残压；

——确定雷电冲击配合耐受电压,根据:

- 有代表性的雷电冲击电流,及由带间隙线路避雷器连接的架空线路决定的雷电性能(地闪密度,线路的落雷方式,杆塔的基础阻抗等)和受保护绝缘的可接受的闪络率等;
- 线路的结构。

注 1: 降低额定电压可能降低带间隙线路避雷器的运行可靠性。

注 2: 线路的绝缘等级可能和 GB 311.1 给出的绝缘等级不同。

注 3: 通常的情况可能是:带间隙线路避雷器安装在现有的线路上,其雷电冲击耐受电压就是与线路的现有绝缘等级相配合。

注 4: 应该考虑带间隙线路避雷器雷电放电下过载的风险,并计入计算的线路闪络率和跳闸率中。

注 5: 带间隙线路避雷器与绝缘子直接并联安装。避雷器的保护水平应考虑连接导线的影响。

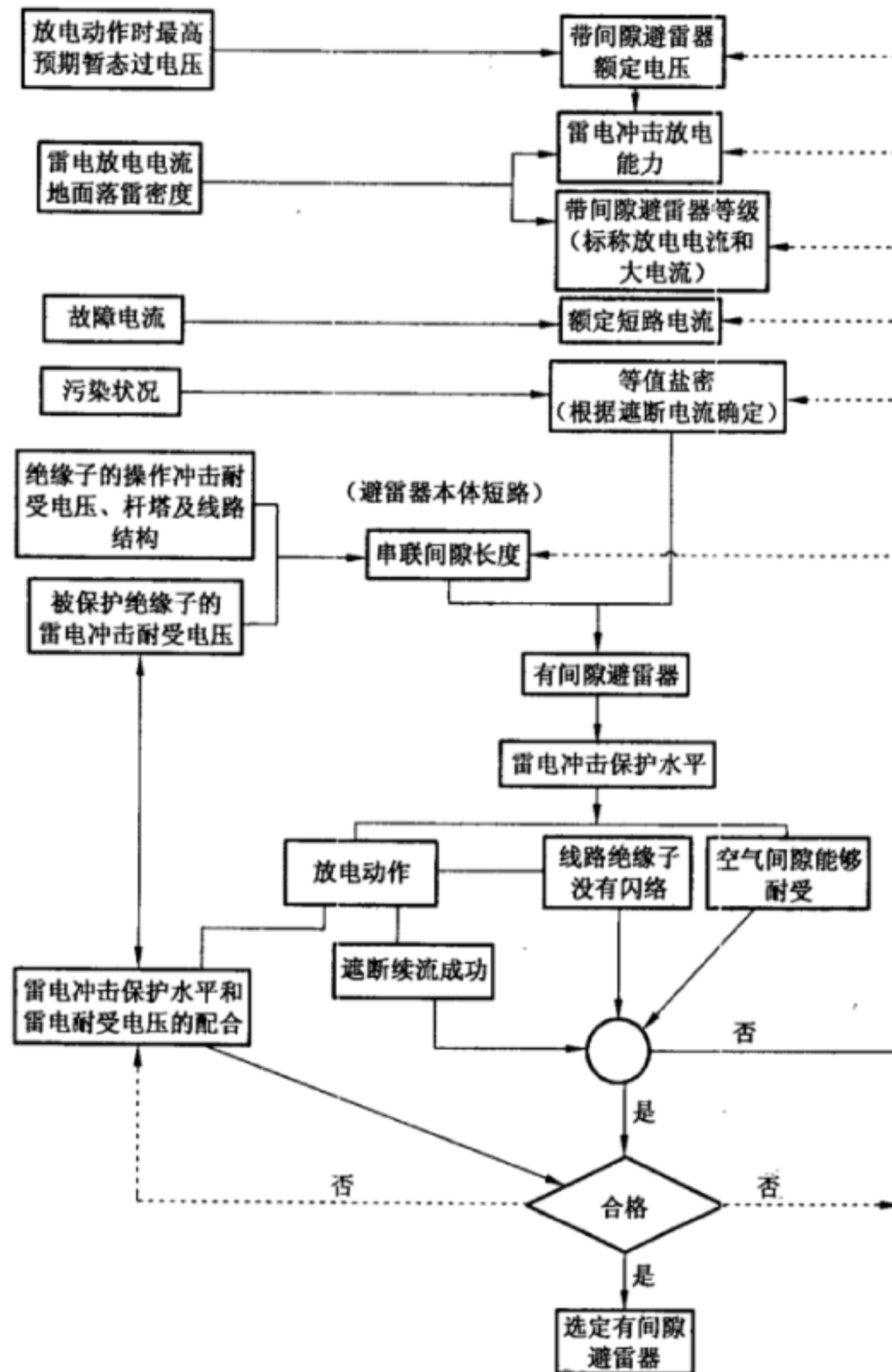


图 20 选择带间隙线路避雷器流程图

3.3.4.3.7 额定电压

运行中线路最大对地工频电压决定了带间隙线路避雷器的额定电压,带间隙线路避雷器可耐受半个周期的工频电压。间隙应在第一个工频半周期内熄弧。另外,带间隙线路避雷器的保护特性,包括残压和外间隙的放电电压,要低于线路绝缘的雷电冲击耐受电压,对持续运行电压 U_0 没有要求。因此,

带间隙避雷器本体的额定电压可低于系统中使用的其他避雷器的额定电压。和无间隙线路避雷器相比较,避雷器本体可以更紧凑更轻便,同样也便于带间隙线路避雷器在拥挤的多回路输电线路杆塔上安装。

典型带间隙避雷器本体的电气参数如表 8 所示。

表 8 典型带间隙避雷器本体的电气参数

单位为千伏

系统 标称 电压	避雷器 本体额 定电压	标称放电电流								
		20 kA 等级			10 kA 等级			5 kA 等级		
		陡波冲击 电流残压	雷电冲击 电流残压	直流 1 mA 参考电压	陡波冲击 电流残压	雷电冲击 电流残压	直流 1 mA 参考电压	陡波冲击 电流残压	雷电冲击 电流残压	直流 1 mA 参考电压
有效值	峰值									
	≤	≥		≤	≥		≤	≥		
10	13							46	40	20
	17							60	52	26
35	42							138	120	60
	51							168	146	73
66	69							228	198	100
	75							246	218	108
110	90				292	260	130	292	260	130
	96				314	280	140			
	102				332	296	148			
	108				358	320	160			
220	180				584	520	260			
	192				628	560	280			
	204				664	592	296			
	216				716	640	320			
330	288	868	775	408	868	775	408			
500	396	1 172	1 050	561	1 127	1 010	561			

3.3.4.3.8 带间隙线路避雷器的等级和能量要求

选择带间隙线路避雷器应根据分类和 GB 11032—2010 附录 N 中雷电冲击放电能力。根据 DL/T 815—2002 或 JB/T 10497—2005 的分类,通常情况下有架空地线的输电线路上的带间隙线路避雷器的标称放电电流为 5 kA、10 kA 或 20 kA,主要取决于地面落雷密度和期望的故障率。表 9 为带间隙线路避雷器本体的电流冲击耐受试验推荐值。

表 9 带间隙线路避雷器本体的电流冲击耐受试验推荐值

系统标称电压(有效值) kV	2 ms 方波冲击电流(峰值) A	4/10 大电流冲击电流(峰值) kA
500	800	100
330	600	
220	500	
110	400	
66	150	65
35		
10		

3.3.4.3.9 间隙的绝缘配合

与绝缘子并联安装的带间隙线路避雷器外间隙仅用以防护雷电过电压。即使在污染和湿的情况下,带间隙线路避雷器在系统中任何操作过电压、工频过电压、或电容放电时都不应发生放电。如果避雷器本体过载,它就会短路,在重合闸或系统的任何缓波前和暂时过电压下,间隙都不应发生放电。要使带间隙线路避雷器的保护性能与并联安装绝缘子的雷电冲击耐受电压强度相配合,推荐使用式(7)作为判据考虑带间隙线路避雷器的保护性能:

$$U_{50EGLA} + X \cdot \sigma < U_{50L1} - X \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

U_{50L1} ——绝缘子在标准雷电冲击下的 50%闪络电压;

U_{50EGLA} ——带间隙线路避雷器在标准雷电冲击下的 50%放电电压;此外,不管避雷器本体是否短路,它也应是最大电压;

σ ——雷电冲击标准偏差,设定为 3%;

X ——建议值为 2.5。

外间隙在进行放电试验时,必须与串联使用的避雷器本体作为一个整体试验。由于避雷器本体中的金属氧化物电阻片也是一个电容,与外间隙的电容串联后也分担一部分电压,因此串联本体后的整体避雷器放电电压将高于单纯间隙的放电电压。

应对带外间隙的整只避雷器进行雷电冲击 50%放电电压和工频耐受电压(考虑将避雷器本体短路)试验。雷电冲击 50%放电电压试验用来确定避雷器间隙的最大距离,而工频耐受电压试验用来确定避雷器间隙的最小距离。其数值应与线路绝缘水平相配合,以保证避雷器在雷电过电压下放电,而在工频及部分操作过电压下不放电(考虑包括避雷器本体已经发生故障的情况)。表 10 给出了避雷器雷电冲击 50%放电电压、工频湿耐受电压和 330 kV 及以上避雷器操作冲击湿耐受电压的推荐值,厂家须提供 220 kV 及以下避雷器操作冲击湿耐受电压值(操作过电压倍数)。

表 10 带间隙避雷器雷电冲击放电电压和操作湿耐受电压性能推荐值

系统标称电压(有效值) kV	雷电冲击 50%放电电压 正极性(峰值) kV 不大于	工频湿耐受电压(有效值) kV 不小于	操作湿耐受电压 正极性(峰值) kV 不小于
10	100*	26	—
35	240	70	—

表 10 (续)

系统标称电压(有效值) kV	雷电冲击 50%放电电压 正极性(峰值) kV 不大于	工频湿耐受电压(有效值) kV 不小于	操作湿耐受电压 正极性(峰值) kV 不小于
66	400	117	—
110	550	185	—
220	965	340	—
330	1 300	460	652
500	1 760	510	898

* 当 10 kV 线路使用雷电冲击耐受电压低于 110 kV 的绝缘子时,用户可与制造厂协商降低雷电冲击 50%放电电压。

间隙有绝缘件支撑的外间隙避雷器,间隙的支撑绝缘件必须有足够的绝缘强度,在进行雷电冲击放电电压试验时,应保证每次放电路径为间隙电极之间,而不是沿支撑件表面放电。避雷器进行放电电压试验时,放电必须发生在空气间隙,而不能发生在支撑的绝缘件上。如果采用复合绝缘子作为支撑件时,这种复合绝缘子在电气性能上,必须进行与线路用的复合绝缘子对应的型式、抽查和例行试验,以保证其长期运行的可靠性。

避雷器雷电冲击伏秒特性(放电时间至少覆盖 $1\ \mu\text{s}\sim 10\ \mu\text{s}$)应比被保护的线路绝缘子(串)的雷电冲击伏秒特性曲线至少低 10%。

3.3.4.3.10 带间隙线路避雷器的应用

带间隙线路避雷器仅用来防护雷电过电压,主要是有架空地线线路的反击雷和绕击雷。

如果避雷器过载,应该注意很难检测到避雷器本体的损坏。故障指示器可以清晰直观地显示避雷器本体的损坏。

应该指出带间隙线路避雷器本体故障后,避雷器的放电电压将会降低,线路的雷电冲击耐受电压总是比原来的低。因此,建议要尽快更换故障避雷器。

3.3.5 选择电缆保护用的避雷器

3.3.5.1 电缆的过电压保护

架空线路和电缆电气参数最本质的不同就是波阻抗。架空线路的波阻抗值范围为 $200\ \Omega\sim 450\ \Omega$,而电缆的范围为 $20\ \Omega\sim 60\ \Omega$ 。首先,这种差异导致当行波进入电缆时过电压幅值明显降低。降低了的电压波通过电缆,在其末端反射电压会升高一倍。随后,电压波返回到电缆首端再次进行反射等。这样,电缆上的过电压逐步建立,虽然它的实际陡度较低,但峰值和架空线路上的过电压峰值接近。

两端都和架空线路连接的电缆,其两端都应有避雷器的保护,如果电缆的长度长到了一定的程度,那么避雷器的参数选定和能量吸收能力要做仔细的计算。

注 1: 这种计算的一种方法是使用成熟的 EMTP 程序进行。

注 2: 这种计算的另一种方法是依据有关金属氧化物避雷器使用导则的 IEC 标准所推荐的公式进行。

母线或架空线路发生在空气中向地面放电的最严重影响是引起短路停电。但接着的损失较小。在电缆中,电缆套管的闪络或绝缘击穿则完全不同,它将导致电缆损坏并需要大量维修工作。因此电缆必须被视为变电站的设备并用避雷器来保护。

对等于和高于 66 kV 的电缆,建议接近电缆(约 3 个挡距)采用有架空地线的架空线路以及电缆终端的杆塔要有较低的接地电阻。

避雷器要直接安装在电缆的两端,连接线要尽可能短。避雷器接地端必须用最短的方式直接连接到电缆护套。

长的电缆两端都需要避雷器保护,部分短电缆只要一端保护就足够了,因为一端的避雷器也可以保护另一端。

由于电缆可以储存相对较高的能量,建议选择更高的线路放电等级的避雷器。在同样的持续运行电压下,有更高的能量吸收能力的避雷器有更低的残压,保护性能更好。

3.3.5.2 电缆护套的保护

由于发热的原因(电缆护套上的功率损耗),高电压系统中的电力电缆的护套仅有一端接地。电缆护套非接地端采用过电压保护。

在高压及超高压系统,电缆护套是两端接地还是一端接地取决于系统管理和电缆的长度。

如果电缆护套两端接地,可以避免电缆护套上的任何电应力。两端接地的电缆护套的一般缺点是总的功率损耗会增加。对于典型的中压电缆,复合绝缘电缆在电缆护套上的额外损耗大约为相应电缆总损耗的 2%~10%。然而,如果电缆护套只有一端接地,在电缆护套没有接地的一端安装电缆金属屏蔽层电压限制器,额外的功率损耗就可以避免。

电缆护套的电压和电流的影响因素:

- 短路电流的持续时间;
- 负载电流;
- 电缆布置(三角形或平行排列)。

由负载电流引起的电缆护套的感应电压可以忽略,而短路电流引起的感应电压用来计算保护电缆护套的避雷器的持续运行电压。

电缆护套避雷器的持续运行电压可以通过式(8)近似地计算。

$$U_c \geq \frac{U_i \times I_k \times L_k}{T} \dots\dots\dots(8)$$

式中:

- U_c ——避雷器的持续运行电压,单位为千伏(kV);
- I_k ——电缆的最大短路电流(单相),单位为千安(kA);
- L_k ——没有接地的电缆护套长度,单位为千米(km);
- U_i ——电缆护套单位长度的感应电压,kV/(kA·km)电缆长度;
- T ——电缆金属屏蔽层电压限制器暂时过电压能力(与避雷器工频电压耐受时间特性曲线相对应的过电压倍数 $T=U_{TOV}/U_c$)。

这些电缆金属屏蔽层电压限制器的额定电压应该比最大故障电流下的护套对地感应电压要高。标称放电电流应该和电缆末端的相对地避雷器的标称放电电流值相等。保护等级要尽可能的低,因为护套在运行期间,它的耐受强度没有明确的定义,也不能通过标准的测试确定。

3.4 正常和异常运行条件

3.4.1 正常运行条件

GB 11032—2010 给出了避雷器的正常运行条件。

3.4.2 异常运行条件

GB 11032—2010 给出了可能出现的异常运行条件。下面给出了有关题目的简短说明。

3.4.2.1 温度高于+40℃或低于-40℃

环境温度较高时,按照 GB 11032—2010 进行的动作负载试验预热到 60℃将不能代表所有运行温度,需提高热温度。这取决于实际持续运行电压,功率损耗和避雷器外套的热性能。

低温可能影响内部装有气体的避雷器的密封性能。复合外套避雷器在温度接近或低于-50℃时会非常的敏感,复合材料可能出现裂痕。避雷器应用于-40℃或以下温度时应咨询制造厂,并试验验证。

3.4.2.2 海拔超过 1 000 m

外部绝缘强度随着海拔的升高而降低。这要求设计避雷器及布置均压环时要考虑绝缘强度的降低,同样爬电距离也应得到补偿,具体导则见 GB/T 311.2。

3.4.2.3 导致绝缘表面或安装金具老化的烟雾或蒸汽

对于特殊的烟雾或蒸汽,请咨询制造厂。

3.4.2.4 烟雾、污垢、盐雾和其他导电材料的过度污染

避雷器的耐污能力包括 3 个方面:

- a) 避雷器的外套要能够耐受污染而不闪络。这可以按 GB/T 4585—2004 验证,或按 GB/T 26218.1—2010 的设计来确定。应按 GB/T 26218.1—2010 的建议增加爬电距离或者选择复合外套避雷器来提高耐污能力。
- b) 避雷器必须耐受可能由于避雷器外套污染使电压分布改变而引起的温度升高。应该考虑污秽等级和在污秽条件下由故障或者重合闸操作引起的过电压的幅值和频繁程度。GB 11032—2010 给出了适合瓷外套避雷器的检测方法,这样就可以通过下面的方法提高耐污性能:
 - 1) 选择更高的暂时过电压容量,即相同类型的避雷器采用更高的额定电压;
 - 2) 选择更高能量的避雷器;
 - 3) 选择有更好热传递机理的避雷器;
 - 4) 选择在持续运行电压下有更少功率损耗的避雷器;
 - 5) 选择复合外套避雷器。
- c) 避雷器必须耐受由于污染时外套上电压分布改变,而引起的内部局部放电不会损害电阻元件或内部组装元件。

3.4.2.5 在水汽、湿气、水滴或蒸汽情况下的过多暴露

可以咨询制造厂。依据 GB 11032—2010,通过了气候老化试验的大多数复合外套避雷器可以耐受。

3.4.2.6 避雷器带电清洗

一般不建议对复合外套避雷器进行清洗,高压水可能对复合外套绝缘造成伤害。

瓷外套避雷器需要清洗。如果是带电清洗,要注意所有外套同时均匀冲洗。如果避雷器装有大的均压环要特别的注意。请咨询制造厂。

3.4.2.7 粉尘、煤气或烟气的爆炸性混合物,安装在矿井或地下等爆炸敏感区域

一般情况下,在敏感区域安装无间隙金属氧化物避雷器没有问题,但还是要咨询制造厂。必须特别

注意避雷器的连接,以避免火花和局部放电。必须要考虑可能的避雷器故障的影响,因为它很可能导致电流电弧。建议设计时保证较大裕度的能量吸收能力和暂态过电压能力,以减少故障的风险。

3.4.2.8 异常运输和贮存

咨询制造厂,进行特殊情况下的试验来检验避雷器性能。

3.4.2.9 标称频率低于 48 Hz 或高于 62 Hz

一般情况下,无间隙金属氧化物避雷器的功率损耗随频率的升高而明显增加。因此避雷器的持续运行电压可能因为高频率而必须要降低,以避免丧失热稳定,特别是滤波器用避雷器更是这种情况。如果持续运行电压必须降低,通常相应的保护水平要比正常的避雷器的等级高,就需要考虑这种情况下的绝缘配合。

频率低于 48 Hz 时,问题首先出现在直流,在交流下稳定的电阻片元件在直流时可能不稳定。请咨询制造厂。

采用高于 62 Hz 频率调试时,如 GIS 变电站,应征得避雷器制造厂的同意。频率增加不仅仅是功耗的增加。由于避雷器在持续运行电压下主要呈电容性,容性电流随频率线性增加。

3.4.2.10 避雷器靠近热源

这可能会降低避雷器的热稳定极限温度,还可能会降低避雷器的持续运行电压和能量吸收能力及耐受暂态过电压能力。

3.4.2.11 非垂直安装和悬挂安装

非垂直安装引起弯矩,需要制造厂的检查和同意。如果不是软连接,悬挂安装也可能产生弯矩。

3.4.2.12 异常机械条件(地震、振动、强风速、厚覆冰、高弯曲负荷)

3.4.2.12.1 风速大于 35 m/s

应该考虑避雷器上的附加机械应力。请咨询制造厂。

3.4.2.12.2 地震

根据地震参数、避雷器的共振频率和阻尼情况得到的应力,同避雷器的机械耐受强度相比较。要得到更准确的信息需要不同的地震测试(见 GB 11032—2010)。

3.4.2.12.3 避雷器的扭矩

应咨询制造厂。

3.4.2.12.4 避雷器的拉伸负荷

有些避雷器耐受拉伸能力强于耐弯曲负载能力。请咨询制造厂。

3.4.2.12.5 避雷器用于机械支撑

这也许可能取决于避雷器的设计和机械负载的要求。然而,如果避雷器过载,必须考虑避雷器的可能的机械效应,同时避雷器过载后可能出现高阻抗或低阻抗短路情况。

3.4.2.12.6 振动

在一些使用中,避雷器可能遭受严重的机械振动,特别是线路避雷器容易遭受振动应力。这种情况

下应该咨询制造厂,在特殊情况下必须通过试验来确定避雷器的性能。

4 特殊用途的避雷器

4.1 变压器中性点用避雷器

4.1.1 总则

最广泛使用的特殊避雷器之一是用于保护变压器中性点。由于多相或单相雷电过电压波的入侵、电力系统操作和不对称故障产生的过电压,使变压器的中性点绝缘会承受过大的过电压。每一个不接地的变压器的中性点都需用保护装置对雷电和操作过电压进行保护。在电网发生单相接地故障或在非全相运行时,中性点工频暂态和稳态电压升高,也需要保护装置进行保护。

a) 雷电过电压

线路雷击导致变压器单相或多相进波时,中性点将出现较高的雷电过电压。雷击杆塔距变电站越近,变压器不接地中性点将产生的过电压越高。由于雷电波在变压器中性点的折反射,变压器中性点过电压三相进波比二相进波要高,二相进波比一相进波要高。具体数值可以通过计算机数值仿真计算得出。

由于变压器中性点不会产生大的电流幅值,因而可用放电电流 1.5 kA 下的残压确定避雷器的保护水平。由于变压器中性点过电压波头较缓,因而绝缘配合系数可以取得小一些。

b) 操作过电压和谐振过电压

当电力系统在正常操作或故障操作的过程中,会产生操作过电压导致变压器单相或多相进波,也可能某些电感和分布电容匹配,产生谐振过电压。具体情况可以借助计算机数值仿真计算。中性点避雷器吸收操作过电压放电能量的能力应至少等于或高于相-地避雷器的要求。

c) 工频过电压

在电网发生单相接地故障或在非全相运行时,变压器不接地中性点将产生电压位移,其中中性点工频过电压对中性点绝缘有重要影响,不同故障下变压器中性点的工频过电压见表 11。

表 11 不同故障下变压器中性点的工频过电压

故障方式	中性点	变压器中性点的稳态电压 U_0 (有效值)
变压器单侧有电源的中性点,不接地变压器只有一相合闸	220 kV	$U_0 = U_{xg} = 252/\sqrt{3} = 146 \text{ kV}$
	110 kV	$U_0 = U_{xg} = 126/\sqrt{3} = 73 \text{ kV}$
变压器单侧有电源的中性点,不接地变压器只有两相合闸	220 kV	$U_0 = U_{xg}/2 = 252/\sqrt{3}/2 = 73 \text{ kV}$
	110 kV	$U_0 = U_{xg}/2 = 126/\sqrt{3}/2 = 36.5 \text{ kV}$
中、低压侧有电源上网的系统,事故跳闸时解列为其中一个系统不接地,且有一相开关跳不开	220 kV	$U_0 = 2 \times U_{xg} = 2 \times 252/\sqrt{3} = 292 \text{ kV}$
	110 kV	$U_0 = 2 \times U_{xg} = 2 \times 126/\sqrt{3} = 146 \text{ kV}$
事故跳闸时解列为孤立不接地系统,且单相接地	220 kV	$U_0 = U_{xg} = 252/\sqrt{3} = 146 \text{ kV}$
	110 kV	$U_0 = U_{xg} = 126/\sqrt{3} = 73 \text{ kV}$

注: U_{xg} = 电网允许运行的最大工频相电压。

注:产生以上中性点工频过电压时,保护变压器中性点绝缘的避雷器会因工频过电压而损坏,对此有必要加上并联间隙来限制工频过电压。

4.1.2 全绝缘变压器中性点过电压保护

目前我国电力系统内 35 kV 及以下变压器有全绝缘中性点。全绝缘变压器中性点可以使用等于或低于通常相-地避雷器保护水平来保护。由于中性点对地的工频电压较低,因此中性点避雷器的额定电压可以选用较低的值。建议可選用以下三种避雷器:

- a) 可以選用相同电压等级的典型的相-地避雷器。
- b) 与典型的相-地避雷器设计相同但额定电压降低,额定电压甚至可以降低到相-地避雷器额定电压的 60%。
- c) 降低保护水平的特殊避雷器。

選用额定电压较低的避雷器时,要分析不接地时的变压器的中性点可能出现的工频过电压。

4.1.3 分级绝缘的变压器中性点过电压保护

具有分级绝缘的变压器中性点通常用在中性点直接接地系统中,一般 110 kV 及以上变压器都采用这种结构。

a) 单独采用避雷器保护

在系统运行中,变压器中性点如果没有表 11 所述的工频过电压,则可采用单独避雷器进行保护,该避雷器性能的选择要依据系统条件和中性点的耐受电压,根据变压器中性点的绝缘水平,可按 GB 11032—2010 的表 J.9 选择。

b) 单独采用间隙保护

间隙保护具有结构简单,维护简单,既可保护雷电和操作过电压也可以保护工频过电压等优点,缺点是放电分散性比较大。棒电极直径对间隙放电影响不大,可采用 $\phi 16 \pm 4$ mm 的圆钢。棒间隙一般推荐采取水平布置方式,也可垂直布置。间隙距离值的选择要参考工频放电电压、操作冲击放电电压、雷电冲击放电电压,考虑正负 3 倍(操作取 6 倍)的放电电压的标准偏差。还应综合考虑以下三点:

- 1) 对变压器中性点的绝缘保护的要求。即间隙的标准雷电波动作值的上限小于变压器中性点的标准雷电波耐受值。该耐受值的老化积累安全系数取 0.85。
- 2) 间隙距离最大值的确定。形成不接地系统且单相接地故障时,该间隙应动作。应以正常或最低运行电压下,形成不接地系统且单相接地时中性点稳态过电压进行验算。
- 3) 确定间隙工频电压不应动作的要求。发生单相接地故障时,系统以有效接地方式运行,间隙不应动作。不接地主变中性点电压升高与系统零序、正序阻抗参数有关。有效接地系统接地系数 X_0/X_1 要求不大于 3,计算时取 $X_0/X_1 = 3$,则 220 kV 中性点对地最大偏移电压为 87.6 kV,110 kV 中性点对地最大偏移电压为 43.8 kV。

间隙距离还要根据变压器中性点的绝缘水平来选择。一般情况下,220 kV 中性点可取间隙 260 mm~310 mm,110 kV 中性点间隙可取 110 mm~145 mm。间隙距离偏小,保护裕度大,但动作频繁,增加运行监测工作量。间隙距离偏大,保护裕度小,变压器中性点的绝缘会受威胁。

c) 间隙并联避雷器保护

由于间隙的雷电冲击放电电压分散性大,而金属氧化物避雷器的雷电冲击残压比较稳定,雷电冲击下避雷器可以可靠动作。在工频过电压下间隙动作,可以有效地保护避雷器。缺点是大部分雷电冲击放电电压下间隙都会动作。很多 220 kV、110 kV 变压器中性点都采用这种保护,尤其是大容量的变压器。

4.2 相间避雷器

当切除一个电抗器或带有感性负载变压器时,在变压器或电抗器的相间会产生很高的过电压。当相-地避雷器没有动作,过电压可能会超过电抗器或变压器的相间耐受电压。如果预期有这样的操作,

则除相-地避雷器外,相间也应装避雷器。相间避雷器的持续运行电压应等于或高于 1.05 倍的最高系统电压。金属氧化物避雷器耐受的暂时过电压应按最高系统电压的 1.25 倍考虑。对更高的暂时过电压必须规定额定电压值。对有间隙避雷器,其额定电压必须考虑暂时过电压。典型结构如图 21、图 22 和图 23 所示。

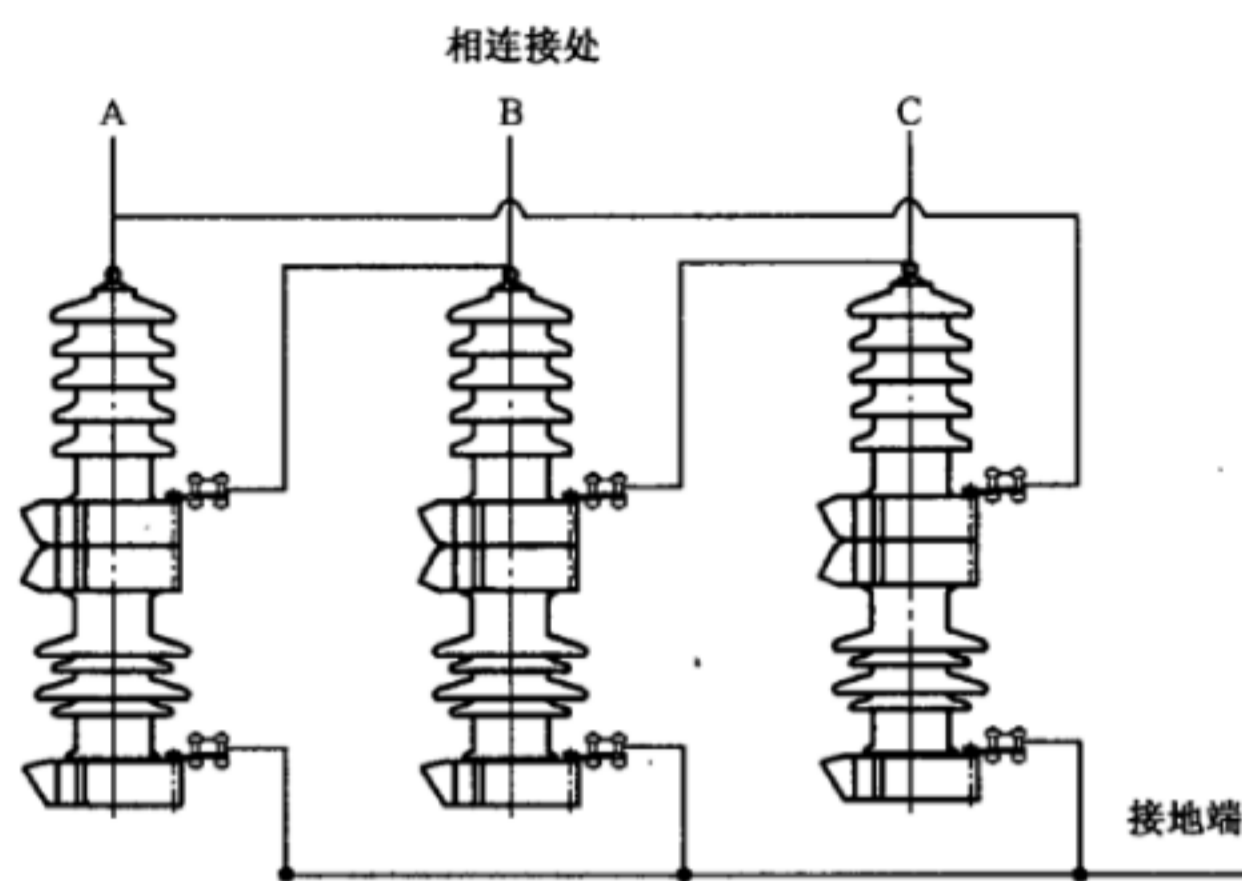


图 21 六组连接

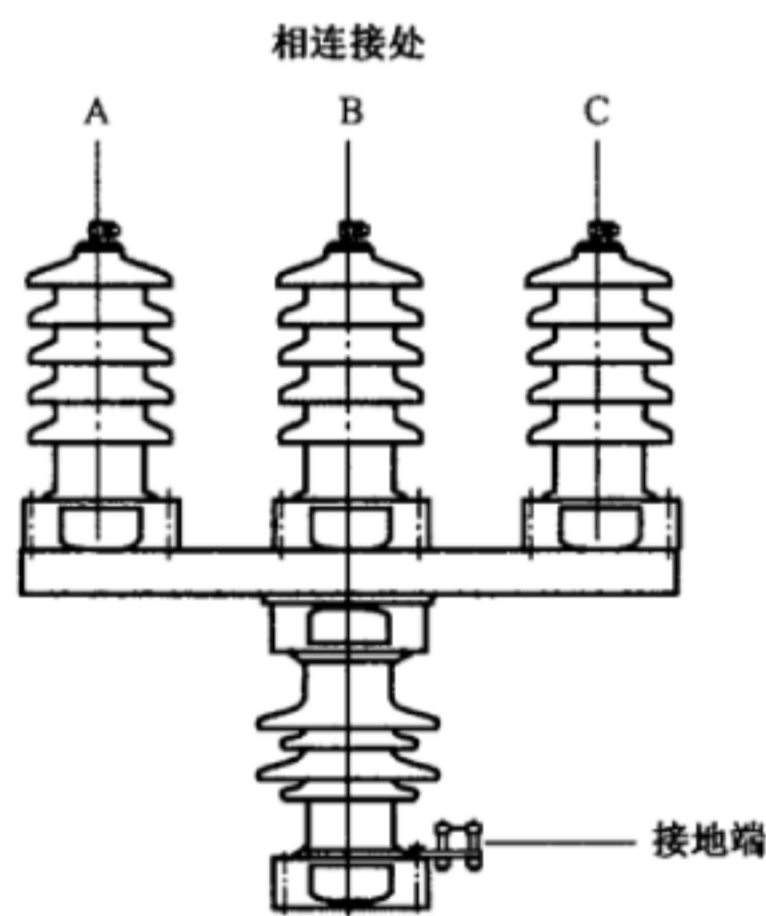


图 22 星型连接

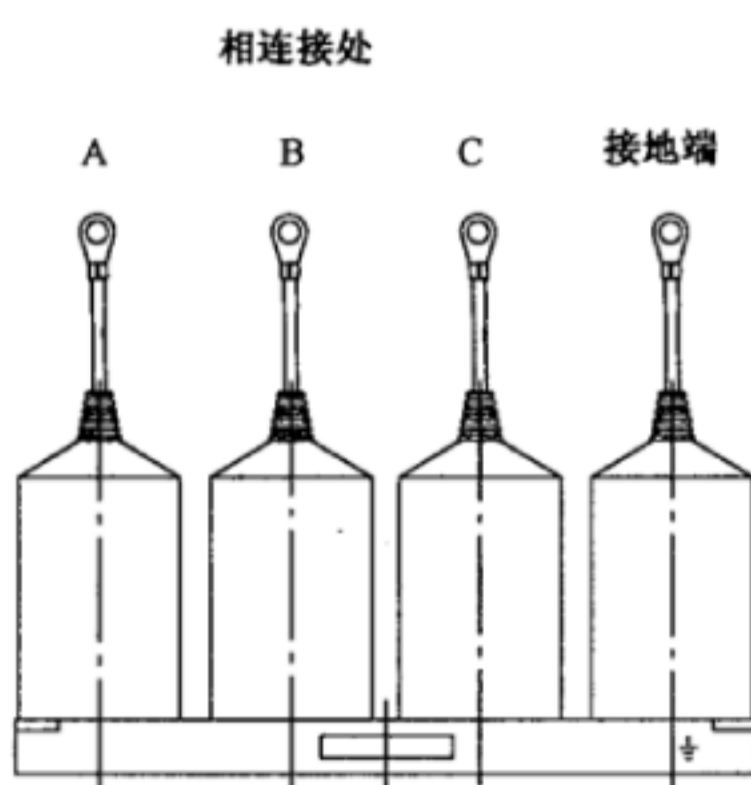


图 23 四星型连接

对于具有一个 Δ 连接低压线圈的变压器,需在低压侧装相间避雷器以限制感应传递过电压。当断开变压器时,低压侧避雷器通过吸收磁能也能保护变压器的高压侧。

电弧炉变压器除了安装相-地避雷器外,还需安装相间避雷器。对于该类避雷器,必须有特殊要求和明确的避雷器特性。

4.3 旋转电机用避雷器

对旋转电机,可以利用避雷器来保护发电机和电动机免遭过电压损坏。

该类避雷器技术要求由制造厂和用户协商确定。由于短路电流可能会高于 GB 11032—2010 列出的值,因此对发电机用避雷器必须特别注意它们的压力释放性能。

对直接或通过一段短电缆、电容($0.25\ \mu\text{F}\sim 0.5\ \mu\text{F}$)连接到架空线的电机,在相-地之间应安装避雷器,避雷器应尽可能靠近电机端。另外,在电机前的架空线上或架空线与电缆连接点应装第二组避雷器。

注:架空线上安装的避雷器除了限制进入电机的过电压外,还降低了通过电机避雷器的放电电流,因而使保护电机避雷器的残压降低,相当于给电机提供了附加保护。

选择避雷器特性要依据第 2 章或第 3 章的规定及比较制造厂建议的被保护设备绝缘冲击强度和避雷器的保护水平。通常,在保护水平和耐受电压之间只能达到很小的保护裕度。

当电机通过变压器连接到架空线时,若变压器已采取保护,电机可以不再装设避雷器。当电机通过长电缆或具有上述电容值($0.25\ \mu\text{F}\sim 0.5\ \mu\text{F}$)的并联电容器连接到架空线时,电机也可以不再装设避雷器。如果断路器安装在变压器和旋转电机之间时,应在变压器端(电机侧)安装电容器。

通过增设相间避雷器,对连接到 Y/ Δ 变压器的电机能起到更好的保护。装在电机旁或变压器电机侧的避雷器不易遭到大的雷电流。因而,采用放电电压较低(带间隙避雷器)或采用放电电流较小(500 A 或更小)的避雷器,能得到较好的保护。

汽轮发电机有低的波阻抗和单相封闭母线,必须避免相间短路。因此,相间不应安装避雷器。采用变压器高压侧的避雷器可以得到足够的保护。

4.4 多只避雷器的并联

4.4.1 总则

在大型电站中,由于避雷器的安装点与电器设备间的距离以及变电站的运行方式,为了确保对电站电气设备的可靠保护,每一相上可能不只安装一只避雷器,需要安装一定数量的避雷器。

另一个原因是单只避雷器难以吸收可能出现的高能量。

对于改造和扩建的电站,新增设备的过电压保护可能需要新装避雷器,新装的避雷器与系统中原有的避雷器并联。

4.4.1.1 从保护方面考虑

从避雷器保护的观点来看,多只避雷器的并联安装是可以的,能够提高对电站设备的保护水平。一般情况下,在线路侧和变压器处各安装一组避雷器。线路侧避雷器保护线路入口处安装的断开的断路器和其他设备(如:CVT)。断路器闭合时,一部分雷电流通过线路侧避雷器分流,流过变压器避雷器的雷电流比没有安装线路侧避雷器时的雷电流要小,使得保护变压器的避雷器残压降低,同时变压器承受的雷电过电压也降低,所以线路侧避雷器改善了对变压器的保护。

4.4.1.2 从吸收能量方面考虑

在可能的发生操作或故障事件中,并联的避雷器的能量吸收通常不可能在并联避雷器之间保持一致。

为了保证在并联避雷器之间电流和能量分配比较均匀,需要对并联的避雷器进行匹配。对于通常的避雷器一般不进行电流和能量的匹配。

对于通常的高压避雷器,如果在订购同样结构和保护水平的避雷器时没有要求其之间电流和能量的匹配,应该考虑其电压特性的偏差在 5% 的范围内。对于不同结构或具有不同保护水平的避雷器,其电压特性的偏差会很大。

对于操作波电流的范围,避雷器的非线性系数约为 20~30,其电压 5% 的偏差,会引起避雷器间电流分配更大的偏差。

因此,所有避雷器必须独自耐受确定的能量或者在避雷器间保护水平偏差不小于 10% 时有足够能量承受裕度供选择以吸收能量。

对于暂时过电压(TOV),电流和能量分配一般不考虑,每个避雷器应能单独耐受 TOV。仅在避雷器用来限制 TOV 的这种情况下,才考虑避雷器的电流分配。另外在这种情况下,具有低残压的避雷器可以“保护”其他高残压的避雷器。

然而,通常在暂时过电压下,通过避雷器的电流比操作冲击电流小,并接近避雷器伏安特性的“拐点”。在这种电流范围内避雷器的非线性系数比较大,很难获得好的电流分配。另外,同正温度系数大电流伏安特性的区域相比,接近伏安特性拐点的区域具有负的温度系数。

4.4.2 与有间隙 SiC 避雷器并联安装

当变电站有无间隙和有间隙两种避雷器时,无间隙避雷器经常有更低的操作冲击保护水平,因此它会吸收差不多所有的操作冲击的能量(实际上是保护了那条线路上的有间隙避雷器)。因此,当新的无间隙金属氧化物避雷器和老式 SiC 避雷器并联安装时,必须要计算在忽略老式 SiC 避雷器情况下的能量吸收能力。

4.5 保护并联电容器组用避雷器

保护电容器组用避雷器具有以下作用:

- a) 防止断路器重击穿时对电容器的危害;
- b) 降低断路器反复再击穿的风险;
- c) 通过限制高幅值的过电压来延长电容器的使用寿命;
- d) 防止不可预见的谐振情况,否则可能导致电容器故障;
- e) 限制所有电容器组暂态操作过电压,该过电压能在系统中传播得更远并干扰敏感的设备;
- f) 通过防止高幅值过电压以升级电容或者提高其工作电压;
- g) 对连接到线路上的电容器起雷电保护作用;
- h) 保护全绝缘或弱绝缘的串联电抗器。

晶闸管控制的电容器经常和许多避雷器装配到一起。对于这种电容器已经做过许多详细的研究,因此这里只考虑断路器开关设备。

避雷器的放电能量是需要考虑的最重要的参数。这种能量取决于电容器的设计、系统的接地方式、避雷器的安装方式及断路器性能等。

粗略估计避雷器能量 W 的公式见式(9)。

$$W = \frac{1}{2} \times C \times [(3U_0)^2 - (\sqrt{2}U_r)^2] \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中:

C ——电容器组中单相电容值。

U_0 ——相对地运行电压。

U_r ——避雷器的额定电压。

此外,电容器组的运行电压可能比系统其他地点运行电压高 5%~10%,当选择避雷器的持续运行电压时必须考虑这一点。

对于保护串联电抗器或滤波器的避雷器,如果电抗器为弱绝缘,避雷器的额定电压较低;当单相接地时,电容器通过电抗器和避雷器的并联回路放电的能量会很大。这个能量可通过式(10)近似估算。

$$W = \frac{1}{2} \times C \times (U_{sw})^2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中:

C ——电容器组中单相电容值;

U_{sw} ——电容器组相地操作过电压保护水平。

电容器放电的持续时间可能比长持续冲击的持续时间短很多,但其电流可能相当大。因此,制造厂必须考虑这一点。

另外必须考虑避雷器在合闸时的操作冲击能量和可能的再击穿能量。

如果滤波器的基频偏离 50/60 Hz 时,应对避雷器的应用给予足够的重视,因为金属氧化物避雷器的功率损耗随频率的增加而增加。因此,对更高的频率,不得不降低避雷器的持续运行电压 U_c 。如果持续运行电压 U_c 必须要降低,那么避雷器相对的保护水平也将高于正常应用的避雷器。制造厂家必须考虑这一点。

4.6 保护串联补偿电容器组用避雷器

用在保护串联电容器的避雷器通常被称为非线性电阻器,现有的避雷器 IEC 标准不包括该类型试验。对不同的故障情况进行系统研究。因为串联补偿电容器串联在线路中,系统的故障可以导致电容器有不同的电压降。这些非线性电阻器可以单做保护或与旁路间隙做组合保护,一般采用 IEEE 824—2004 和 GB/T 6115.2—2002 进行测试和选择。

5 避雷器的资产管理

5.1 总述

本章讨论与用户使用避雷器相关的内容。它涉及在 GB 11032—2010,GB/T 28182 和 IEC 60099-8 中定义的金氧化合物避雷器。尽管制造厂的例行检查会验证避雷器的制造是否满足生产要求,但若没有遵照制造厂对运输、储存和现场组装的说明,则可能会造成对避雷器产生有害的影响或不能提供最佳的性能。

避雷器的运行环境也会影响性能,因此像环境污染和接地系统的完整性问题需要关注。从运行角度来看,避雷器中没有任何备用和替代的部件,而且从实质上来讲,避雷器在整个寿命周期内都是密封的。本章讨论了无间隙避雷器的状态监测,叙述了诊断技术和影响寿命的因素,不过总的来说,无论何时只要避雷器有故障或显示故障的迹象,一般建议替换整个避雷器。

5.2 避雷器的管理

5.2.1 资产数据库

本节不适用于配电避雷器。

建议建立有关主要信息和技术数据的数据库,这些资料至少应该包含避雷器制造厂和型号,制造年份、安装年份和地点、避雷器的编号和电气参数。

5.2.2 技术参数

涉及系统暂时过电压、能量应力和保护水平的避雷器技术规范应实时更新。

5.2.3 关键备品

故障避雷器可以脱离,且电网也可恢复运行,在未更换避雷器之前电网的可靠性较低。危险性和其影响需要由供电部门加以确定,这里还不能给出建议。

避雷器成本相对较低,但考虑到更换一个避雷器所需的时间,还是值得存放一只避雷器备品。如果避雷器故障或需要更换,该备品可能会对电网的可靠性和有效性有很大的作用。通常,当一相避雷器故障时,无须更换其他两相避雷器。

当决定要有什么备件时,应考虑避雷器的结构尺寸及安装要求。不推荐将不同结构、不同型号及不同保护水平和能量水平的避雷器混用。这一点仍应由供电部门自己确定,因为只有他们才能决定所需的安全裕度。当三相一组避雷器需要同时替换时,如果替换下来的避雷器经试验证实是好的,可以储存起来,万一同一设计的避雷器需要更换时可重新使用。有关检查避雷器状态的诊断方法见附录 D。

5.2.4 运输和存储

应严格遵循制造厂给定的有关运输和存储的注意事项。瓷外套避雷器对运输中出现的机械应力很敏感。对许多避雷器而言,这个应力可能代表在其寿命中的最高机械应力。在大多数情况下规定在运输和存储期间避雷器均为直立状态。

复合外套避雷器对存储条件非常敏感。避雷器按照运输所用的封闭包装方式存储时,外套可能会产生苔藓和真菌,且会持续增长。制造厂通常会给出明确的指示,规定避雷器在存储时是否需要拆除运输包装。仓库应尽量避免有老鼠、鸟类和其他动物进入,因为它们可能损害这些软的有机绝缘材料。

5.2.5 调试

一般而言,避雷器无需调试。如果考虑需要,则应遵循制造厂的意见,并向其寻求有关现场调试试验的咨询。常见的调试试验是参考电压试验、绝缘电阻测量、泄漏电流试验、持续电流试验等,这些试验有助于判断避雷器是否有性能问题,并可作为未来状况评估的基准。试验时需要解开已安装避雷器的高压端子和接地端子,试验后避雷器应重新连接以备运行。这一点对 GIS 避雷器来讲非常困难,因为它首先需要收气以断开避雷器,然后又要给避雷器充气进行试验。试验后还要重复上述的工作并重新连接避雷器。因此,通常不要求进行以上的调试试验。

注:在测试后应检查接地和高压连接是否已经恢复。

5.3 维护

避雷器基本上是免维护的。没有必需的解体性维护工作,主要是因为该设备是一个密封的固定结构,没有运动部件。

对于额定电压 100 kV 及以上的避雷器,可能的日常工作包括目视检查,以确保压力释放喷口清洁、无碎片,喷口内无积水(通常,此处应该有排水孔)。水分渗入是导致密封长期劣化的主要原因。

检查与避雷器相连的接地系统的完整性,如果已经损坏,避雷器可能无法履行其功能。

不用进行解体维护,但是对于瓷外套避雷器外绝缘表面可能需要清洁,但清洁频率取决于环境条件。复合外套避雷器外绝缘表面不需要清扫。如果需要的话,可用一些在线或离线测试技术进行状态评估。

一般的维护工作可能包括:

- 安装的计数器的测试;
- 避雷器本体外观检查;
- 确认高压端和接地端连线完好;
- 需要时对瓷外套表面清扫或重新涂脂。

应该检查所有防晕环和均压环,因为这些零部件失效会损坏避雷器,或者会产生电晕,这将引起复合绝缘性能劣化。

一旦避雷器故障或者显示出任何故障的迹象,整个避雷器必须更换。

5.3.1 避雷器外套污秽

避雷器外套污秽可能会导致避雷器内部电阻片温度增加进而形成内部击穿或者直接造成外部闪络。为防止污秽地区的故障,必须选择能够承受该污秽条件的避雷器。虽然没有在 GB 11032—2010 中明确,在正常环境条件下避雷器应能耐受依据 GB/T 311.2 的 II 级污染水平,但是国内通常的做法是,对于用于 I 级和 II 级污秽区的避雷器而言,通常只需检查避雷器的爬电比距能否满足要求即可。但是如果避雷器是安装于重(污秽 III 级)或特重(污秽 IV 级)污秽地区,避雷器则必须通过人工污秽试验来验证避雷器的耐污秽能力,GB 11032—2010 的附录 F 和附录 O 介绍了两种不同的人工污秽试验方法,供需双方可依据不同的要求加以选用。如果耐污能力设计不足的避雷器用于重(污秽 III 级)或特重(污秽 IV 级)污秽地区,定期清扫或涂脂也可以有效防止上述事件。若允许带电清洗时,避雷器的设计结构必需符合相应的运行条件。

复合外套避雷器一般不要求清扫,但应经常检查避雷器各元件伞裙下的干带痕迹,因为这些地方可能会产生漏电起痕。

当规定避雷器带电清洗时,应咨询有关专家。由于避雷器无内部串联间隙放电问题,带电清洗比较容易。不过进行带电清洗时,要注意安全上的经验和实践。与绝缘子清洗相比,要特别考虑电阻片发热的危险。

5.3.2 避雷器外套的涂层

瓷外套避雷器外套采用权宜性的临时性涂层是可以的,但不是首选。首先应选择正确的爬电距离,以避免涂层。然而,如果安装后情况有变,它可能需要涂层。硅脂和 RTV 室温硫化硅橡胶是瓷外套表面最常见的涂层,避雷器使用涂层无需特殊考虑。

5.3.3 脱离器的检查

脱离器主要用于线路避雷器和配电避雷器。脱离器是否脱离需要定期检查。在现场往往不容易确定脱离器的动作是否正确。如果脱离器动作,应检查确认避雷器是否完好。如果避雷器完好,则属于脱离器误动作,从技术的角度讲更换脱离器后避雷器可以继续使用。

5.3.4 线路避雷器

现场检查可以使用热成像,但只限于无间隙线路避雷器(NGLA)。对于带间隙线路避雷器(EGLA),目测也是一种选择,目测检查主要针对间隙和本体结构的完整性。

5.4 性能和诊断工具

为了评估避雷器性能的劣化或损坏,可以采用多种方法。

配网避雷器最简单的诊断方法是使用表明避雷器损坏的故障指示器和脱离器,当然也可以使用站用避雷器的诊断方法进行进一步的测量判断。

对于无间隙的避雷器而言,通常的性能诊断方法有直流法和交流法两大类。直流法主要是测量避雷器的直流参考电压及其 0.75 倍直流参考电压下的漏电流,避雷器的劣化(受潮或/和电阻片老化等)均可以通过直流参考电压下降和/或 0.75 倍直流参考电压下的漏电流的增加加以反映。交流法是使用可以测量金属氧化物避雷器阻性电流或功率损耗微小变化的专用仪器测量避雷器的阻性电流、全电流以及功耗等,阻性电流和功耗的增加将意味着避雷器的可能出现了劣化。

关于运行中的避雷器的这些相关问题将在附录 C 中加以详细讨论。

5.5 寿命终结

对避雷器寿命终结的判断是主观的,因为在许多情况下,避雷器出现故障是很突然的。避雷器的功能是为了保护其他设备,然而,如果它失效,那么其应用则毫无意义。因此,避雷器的寿命时间应从避雷器功能的角度及涉及其耐受能力方面出发加以考虑,然后,再考虑是否用新的避雷器元件替换。电力公司通常将主要设备的经济寿命与其他变电站设备相配合,避雷器的寿命时间可能在 20 年~50 年之间变化。电力公司根据经济和技术因素确定适当的避雷器更换间隔时间。评估标准应该考虑在内,例行更换是可行的,因为避雷器不需要解体维护或者大修,而且能够避免更换其他贵重设备(例如 GIS,电力变压器等)的昂贵代价。

从技术层面上看,假设避雷器电阻片并没有过负荷,那么由功能元件决定的寿命可以很长。但是,外套和密封性更有可能是寿命的决定因素。

对于空心筒式结构避雷器(瓷套式和复合外套 A 型),当密封系统已经劣化到一定程度,不再能将功能元件与外部大气条件相隔离,湿气渗入弱化了避雷器功能元件组的绝缘强度。与密封性有关的可靠寿命大约在 20 年~30 年。运行工况和气候环境也对避雷器是否能够达到预期寿命有很大的影响。

复合外套避雷器仍然是比较新的避雷器种类,寿命仍然需要评估。

5.5.1 GIS 避雷器

GIS 避雷器的元件由于是封闭在充有 SF₆ 气体的罐体内,认为寿命应该可以超过 30 年。

5.6 处理和循环使用

应用户的要求,每家厂商都应提供足够的资料,以便所有的避雷器部件都可以按国际和国家标准废弃和/或回收。在 SF₆ 气体内运行的元件,当出现漏电起痕或电弧时应仔细处理,特别是 SF₆ 击穿时会造成污染物。

用于夹紧避雷器电阻片的支撑件有一定的应力,所以当将其从避雷器外壳内拿出来和处理时,应谨慎。

附录 A
(资料性附录)

确定由于接地故障产生的暂态过电压的方法

接地故障因数 k 是在接地故障(在任意点的单相或多相)时,在某一特定点健全相的最高工频相电压有效值与无故障时工频相电压有效值之比(参见 GB 311.1)。

接地故障因数可通过正序、负序、零序复阻抗 Z_1 、 Z_2 、 Z_0 ,同时考虑故障电阻 R 进行计算,阻抗的表示式为:

$Z_1 = Z_2 = R_1 + jX_1$:系统的正序和负序电阻和感抗;

$Z_0 = R_0 + jX_0$:系统的零序电阻和感抗

所计算的是故障点的故障因素。

注:应该注意,在扩展的谐振接地网络中,在其他点的接地故障因数可能会高于故障点的。

图 A.1 给出了当 $R_1 \ll X_1$ 且 $R_1 = 0$ 时的全部情况。

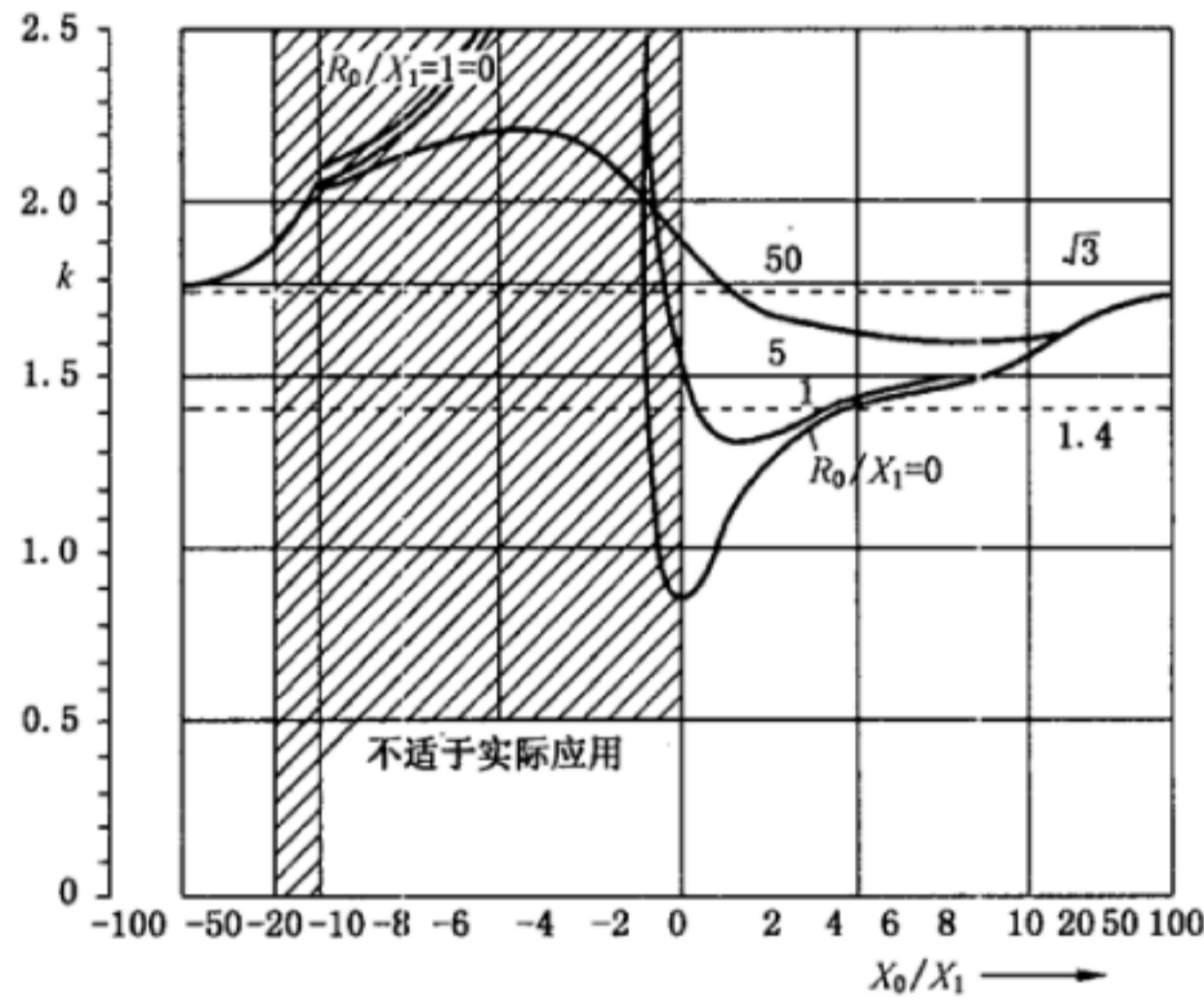


图 A.1 接地故障因数 k 与 X_0/X_1 的关系 ($R_1/X_1 = R_1 = 0$)

对 X_0/X_1 值(正或负)很高的区域,适用于中性点谐振接地和中性点不接地系统。

X_0/X_1 值(正)低的区域,适用于中性点接地系统。

X_0/X_1 为负的低值范围(如阴影部分),由于谐振条件,不适合于实际应用。

对中性点有效接地系统,图 A.2~图 A.5 给出了适用于 R_1/X_1 在特殊值情况下的接地故障因数的曲线族。

这些曲线适用于给出最大接地故障系数的故障电阻值。

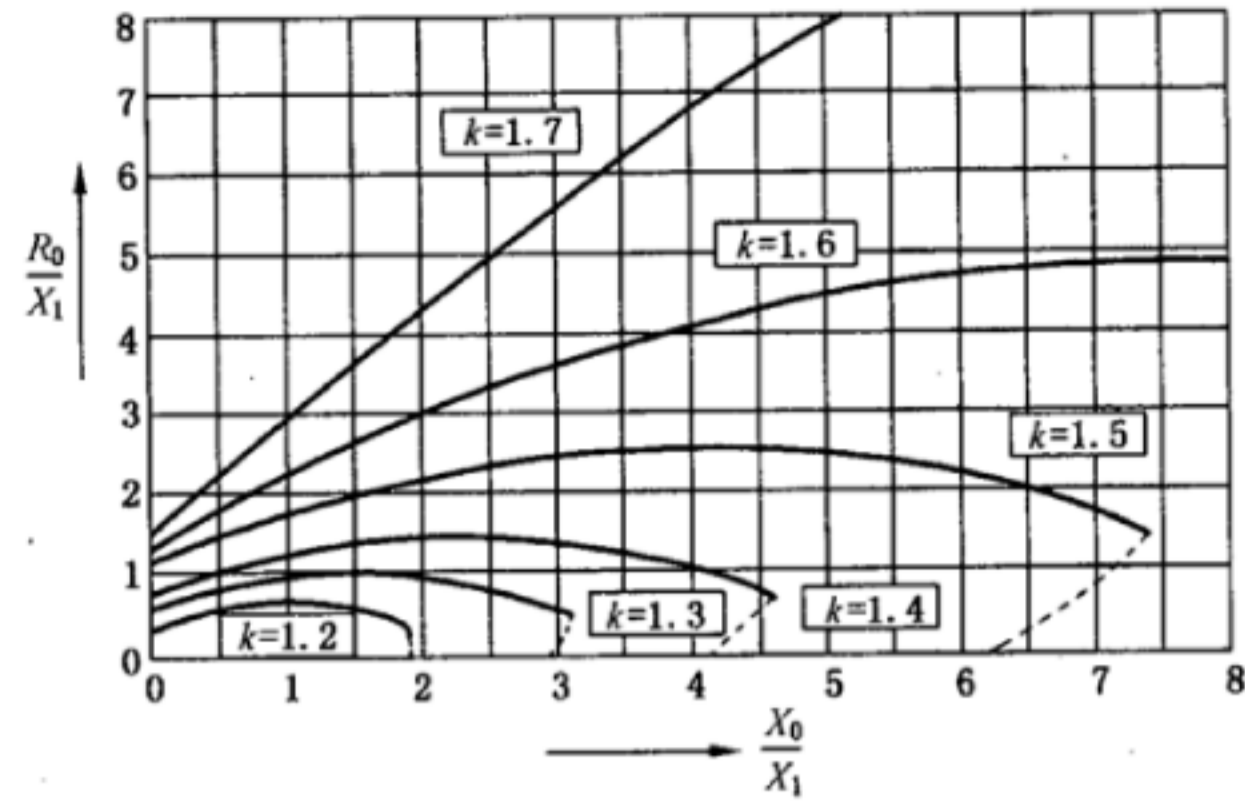


图 A.2 接地故障因数 k 为不同常数下, R_0/X_1 与 X_0/X_1 之间关系 ($R_1=0$)

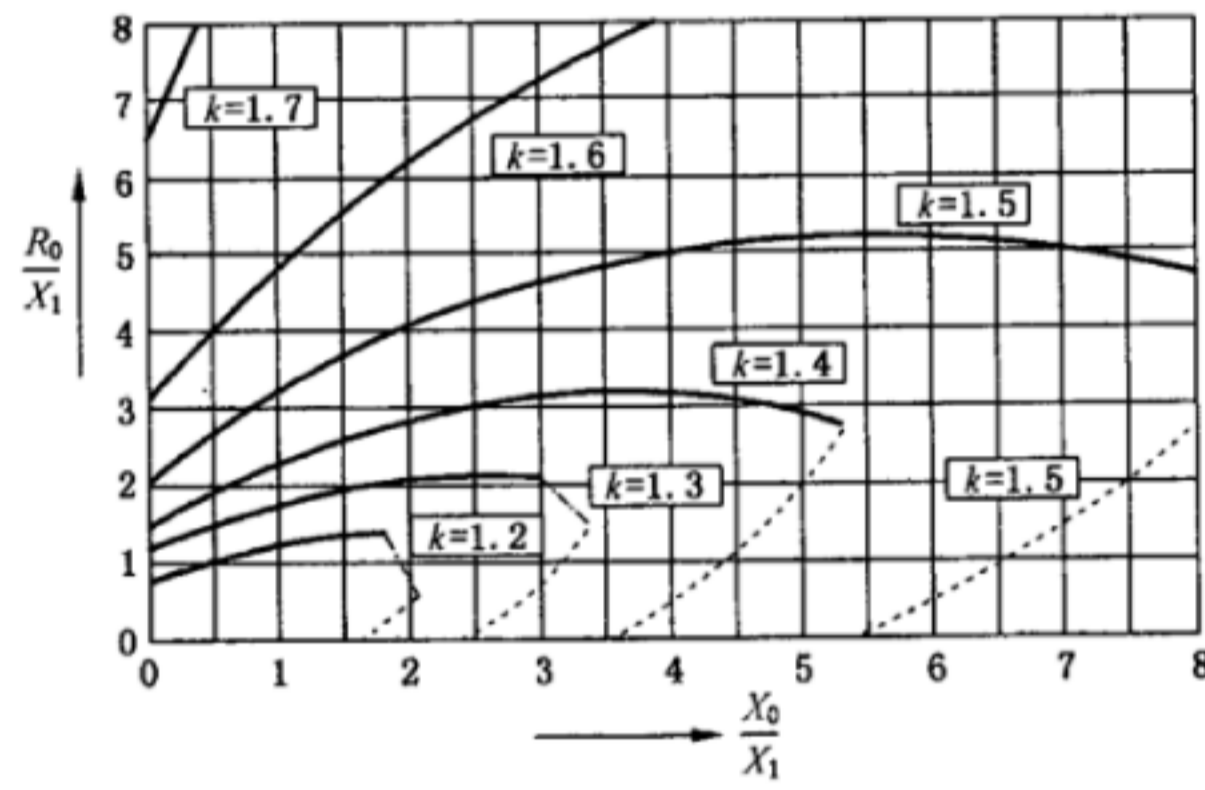


图 A.3 接地故障因数 k 为不同常数下, R_0/X_1 与 X_0/X_1 之间的关系 ($R_1=0.5X_1$)

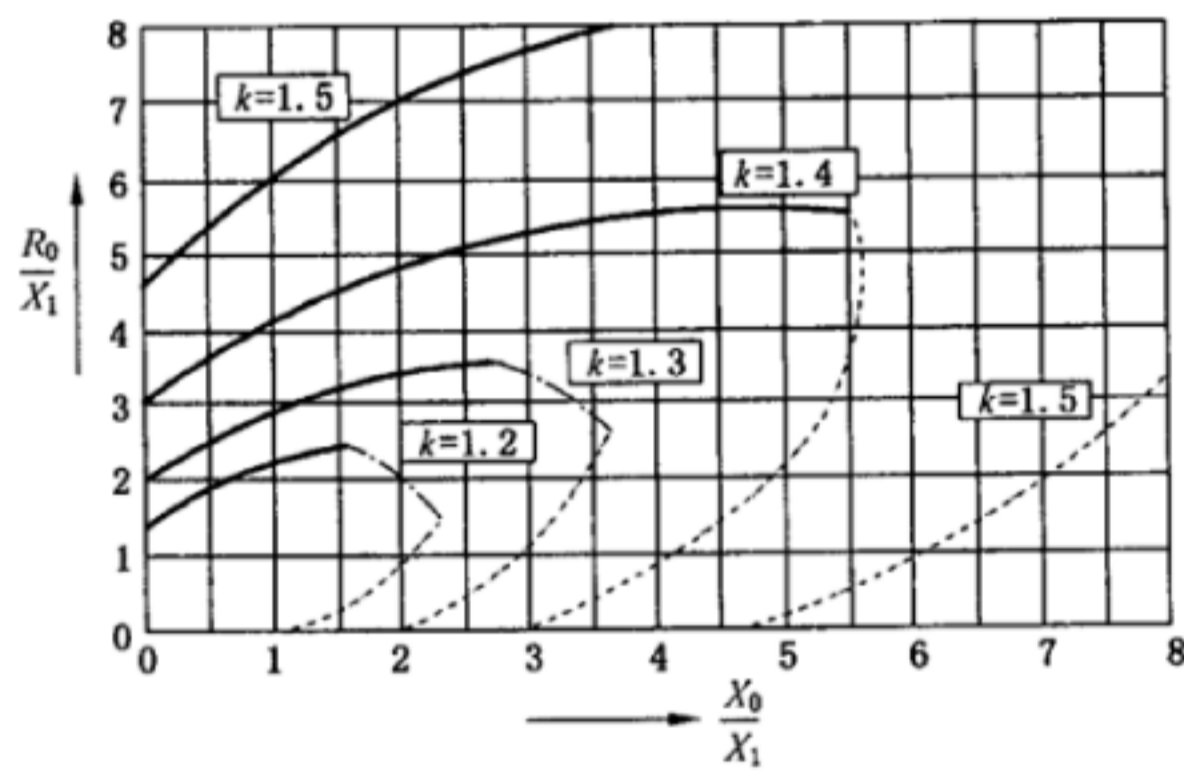


图 A.4 接地故障因数 k 为不同常数下, R_0/X_1 与 X_0/X_1 之间的关系 ($R_1=X_1$)

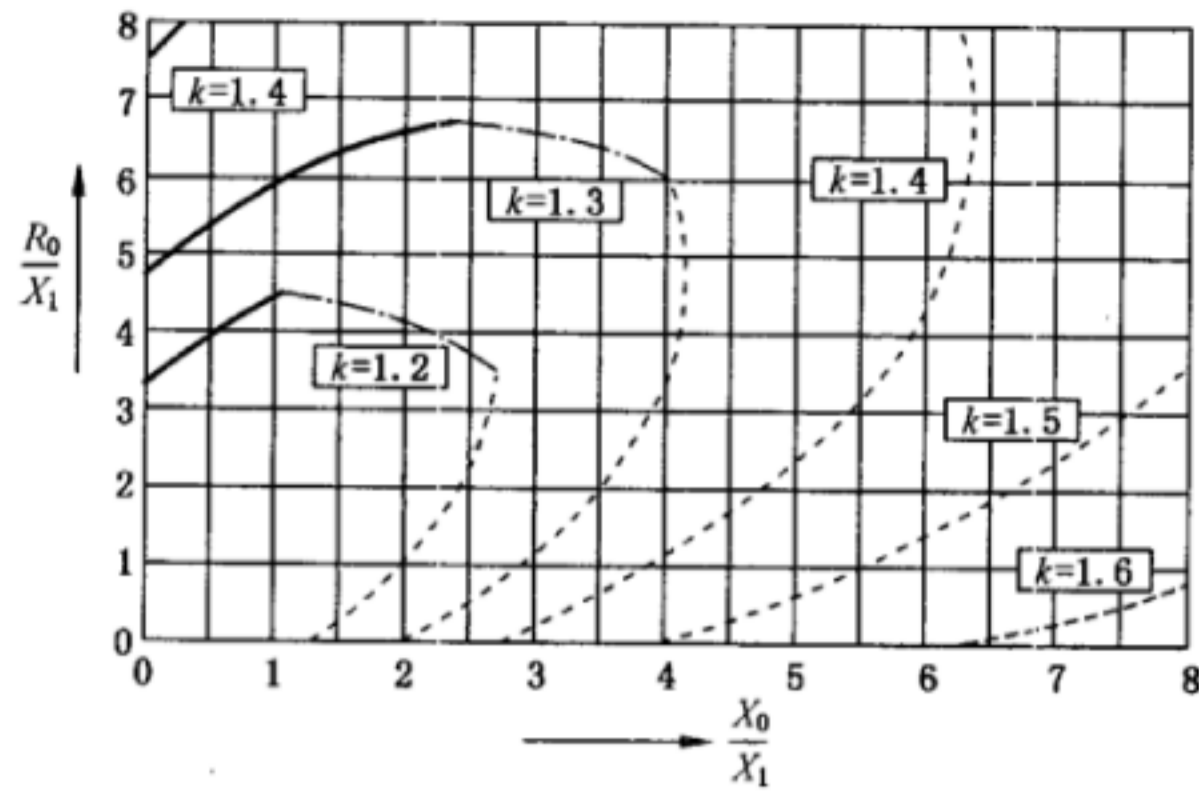


图 A.5 接地故障因数 k 为不同常数下, R_0/X_1 与 X_0/X_1 之间的关系 ($R_1 = 2X_1$)

在图 A.2~图 A.5 中, 曲线按下列表示划分代表最严酷条件的区域:

- 在相对地故障下, 相位超前于故障相的相上出现的最大电压值;
- 在相对地故障下, 相位滞后于故障相的相上出现的最大电压值;
- 在相对地故障下, 非故障相上出现的最大电压值。

附录 B

(资料性附录)

研究绝缘配合和能量要求用的避雷器模拟技术

非线性金属氧化物电阻的残压会随着冲击电流的陡度增加而增大。典型例子是一个幅值为 10 kA 波头时间为 $1 \mu\text{s}$ 的冲击电流的残压会比相同幅值但波头时间为 $8 \mu\text{s}$ 的冲击电流的残压高 5%~10%。整只避雷器的残压应该是避雷器内所有电阻元件的残压的总和。但是,当在电流通道中测量任何对象上的电压时,测量电路将会产生一个闭合磁通,测得的电压将是试品内部电阻和电流乘积的电压,以及由包含试品和用于测量电压的连线组成封闭环的闭合磁通所衍生的电压的和。

这也意味着,对于极快速陡波冲击电流,如果电压测量紧靠试品,或者通过连线连接试品而导致较大的闭环而产生较大的磁通,这样电压测量结果将会差别很大。等值电感可以定义为与测量封闭环所交链的磁通除以电流。而磁通则是与试品和测量回路组成的封闭环所交链的磁势矢量的线积分。针对一定数量的导体,依据不同导体半径和与导体不同的距离,如图 B.1 所示,计算了其等值电感,见表 B.1。

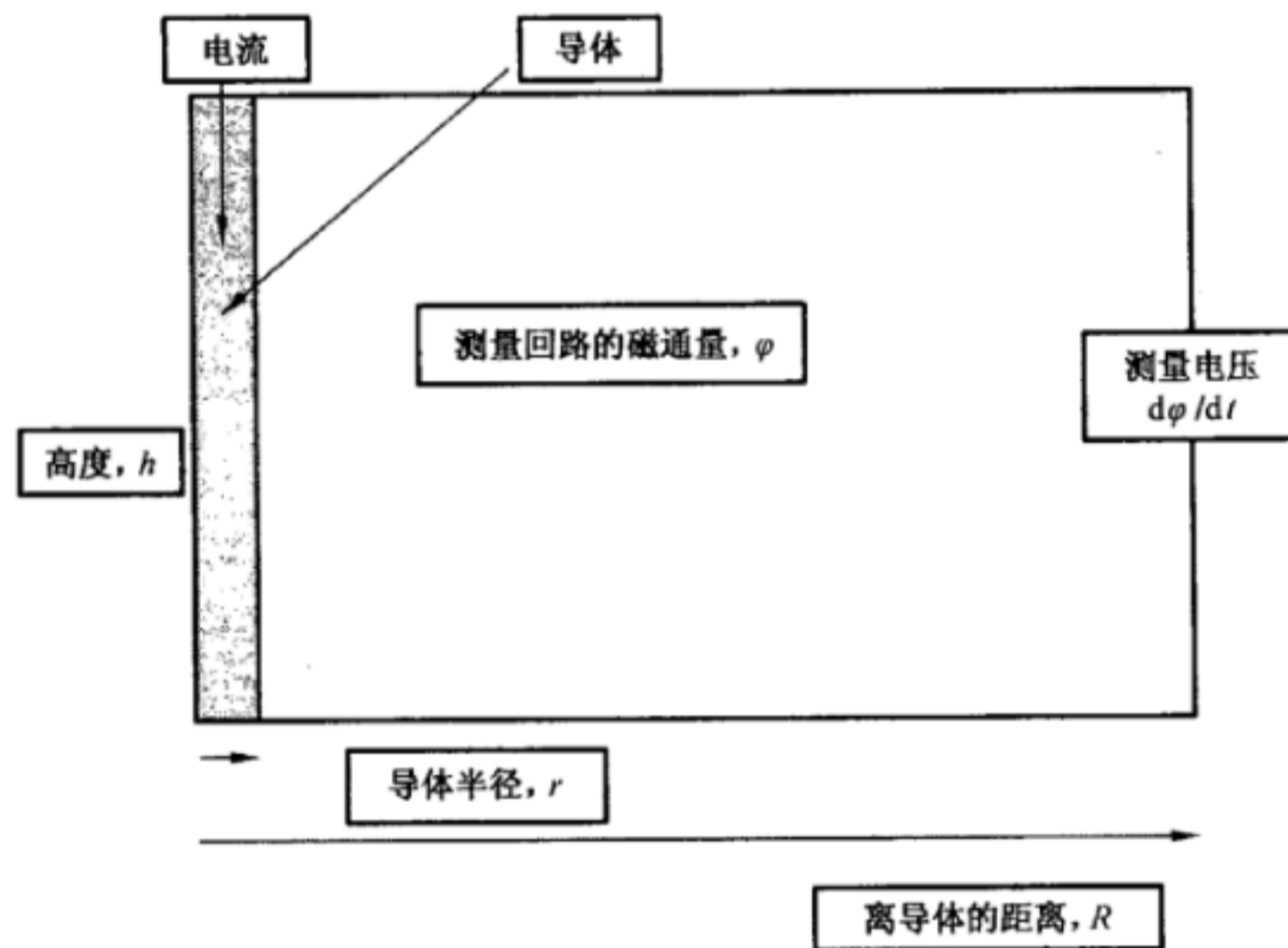


图 B.1 避雷器电压测量环等值电路

表 B.1 垂直圆柱体的计算等效电感

圆柱体的垂直高度(h) m	圆柱体半径(r) m	到圆柱体的水平距离(R) m	等效电感 $\mu\text{H}/\text{m}$
1.0	0.01	0.5	0.7
1.0	0.01	20	0.86
3.0	0.01	0.5	0.75
3.0	0.01	20	1.1
9.0	0.01	0.5	0.77
9.0	0.01	20	1.3
1.0	0.04	0.5	0.43
1.0	0.04	20	0.59

表 B.1 (续)

圆柱体的垂直高度(h) m	圆柱体半径(r) m	到圆柱体的水平距离(R) m	等效电感 $\mu\text{H}/\text{m}$
3.0	0.04	0.5	0.48
3.0	0.04	20	0.79
9.0	0.04	0.5	0.5
9.0	0.04	20	0.98

结果清楚表明,“电感”是一个相当复杂的参数。它是通过电流的试品的半径、高度以及到试品距离的函数。

对于非线性金属氧化物电阻片和 8/20、10 kA 冲击电流或 30/60 μs 冲击电流,对电压测量磁场的影响并不很大。但对于波前时间仅为 1 μs 的陡波冲击电流,测得的电压会显著受电压测量回路布置影响。这当然不是一个想得到的结果,因为这结果毫无意义,而且出于绝缘配合目的也可能是无用的。它或许只能适用于此特定的电流幅值和波形。因此,在对非线性电阻做陡波电流试验时,大多数制造商试着减少或消除磁通量的影响。在这种情况下,所得到的值只会是材料的响应。因此可以针对任一幅值和波形,通过增加基于避雷器的实际安装所加的等效电感,很容易获得整只避雷器的最终保护效果。

因此,出于绝缘配合目的,必须采用避雷器的等效模型。该模型必须考虑到由于电流陡度的作用和“电感”效应而引起的残压的提高。如上所述,避雷器的“电感”并不是一个常数。但是,出于绝缘配合研究的目的,对于 AIS,广泛采用按避雷器高度 1 $\mu\text{H}/\text{m}$ 这一保守的数字。此同样的每单位长度电感值也推荐采用于任何连接引线。当避雷器非常靠近被保护设备($<0.5\text{ m}$)时,建议每单位长度的电感取一半,即 0.5 $\mu\text{H}/\text{m}$ 比较合适。对于 GIS 避雷器,由于同轴结构,此值较小,建议每单位长度的电感取 0.3 $\mu\text{H}/\text{m}$ 。对于特别情况,可能需要精确计算。

对于绝缘配合研究,包括陡波,建议采用不同的模型来考虑由于电流波形、陡度以及避雷器电感和引线电感对残压的增加。但非常复杂的是以比较精细的方式模拟 ZnO 材料的响应。因此至今还未建立起很精确的模型,此处建议一个实际应用的简化方法。第一步计算所采用的避雷器模型是避雷器 8/20 μs 的 $U-I$ 特性,再加上避雷器高度和连接引线 1 $\mu\text{H}/\text{m}$ 的电感以检验流经避雷器电流的陡度的影响。然后,根据已定的电流陡度,对最初用的特性做相应调整,再做进一步计算,以此类推。残压随电流视在波前时间减小而增加的典型关系见图 B.2。注意,残压增加的前提条件是电流幅值不变。

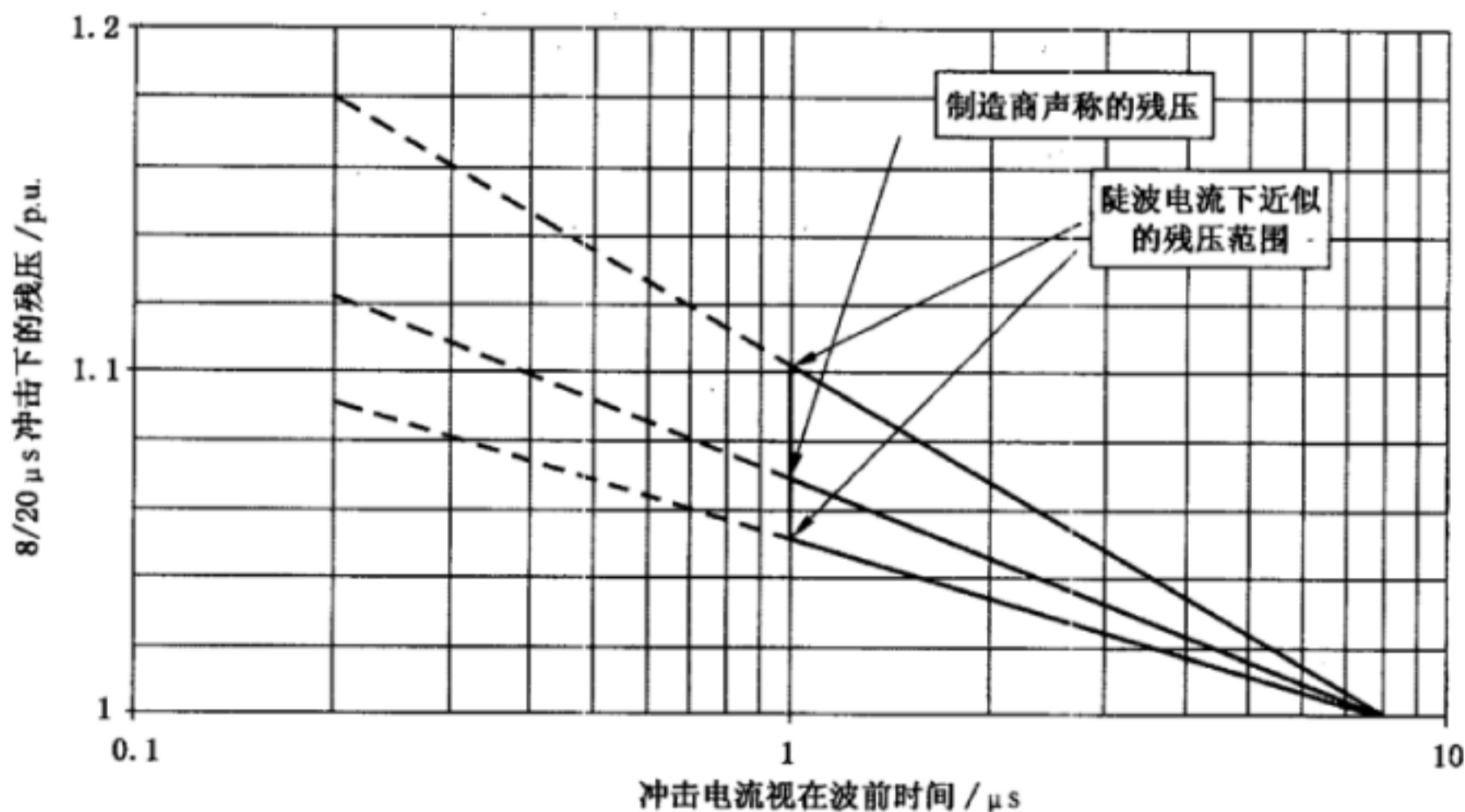


图 B.2 残压随电流视在波前时间减小而增加

注意,这仅仅是材料的响应,而非电感效应。此外,小于 $1\ \mu\text{s}$ 数据仅表示估计的趋势。当需要更准确的值时,应咨询制造厂。

通常,确定避雷器保护水平的典型冲击电流,包括波前时间大约为 $1\ \mu\text{s}$ 的波形。因此,第一步应该选择按比 8/20 残压特性值高 $5\%\sim 10\%$ 的特性进行计算。然后,根据此得到的电流陡度,对最初用的特性做相应调整,再做进一步计算,以此类推。对于绝缘配合,最大的残压特性是重要的。然而,当计算避雷器吸收操作波电流的能量时,通常较高的能量对应于较低的残压特性。对于这些研究,应采用最小的残压特性。作为近似,如果没有更准确可利用的信息,取比制造厂给定最大残压小 $5\%\sim 10\%$ 的低残压特性。而对雷电冲击相关能量,则相反,因为这种情况的电源通常被看成是电流源,所以,避雷器的最大残压特性对应于最高能量。若做操作波研究时,应采用避雷器 30/60 的 $U-I$ 特性,通常无需计及避雷器高度和连接引线的长度,因为可忽略缓波前串联电感的效应。

作为总结,在图 B.3~图 B.5 所示的下列模型建议用在冲击电流条件下。

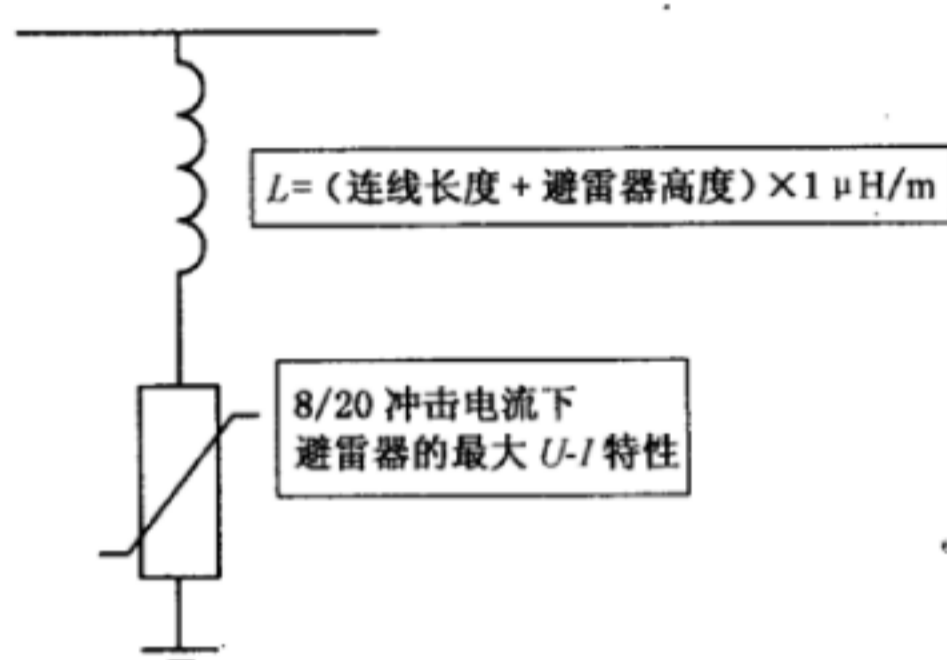


图 B.3 绝缘配合分析用避雷器模型——快波前过电压和预计算(选择 1)

冲击电流的陡度(视在波前时间)取决于初步计算。然后 $U-I$ 特性得到相应调整,再重复计算。

注:对于 GIS 避雷器,电感规定约为 $0.3\ \mu\text{H/m}$ 。

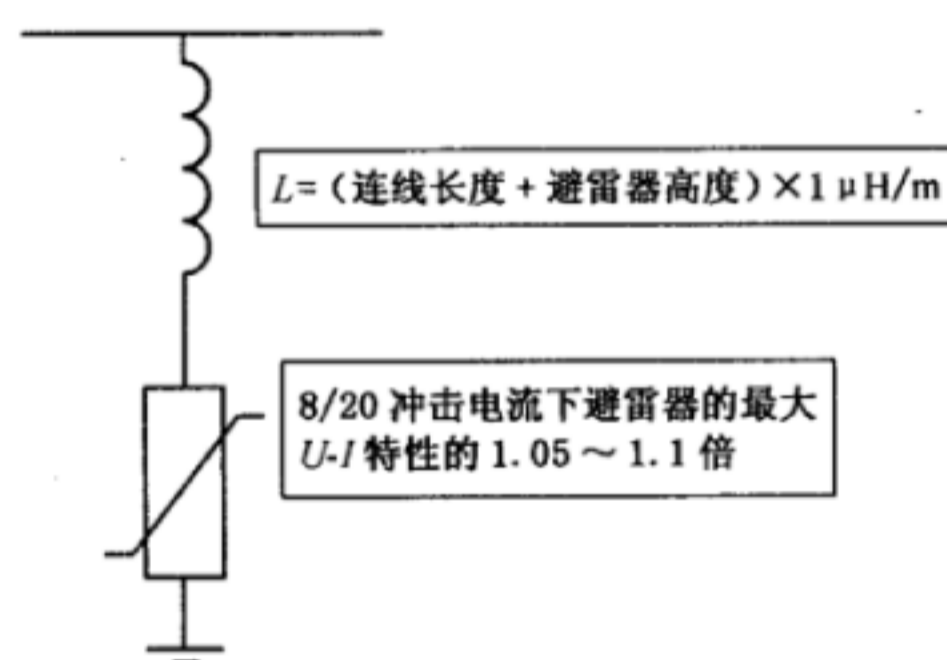


图 B.4 绝缘配合分析用避雷器模型——快波前过电压和预计算(选择 2)

冲击电流的陡度(视在波前时间)取决于初步计算。然后 $U-I$ 特性得到相应调整,再重复计算。

注:对于 GIS 避雷器,电感规定为 $0.3\ \mu\text{H/m}$ 。

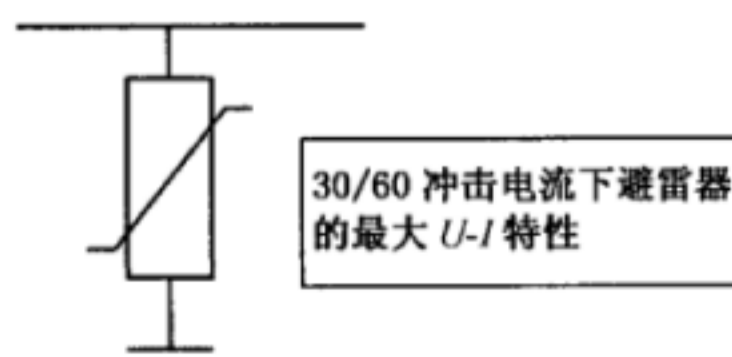


图 B.5 绝缘配合分析用避雷器模型——缓波前过电压

为了研究避雷器的能量强度,用一个估计的最小特性来代替最大特性。

附录 C

(资料性附录)

运行中金属氧化物避雷器的诊断

C.1 概述

自从使用避雷器以来,已经有许多不同的显示装置和诊断方法开发出来。诊断装置有两类:一类是显示整个避雷器故障的指示器和脱离器;另一类是测量避雷器阻性电流(或功耗)变化的仪器。

C.1.1 故障指示器

故障指示器动作后,会给出一个明显的标志,表明避雷器已经发生故障,但避雷器不脱离电网运行。

指示器可以与 MOA 一体,也可以分开。指示器的动作原理有两种:第一种,根据流过 MOA 电流的大小和持续时间长短;第二种,根据 MOA 电阻片温度的高低。

C.1.2 脱离器

脱离器动作后,将避雷器与电网脱离,并给出一个明显的标志。脱离器有热熔式和热爆式两种。

C.1.3 放电计数器

当流过放电计数器的电流超过规定时动作(是电流大小和时间长短的组合);如果两次电流的时间间隔极短,计数器不一定正确动作。

为了安全起见,计数器应该安装在人不易接触,但又能在运行中方便读数的地方;计数器的接地线要尽可能短,截面积要足够大。

C.1.4 监测火花间隙

监测火花间隙可显示通过避雷器电流的次数并估算电流幅值,解释间隙上的标记需要丰富的经验。

有些火花间隙可以在避雷器运行时进行检查,而另一类就需要避雷器停电后测量。这要求避雷器装备的接地端子有足够的冲击耐受电压。另外,该设备可以与避雷器安装在一起,火花间隙不能直接给出避雷器的实际状态,但有助于判断是否可继续使用。

注:在我国很少见。

C.1.5 温度测量

利用热像仪可以远距离测量运行中避雷器的温度。可通过与邻近运行避雷器的比较测量来判断避雷器是否过热。

直接测量金属氧化物电阻温度可以精确地指示避雷器的状态。但是,它需要避雷器装有专用的变换器。因此,此种方法仅能应用于特殊的避雷器上。

C.1.6 金属氧化物电阻片全电流的特性

交流全电流分为容性电流和阻性电流,容性电流较大,阻性电流较小,图 C.1 显示的是一金属氧化物电阻片在持续运行电压 U_c 时在实验室测得的全电流。图 C.2 所示的是稍低于 U_c 而且谐波含量不同,两种不同避雷器的全电流测量结果。

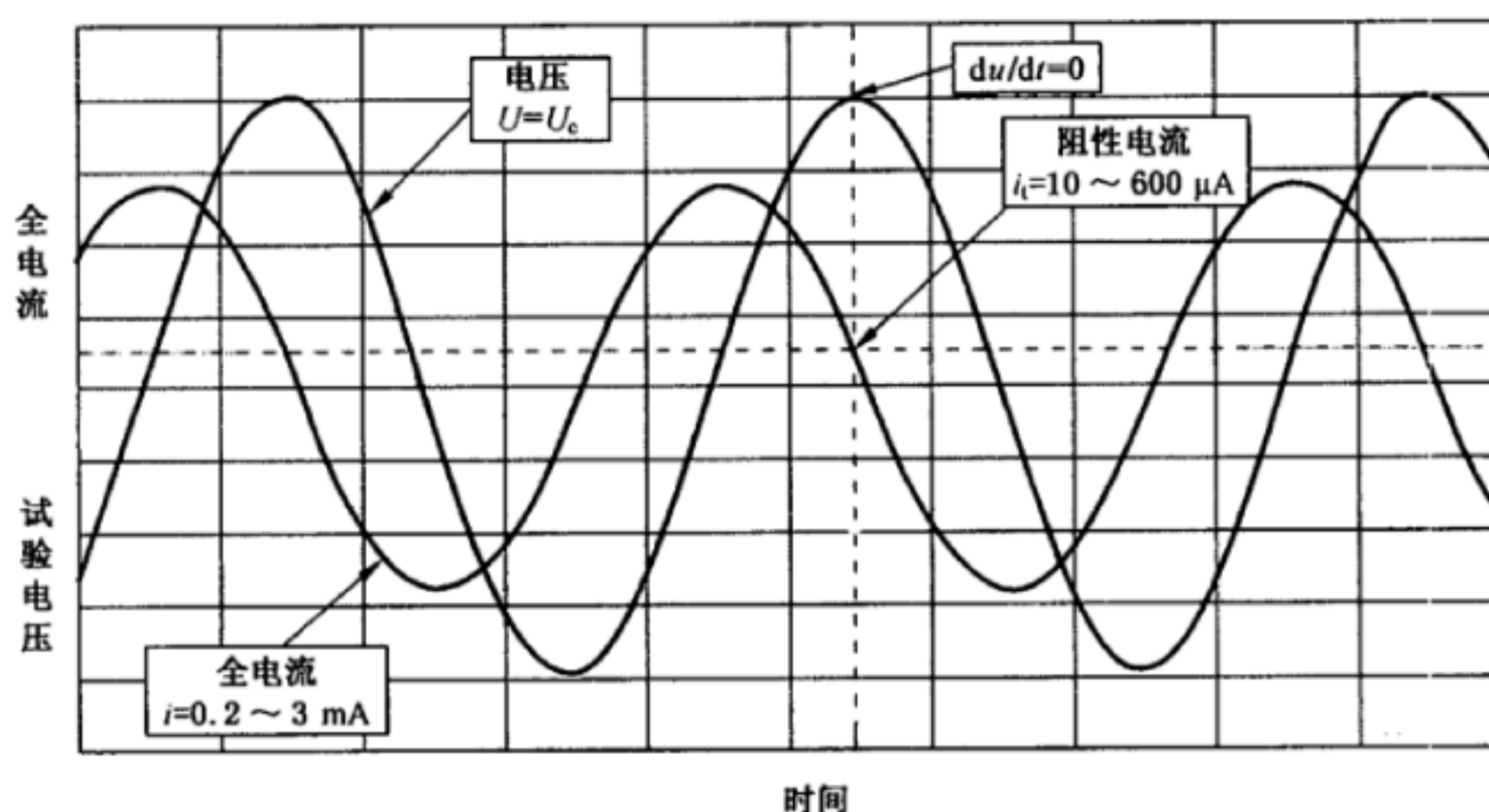


图 C.1 在实验室条件下金属氧化物电阻的典型全电流

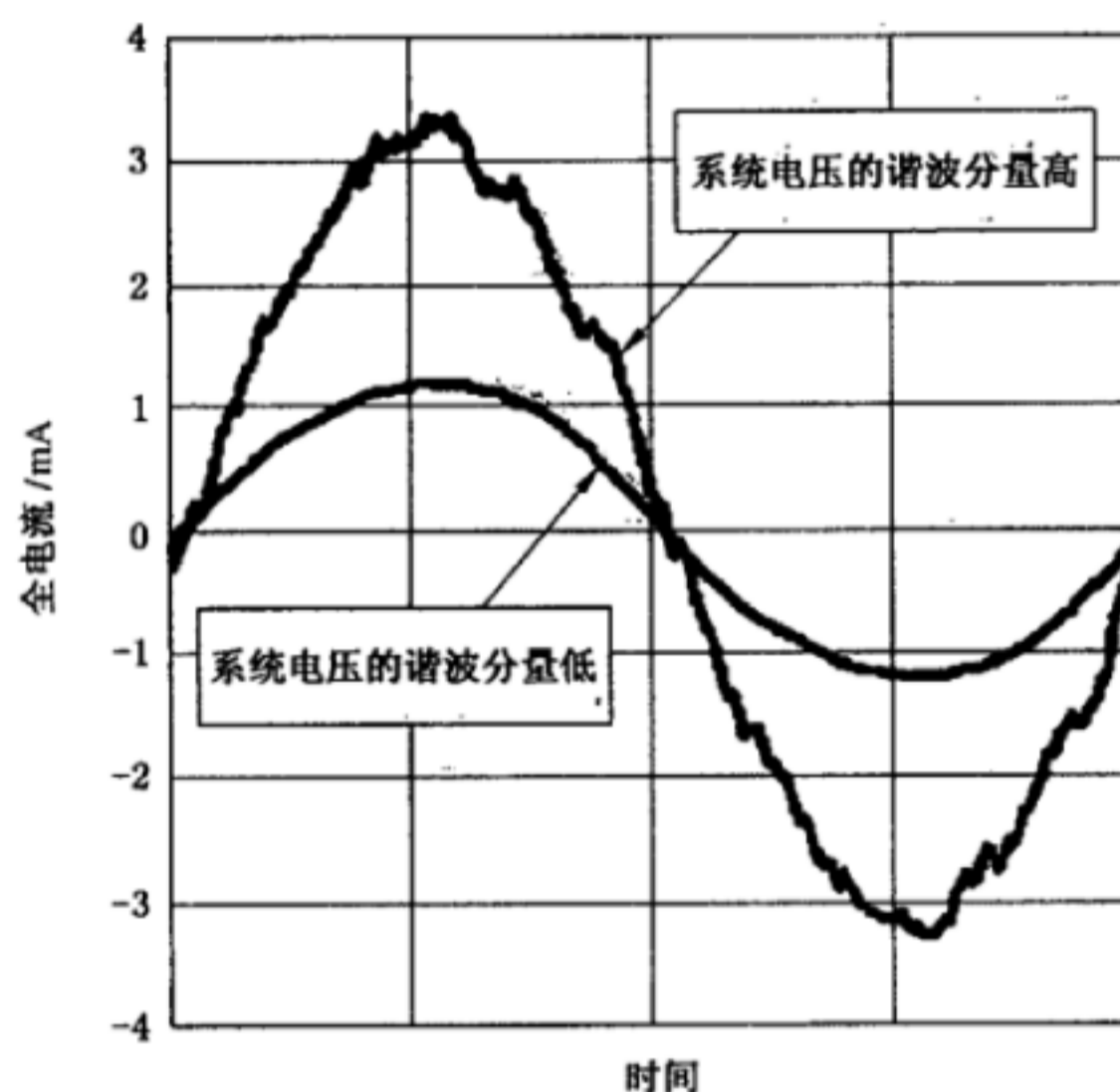


图 C.2 避雷器典型全电流

C.1.6.1 容性电流

在避雷器接地端测得的容性电流是由金属氧化物电阻片的自身电容、杂散电容和均压电容(如果使用)共同作用所产生的。金属氧化物电阻片的电容与电压和温度有轻微的关系。

没有证据说明由于金属氧化物电阻片的伏安特性劣化导致容性电流发生了变化,因此,容性电流不能说明金属氧化物避雷器的状态。

C.1.6.2 阻性电流

在一定电压和温度下,MOA 的阻性电流与金属氧化物电阻的伏安特性有很大的关系。当 MOA 老化或受潮时,小电流伏安特性曲线会右移,即阻性电流变大;因此,可以把阻性电流作为诊断运行中的金属氧化物避雷器状态变化的特征量。图 C.3 显示在交流电压下典型的阻性和容性伏安特性。为比较,图 C.3 也显示了直流电压下的典型特性。

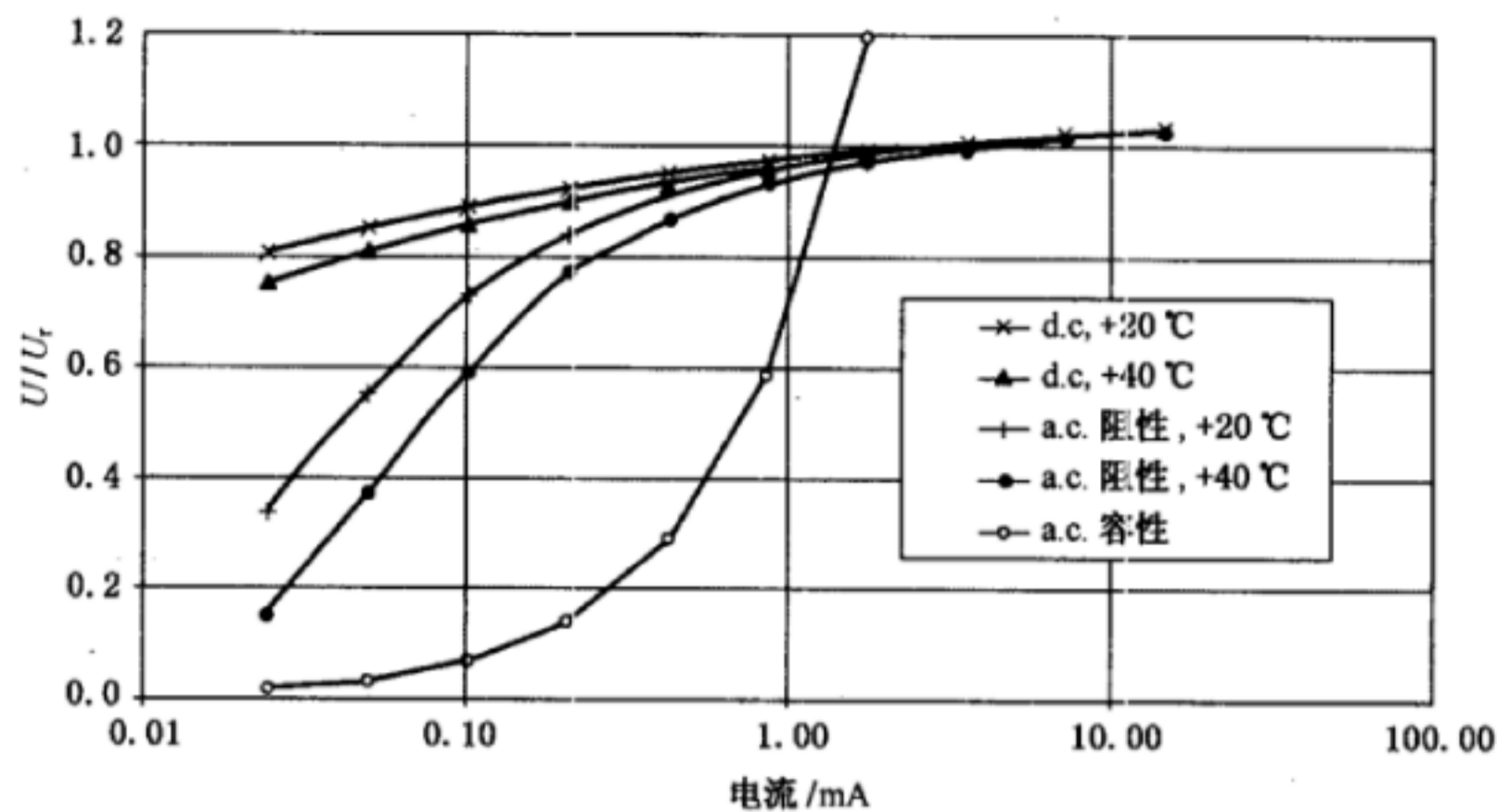


图 C.3 金属氧化物电阻片的典型电压电流特性

交流电压下阻性电流定义为瞬时电压最大时的电流值($du/dt=0$ 时)如图 C.1 所示,在正常工作状态下金属氧化物电阻的阻性电流一般为容性电流的 5%~20%,相对应在 20℃ 下大约为 $10\ \mu\text{A}$ ~ $600\ \mu\text{A}$ 。

在小电流区域电阻片的阻值呈现负温度系数,即电压不变,温度上升阻值变小(阻性电流变大)。

C.1.6.3 全电流中的谐波

当避雷器在正弦电压作用下,由于避雷器电阻片的非线性伏安特性在全电流中会含有谐波,其谐波分量的大小与电阻片的非线性程度有关。例如:阻性电流中三次谐波的含量为 10%~40%。因此,谐波含量可用于表征阻性电流的大小。

另外,系统电压中的谐波也能影响全电流谐波的测量,电压谐波产生的容性谐波电流可能与避雷器的非线性电阻产生的谐波电流的幅值处同一数量级。图 C.2 为系统电压谐波产生的全电流中的谐波的例子。

C.1.6.4 功耗

和阻性电流一样,也可以用功耗来表征避雷器的运行状态。

C.1.7 外表面泄漏电流

在雨天或湿度较大时,瓷外套或复合外套的表面污秽会形成表面泄漏电流,该电流是阻性电流。若避雷器是由一个避雷器节构成的,则会不同程度地改变避雷器原来的电压分布,即使在避雷器下部用集电环将表面泄漏电流直接引入地中,避雷器底部阻性电流的测量值仍可能改变;若避雷器是由两个(或更多)避雷器节串联构成的,除了上述影响,还应考虑到,在两个避雷器节的法兰联接处,避雷器原来的电流与表面漏泄电流交汇并重新分配,情况更为复杂。

C.2 全电流的测量

由于容性电流较大,阻性电流较小,而且容性电流基波和阻性电流基波相差 90° 的相角。因此,全电流主要与容性电流有关。当阻性电流发生很大的增长才能观察到整个全电流值的变化。全电流的大小受到周围带电体及接地体的影响。

全电流的在线监测可以用监测器,也可以用便携式仪器来测量。图 C.4 说明阻性电流的增加对全电流的影响。

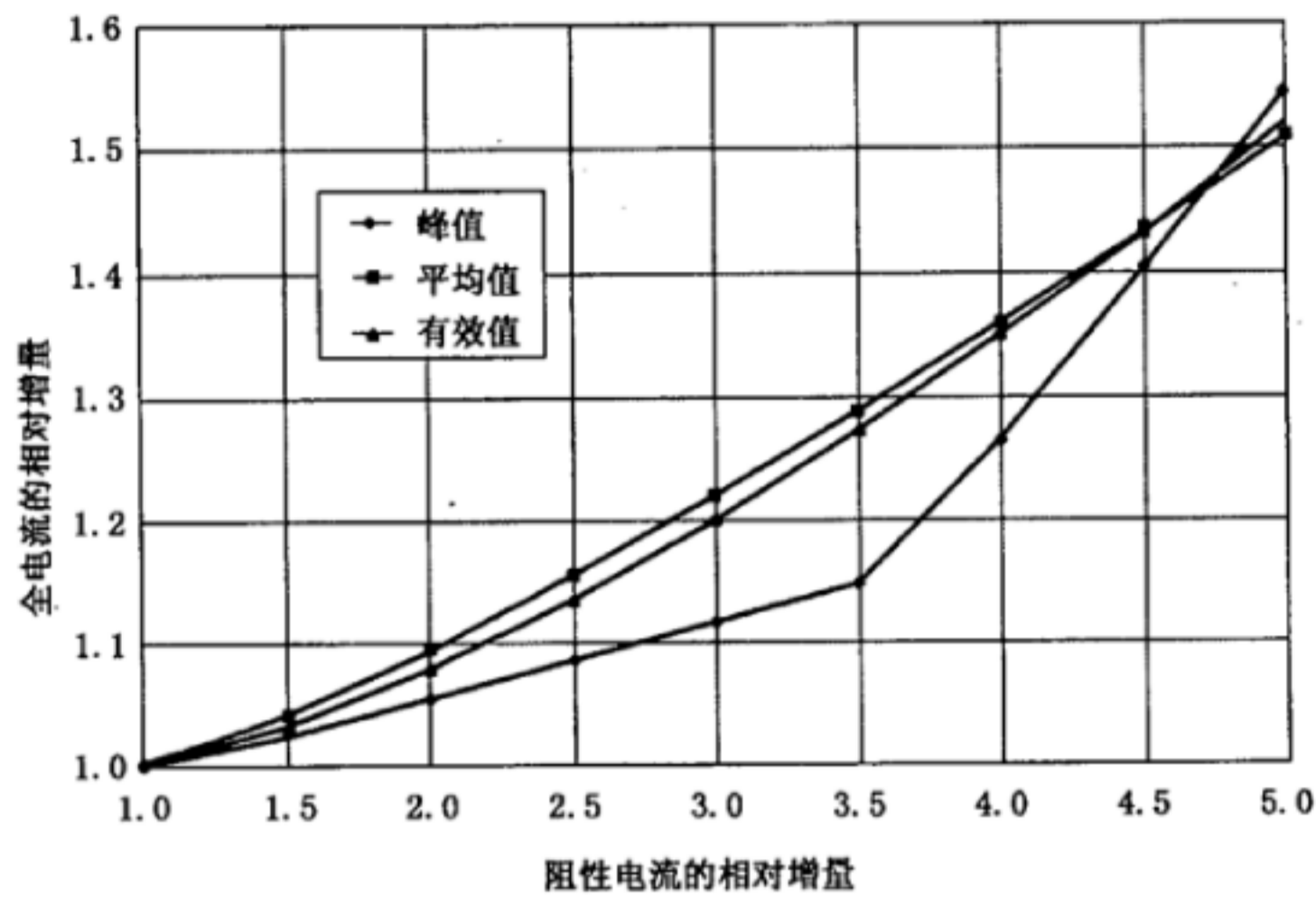


图 C.4 阻性电流的增加对全电流的影响

C.3 阻性电流的测量

C.3.1 阻性电流基波测量

提出测量阻性电流基波的理由:a) 理论方面:MOA 在正弦波电压作用下,只有阻性电流基波 I_{R1} 是作功的;

b) 工程方面:只要作用在 MOA 两端电压的基波值 U_1 不变, I_{R1} 也不变。

在实际测量中十分方便,不同谐波含量的电源,对 MOA 加压,只要 U_1 是相同的,测量得到的 I_{R1} 也是相同的。

C.3.1.1 用投影法得到 I_{R1}

在实验室取 MOA 两端电压 U ,取 MOA 底部电流 I_x ;将 I_x 的基波 I_{x1} ,投影到 U 的基波 U_1 上即为 I_{R1} ,见图 C.5。有式(C.1):

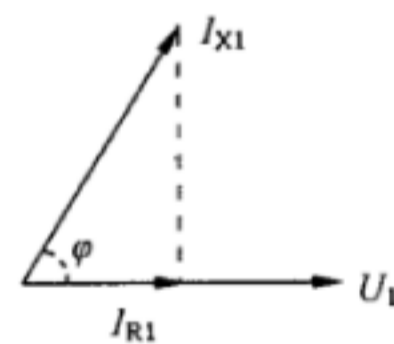


图 C.5 用投影法得到 I_{R1}

$$I_{R1P} = \sqrt{2} \times I_{x1} \times \cos\varphi \quad \dots\dots\dots(C.1)$$

式中:

I_{R1P} ——阻性电流基波峰值;

φ ——阻性电流角。

GIS 的 MOA 的全电流 I_x 和阻性电流基波峰值 I_{R1P} ,在 MOA 的生产厂或运行现场用投影法测量,结果都是一致的。

目前电力系统使用的大量是敞开式 MOA(瓷套和复合套),实验室试验与现场试验所得的结果往往是不同的。

以 $u_r=444$ kV(500 kV 系统用)的 MOA 为例加以说明:

- a) 当整支 MOA 置于实验室地面上,对 MOA 施加持续运行电压 U_c ,测量其全电流 I_x 及阻性电流基波峰值 I_{RIP} (MOA 采取了均压措施,一般是欠补偿,即仍是上部承担的电压较高,下部较低);当 MOA 置于 3 m 的构架上,测量结果是不同的,前者的 I_x 及 I_{RIP} 较后者的小。原因是 MOA 在构架上,其对地的杂散电容,比 MOA 落地时小,其电压分布比较均匀。

因此,试验数据只有在试验条件很一致的情况才会相同。

- b) 运行中的 MOA 的测量。3 支 MOA 的 I_x 、 I_{RIP} 在实验室测得的数据十分接近,然而在运行中的测量结果差别很大。表 C.1 是典型的一组一字形排列的 500 kV MOA 运行中的测试结果。

表 C.1 运行中 MOA 的测试结果

测试项目	A 相	B 相	C 相
U/kV	290	291	289
I_x/mA	1.48	1.38	1.28
$\Phi_{u-I_x}/(^{\circ})$	83.7	86.1	88.7
I_{RIP}/mA	0.23	0.13	0.04

测量 A(B、C)相时,电流信号从 A(B、C)相 MOA 底部取得;电压信号从 A(B、C)相 PT 二次绕组取得。

测试结果表明 3 支性能相同的 MOA,处在不同的相位,用投影法测得的 I_{RIP} 和阻性电流角 φ 是不同的(尽管 3 支 MOA 的真实运行状态是很接近的,特别是两个边相的运行状态完全相同),所以在运行方式不变(即该组 MOA 周围的带电体及接地体不变)的情况下,测得的数据作纵向比较是非常有效的。

C.3.1.2 用相角差法来判断运行中 MOA 的劣化程度

MOA 在各种过电压和长期运行电压的作用下会老化,老化在小电流区域的表现是阻性电流变大(若 MOA 受潮,阻性电流也变大),一般认为老化的判据是测量运行电压下的全电流、阻性电流或功率损耗,测量值与初始值比较,有明显变化时应加强监测,当阻性电流增加 1 倍时,应停电检查。

从工程角度来看,若某 MOA 的测量数据历次比较都是一致的,则认为该 MOA 的小电流特性是稳定的(而不是十分看重数据与真值相比有多少偏差),MOA 可以继续运行。

但判断 MOA 的老化则不然,由于用投影法测量得到的各相阻性电流基波峰值是不同的,规程的规定无法执行。如果把阻性电流的变化,转换成阻性电流角的变化,就会使对 MOA 老化的判断变得十分清晰。

周知,公式 $I_{RIP}=\sqrt{2}\times I_{x1}\times\cos\varphi$ 已经给出了, φ 与 I_{RIP} 的关系,MOA 全电流 I_x 中,容性电流比阻性电流大得多,当 MOA 的阻性电流增大时(不超过初始值的 2 倍) I_x 的变化很小,因此从工程上可把 I_x 看作常数,这样 I_{RIP} 与 $\cos\varphi$ 的关系变得十分简单、明确; I_{RIP} 的变化可用 φ 的变化来描述。

当 I_{RIP} 增加 1 倍时(即是原来的 2 倍),有 $\cos\varphi_{终}/\cos\varphi_{初}=2$ 成立, $\varphi_{终}=\arccos(2\cos\varphi_{初})$, $\Delta\varphi=\varphi_{初}-\varphi_{终}=\varphi_{初}-\arccos(2\times\cos\varphi_{初})$ 。

用 $\Delta\varphi$ 法来分析表 C.1 的实例, $\varphi_{初}$ 取表 C.1 中 B 相的阻性电流角 φ 的值 $\varphi_{初}=86.1^{\circ}$, $\Delta\varphi=86.1^{\circ}-\arccos(2\times\cos86.1^{\circ})$;可按 $\Delta\varphi=3.9^{\circ}$ 来判断表 C.2 中的数据,A 相 MOA φ 由 83.7° 减小到 79.8° ;B 相 MOA φ 由 86.1° 减小到 82.2° ;C 相 MOA φ 由 88.7° 减小到 84.8° ;避雷器真实的阻性电流就是原来的 2 倍了。

因为不同类型、不同制造厂生产的 MOA,其初始的全电流和阻性电流往往是不同的,其 $\Delta\varphi$ 也不同;如某额定电压为 200 kV 的 MOA,单相施加 127 kV 电压时,全电流 0.36 mA(r. m. s),阻性电流基波 $I_{RIP}=0.07$ mA(此处是指峰值), $\varphi=82.0^{\circ}$,可算出当阻性电流增加 1 倍时, $\Delta\varphi=8.1^{\circ}$ 。

不论何种 MOA 都可用 RCD-4 型阻性电流测量仪,测出在运行电压下,某相 MOA 的 I_X 、 I_{RIP} 及 φ 值,并很方便地求出 I_{RIP} 增长至初始值 k 倍的 $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi = \varphi_{初} - \arccos(k \times \cos\varphi_{初})$ 。

用相角差法来判断 MOA 的劣化,使运行中 MOA(不论 MOA 的排列、安装如何,只要该组 MOA 周围的带电体及接地体不变),劣化的判据很明确,判断十分方便。

a) 不从 PT 二次绕组取电压信号

在电力系统中,绝大多数 MOA 都是以同生产厂、同型号的三相 MOA 成一组运行的。有的现场没有 PT,有的甚至连 220 V 电源都没有。

解决测量的办法是找到一个符合以下 3 个条件的矢量:

- 该矢量与 MOA 运行的电网频率完全相同;
- 该矢量在测量过程中与电网 A、B、C 三相电压的角差稳定;
- 矢量的模较稳定。

做一个高压探头,将感应的电压送到测量仪的电压输入端或从现场找一个 220 V 交流电源。探头放置的位置是任意的(第一次和第 N 次的位置可以完全不同),220 V 电源也可以是任意的。

先测 B 相 MOA 的 I_X ,此时测量仪自动将 φ_B 定为 85° (我国较多的 MOA 的 φ 是 85° ,也可根据生产厂的情况设定),已经自动生成 B 相电压 U_B ,然后测量 A 相 MOA,仪器自动将 $U_B + 120^\circ$ 作为 U_A ;最后测 C 相 MOA,仪器自动将 $U_B - 120^\circ$ 作为 U_C 。每次对三相 MOA 进行测量 φ_B 总是 85° , φ_A 、 φ_C 可能变化。三相 MOA 运行状况判断如表 C.2 所示。

表 C.2 MOA 运行状况判断表

$\Delta\varphi_B$	$\Delta\varphi_A$	$\Delta\varphi_C$	结果
0	0	0	三相都正常
0	>0	0	A 相变坏
0	0	>0	C 相变坏
0	$\Delta\varphi_A = \Delta\varphi_C < 0$		B 相变坏
0	>0	>0	A、C 相变坏
0	≥ 0	< 0	A、B 相变坏
0	< 0	≥ 0	B、C 相变坏

注 1: $\Delta\varphi = \varphi_{第一次测量} - \varphi_{第N次测量}$ 。

注 2: 以上分析是基于 A、B、C 三相 MOA 同时变坏的可能性很小而做出的。

按上述理论生产的 RCD-6 型阻性电流测量仪在现场应用是成功的,已经推广使用。

b) 直接取 A、B、C 三相 MOA 的全电流

取 A、B、C 三相 MOA 的全电流信号输入测量仪,测量仪显示 A、B、C 三相 MOA 的全电流值 I_X 及 φ , φ_B 仍为常数(例如 85°);MOA 的运行状况判断如表 C.2 所示,该方法仅适合测量运行中的三相 MOA,接线简单,测量可靠。RCD-7 型测量仪具备上述功能。

C.3.2 利用电压信号作参考

该方法利用参考信号代表避雷器两端的电压,该参考信号可用于在电压达到峰值瞬间($du/dt=0$ 时)直接读取阻性电流。电压和阻性电流值可通过示波器读取,由于该参考信号可通过分压器获得,该电压分压器必须要有足够小的相差。如图 C.6 所示。

注:理论上是对的,实际使用不太方便。

C.3.3 平衡法

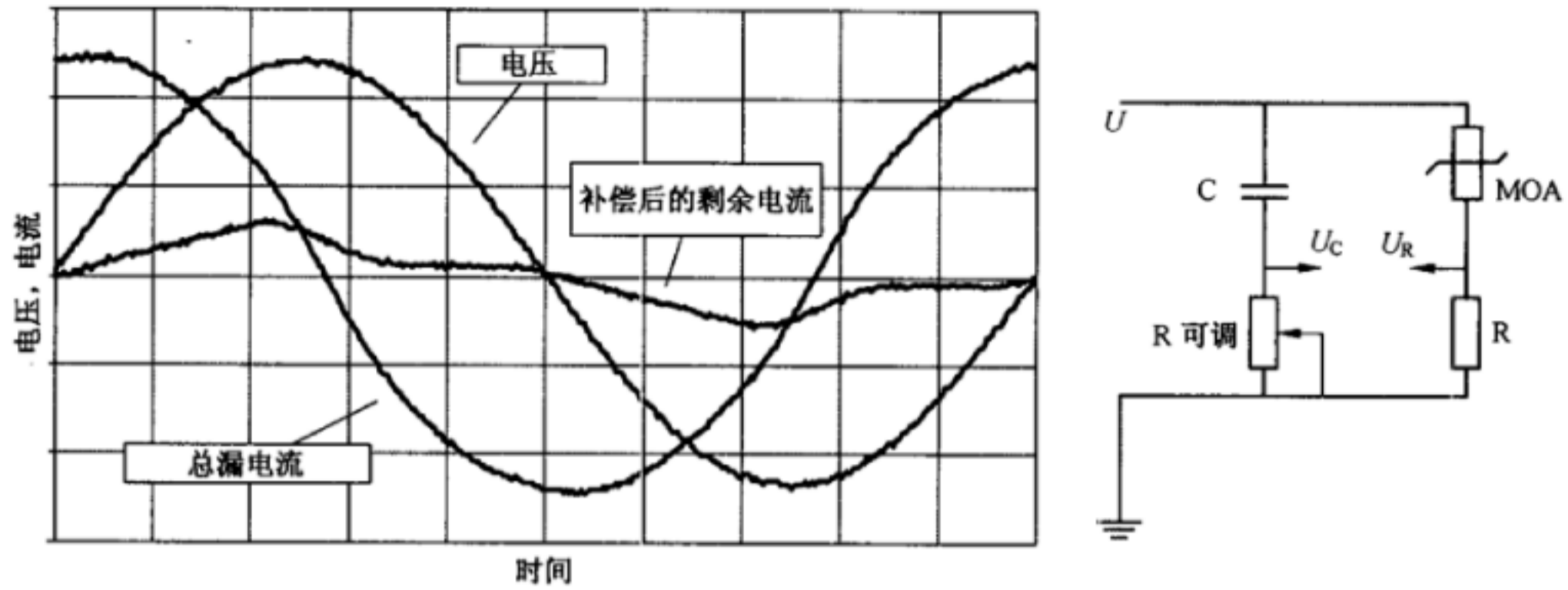


图 C.6 在持续运行电压 U_0 下的容性电流补偿后的剩余电流

图 C.6 中 C 为介损较小的电容器, C 下串可调电阻, MOA 下串分流器 R, U_C 和 U_R 信号分别送入示波器的两个信道, 做减法。该方法实验室可用; 现场不方便, 因为电容器体积较大, 还有其他带电体的影响; 另外, 电压谐波的影响也要注意。

C.3.4 零序电流法

该方法基于如下假设, 三相避雷器的容性电流是相等的, 三相相加, 则容性电流抵消。合成电流由三相避雷器的阻性电流组成, 如果它们大小相等, 基频分量也相抵消, 合成电流为零。只要任意一相避雷器阻性电流增大, 则合成电流增大。但无法判断是哪一相的阻性电流增大。

此方法的主要缺点是三相避雷器的容性电流往往不相等, 则合成电流不为零。另外一个因素, 系统电压谐波在合成电流中也产生谐波。

该方法在(1)三相电压值完全相同, 且三相角差均为 120° , (2)三相 MOA 小电流性能完全相同的三个罐式 MOA 中是对的。

在三相电压值完全相同, 且三相角差均为 120° , 对三相瓷外套或复合外套的 MOA (即使小电流特性完全相同) 是不对的。由于相间影响, 三相全电流之间的相角差不是 120° , 合成电流值不为零。

C.3.5 三次谐波法

该方法是用避雷器的非线性伏安特性在全电流中产生谐波的原理, 它假设所有谐波电流均由非线性电阻产生。阻性电流中最大的谐波成分是三次谐波, 因此, 它不需要参考电压。

该方法容易应用在运行中测量。最主要的问题是系统电压中所含的谐波导致测量的准确程度下降。电压中的谐波能产生容性谐波电流, 如果其大小与避雷器的非线性电阻产生的谐波电流在同一量级上, 就会给谐波电流的测量带来大的误差。

C.3.6 利用电压谐波补偿的三次谐波法

该方法的原理与 C.3.5 相同, 由于引进了对避雷器中的容性三次谐波电流的补偿电流信号, 所以对电压中谐波的灵敏度大大减小。其中的补偿电流信号是通过放置在避雷器基座上的“电场探头”取得的。通过正确的刻度, 电场探头感应的谐波电流将从总的谐波电流中减去, 得到的结果就是避雷器的非线性阻性电流产生的谐波电流。

C.3.5 及 C.3.6 两种方法存在的最大的缺陷是, MOA 劣化的原因, 有不少是由于内部受潮, 受潮

的结果是阻性电流基波增加,三次谐波是毫无反应的。

注:我国使用的测谐波的仪器效果都不好。

C.4 MOA 制造厂提供的信息

制造厂应提供,直流 1 mA(或几 mA)电压值,0.75 倍直流 1 mA(或几 mA)电压下的漏电流值,及环境温度、湿度等。

提供交流参考电压值(在几 mA 参考电流时);持续运行电压下 MOA 的全电流,阻性电流角,阻性电流基波峰值及环境温度、湿度等。

附录 D
(规范性附录)
术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

D.1

瓷外套避雷器 porcelain-housed arrester

用瓷做外套材料,并带有附件及密封系统的避雷器。

D.2

复合外套避雷器 polymer-housed arrester

用聚合和合成材料做外套,并带有附件的避雷器。

注:具有一定封闭气体容积的设计是可能的。密封可用复合材料本身或独立的密封系统来实现。

D.3

气体绝缘金属封闭避雷器(GIS 避雷器) gas-insulated metal enclosed surge arrester, GIS-arrester

气体绝缘金属封闭金属氧化物避雷器,内部没有任何串联或并联放电间隙,并充以不同于空气的气体。

注1:气体压力通常超过 $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ 。

注2:该避雷器用于气体绝缘开关装置中。

D.4

分离型避雷器 arrester-separable type

分离式避雷器 separable arrester

装配在一个绝缘或屏蔽的外套内的避雷器,该外套提供系统绝缘。避雷器安装在一个封闭壳体中通过滑动接触或螺栓装置实现电气连接以保护配电设备及系统。所有分离式避雷器都是不带电插拔式避雷器。

注:分离式避雷器通常用在欧洲。

D.5

外壳不带电型避雷器 arrester-dead-front type

外壳不带电式避雷器 dead-front arrester

避雷器装在屏蔽外套内,该外套提供系统绝缘并屏蔽接地。该避雷器安装在一封闭壳体用于保护地下且有托架的配电设备及回路。

注1:大部分外壳不带电型避雷器是带电插拔式避雷器。

注2:外壳不带电型避雷器通常用在美国。

D.6

不带电插拔避雷器 dead-break arrester

只有在回路不带电时,才能和回路连接和断开的避雷器。

D.7

带电插拔避雷器 load-break arrester

能够在回路带电时连接和断开的避雷器。

D.8

液浸型避雷器 arrester-liquid-immersed type

液浸式避雷器

浸在绝缘液体中的避雷器。

D. 9

避雷器均压环 grading ring of an arrester

一种金属部件,通常是圆环形,用以改善静电场下避雷器的电压分布。

D. 10

非线性金属氧化物电阻片 non-linear metal-oxide resistor

避雷器的部件。由于其具有非线性伏安特性,在过电压时呈低电阻,从而限制避雷器端子间的过电压,而在正常工频电压下呈现高电阻。

D. 11

无间隙金属氧化物避雷器 metal-oxide surge arrester without gaps

由非线性金属氧化物电阻片串联和/或并联组成且无并联或串联放电间隙的避雷器。

D. 12

串联间隙 series gap

有意设置的空气间隙,间隙电极串联一个或多个金属氧化物电阻片,间隙电压为全部或部分避雷器端子间电压。

D. 13

并联间隙 shunt gap

有意设置的空气间隙,间隙的电极在电气上并联一个或多个金属氧化物电阻片。

D. 14

有间隙金属氧化物避雷器 metal-oxide surge arrester with gapped structures

由金属氧化物电阻片与放电间隙串联和/或并联组成的避雷器。

D. 15

线路避雷器 line surge arresters; LSA

通常适用于电力线路以降低瞬态雷电冲击时绝缘子闪络危险的一种避雷器。

注:通常不用于保护绝缘子免受其他的暂态冲击,如操作冲击。必要时,也可以用于保护线路绝缘子之外的任何其他电气设备。

D. 16

带外间隙线路避雷器 externally gapped line arresters; EGLA

一种设计有外部间隙和避雷器本体串联的线路避雷器,用以保护线路绝缘子免受由雷电引起的快波前过电压。它依靠外部串联间隙较高的放电电压,使避雷器在工频过电压和因操作和故障产生的缓波前过电压下不动作。

D. 17

避雷器本体 arrester body; SVU

带有外套的非线性金属氧化物电阻片部分,它与外部间隙串联构成带间隙的完整线路避雷器 EGLA。避雷器本体可以包含几个元件。

D. 18

带外串联间隙避雷器续流 follow current

间隙击穿时,通过线路避雷器串联间隙由工频电压产生的电流。避雷器的外部串联间隙必须能够遮断由受污避雷器本体所产生的外部泄漏电流和通过非线性电阻片所产生的内部阻性电流。即带间隙的线路避雷器在污秽条件下的性能是由间隙在潮湿和污秽条件下的灭弧性能所决定。这要由续流遮断试验证明。

D. 19

无间隙线路避雷器 non gapped line arresters; NGLA

由非线性金属氧化物电阻片串联和/或并联组成且无并联或串联放电间隙的线路避雷器。用来保

护线路绝缘子免受雷电引起的快速波前过电压的损害,也可以保护线路绝缘子免遭操作过电压的损害。

注:无间隙线路避雷器通常装设有脱离器。

D. 20

避雷器脱离器 arrester disconnecter

避雷器故障时,使避雷器与系统断开的装置。用于防止系统持续故障,并给出可见标识。

注:脱离器脱离时切断流经避雷器的故障电流通常不是该装置的功能。

D. 21

故障指示器 fault indicator

避雷器故障时提供指示的一种装置,但它不能将避雷器从系统脱离。

D. 22

避雷器的额定电压 rated voltage of an arrester

U_r

施加到避雷器端子间的最大允许工频电压有效值,按照此电压所设计的避雷器,能在所规定的动作负载试验中确定的暂时过电压下正确地工作。

D. 23

避雷器的持续运行电压 continuous operating voltage of an arrester

U_c

允许持久地施加在避雷器端子间的工频电压有效值。

D. 24

避雷器持续电流 continuous current of an arrester

施加持续运行电压时流过避雷器的电流。

注 1:持续电流由阻性和容性电流组成,随温度、杂散电容和外部污秽影响而变化。因此试品持续电流可不同于整只避雷器的持续电流。

注 2:为了比较,持续电流可用有效值或峰值表示。

D. 25

避雷器的额定频率 rated frequency of an arrester

避雷器设计使用的电力系统的频率。

D. 26

避雷器的工频参考电压 reference voltage of an arrester

U_{ref}

避雷器通过工频参考电流时测出的避雷器的工频电压峰值除以 $\sqrt{2}$ 。

注:多元件串联组成的避雷器的电压是每个元件工频参考电压之和。

D. 27

避雷器的放电电流 discharge current of an arrester

避雷器动作时通过避雷器的冲击电流。

D. 28

避雷器的标称放电电流 nominal discharge current of an arrester

I_n

用来划分避雷器等级的、具有 8/20 波形的雷电冲击电流峰值。

D. 29

避雷器的残压 residual voltage of an arrester

U_{res}

放电电流通过避雷器时其端子间的最大电压峰值。

D. 30

外间隙线路避雷器的残压 residual voltage of EGLA

放电电流通过时,避雷器端子间的电压峰值。

D. 31

按 GB 11032—2010 试验的避雷器的保护特性 protective characteristics of an arrester tested in accordance with GB 11032—2010

由以下各项组合:

- a) 陡波冲击电流下残压;
- b) 雷电冲击电流下残压;

注 1: 避雷器的雷电冲击保护水平是在标称放电电流下的最大残压。

- c) 操作冲击电流下残压。

注 2: 避雷器的操作冲击保护水平是在规定的操作冲击电流下的最大残压。

D. 32

按 GB/T 28182 试验的避雷器的保护特性 protective characteristics of an arrester tested in accordance with GB/T 28182

由以下各项组成:

- a) 陡波冲击电流残压和波前冲击放电电压;
- b) 雷电冲击电流残压和 1.2/50 冲击放电电压;
- c) 操作冲击电流残压和操作冲击放电电压。

D. 33

按 GB/T 28182 试验的避雷器的冲击保护水平 impulse protective levels of an arrester tested in accordance with GB/T 28182

- a) 快波前保护水平: 陡波冲击电流残压或波前冲击放电电压的最大值;
- b) 标准雷电冲击保护水平: 标称放电电流残压或 1.2/50 雷电冲击放电电压的最大值;
- c) 操作冲击保护水平: 操作冲击电流残压或操作冲击放电电压最大值。

D. 34

避雷器的工频电压耐受时间特性 power-frequency withstand voltage versus time characteristic of an arrester

在规定条件下,对避雷器施加不同的工频电压,避雷器不损坏,不发生热崩溃时所对应的最大持续时间的关系曲线。

D. 35

绝缘配合 insulation co-ordination

考虑所采用的过电压保护措施后,决定设备上可能的作用电压,并根据设备的绝缘特性及可能影响绝缘特性的因素,从安全运行和技术经济合理性两方面确定设备的绝缘强度。

D. 36

暂时过电压 temporary overvoltage; TOV

较长持续时间的工频过电压。

注: 过电压可能是无阻尼或弱阻尼的。在某些情况下,其频率可能比工频低数倍或高数倍。

D. 37

瞬态过电压 transient overvoltage

几毫秒或更短持续时间的过电压,通常是高阻尼振荡的或非振荡的。

注: 暂时过电压可能紧随瞬态过电压出现,在这种情况下,认为这两种过电压是两个独立的过程。

瞬态过电压分为下列几种:

D. 37. 1

缓波前过电压 slow-front overvoltage; SFO

一种瞬态过电压,通常为单向的,到达峰值的时间为 $20\ \mu\text{s} < T_p < 5\ 000\ \mu\text{s}$,而波尾持续时间 $T_2 < 20\ \text{ms}$ 。

D. 37. 2

快波前过电压 fast-front overvoltage; FFO

一种瞬态过电压,通常为单向的,到达峰值时间为 $0.1\ \mu\text{s} < T_1 < 20\ \mu\text{s}$,波尾持续时间 $T_2 < 300\ \mu\text{s}$ 。

D. 37. 3

陡波前过电压 very-fast-front overvoltage; VFFO

一种瞬态过电压,通常为单向的,到达峰值的时间 $T_1 < 0.1\ \mu\text{s}$,有或者没有叠加振荡,振荡频率在 $30\ \text{kHz} < f < 100\ \text{kHz}$ 之间。

注:特快波前过电压 VFFO 也称为特快速瞬态过电压 VFTO(very-fast-transient overvoltage)。

D. 38

自恢复绝缘 self-restoring insulation

在试验期间的破坏性放电后,经过短的时间,可完全恢复其绝缘特性的绝缘。

注:此类绝缘一般是外绝缘,但不是必须的。

D. 39

闪络 flashover

在固体表面上的破坏性放电。

D. 40

破坏性放电 disruptive discharge

绝缘在电负荷下破坏而发生的现象,包括电压突降和电流导通。

注 1:术语用于固体、液体、气体介质或其组合体的电击穿。

注 2:固体介质中破坏性放电造成电气强度永久性丧失,而在液体或气体介质中电气强度的丧失可能是暂时的。

D. 41

雷电(或操作)冲击保护水平 lightning (or switching) impulse protective level

U_{pl} (LIPL) or U_{ps} (SIPL)

在特定条件下避雷器端子遭受雷电(或操作)冲击的最大峰值电压。

D. 42

雷电冲击耐受电压 lightning impulse withstand voltage; LIWV

设备或绝缘结构的标准额定雷电冲击耐受电压。

D. 43

操作冲击耐受电压 switching impulse withstand voltage; SIWV

设备或绝缘结构的标准额定操作冲击耐受电压。

D. 44

标称系统电压 nominal voltage of a system

U_n

用于表示或识别系统的合适而近似的电压值。

D. 45

系统最高电压 highest voltage of a system

U_s

在正常运行条件下,系统中任一点在任一时刻所出现的相间最高运行电压的有效值。

D. 46

设备最高电压 **highest voltage for equipment**

U_m

根据设备绝缘以及与之相关的设备标准有关联的其他特性设计的相间最高电压的有效值。在正常运行条件下由有关技术委员会规定,该电压可以持续施加到设备上。

D. 47

闪络率 **flashover rate; FOR**

架空线或者系统每年每 100 km 线路总闪络次数。

D. 48

反击闪络率 **back flashover rate; BFOR**

架空线或者系统每年每 100 km 线路反击闪络次数。

D. 49

屏蔽失效率 **shielding failure rate; SFR**

架空线每年每 100 km 线路屏蔽失效次数。

D. 50

屏蔽失效闪络率 **shielding failure flashover rate; SFFOR**

架空线每年每 100 km 线路因屏蔽失效而导致闪络的次数。

D. 51

操作闪络率 **switching surge flashover rate; SSFOR**

架空线每年每 100 km 线路由于操作过电压引起的闪络次数。

D. 52

规定的长期负载 **specified long-term load; SLL**

在避雷器运行期间,允许持续施加在避雷器上的与轴向垂直的力。该负载不会对避雷器产生任何机械损伤。

D. 53

规定的短期负载 **specified short-term load; SSL**

避雷器在运行期间,允许短期或突发事件(例如,短路电流负载,很高的风负载或者地震负载)时,施加的与轴向垂直的最大的力。该负载不会对避雷器产生任何机械损伤。

注:应该考虑比规定的短期负载更高的地震负载。

D. 54

平均破坏负载 **mean breaking load, MBL**

由试验确定的对于瓷或者树脂外套的避雷器的平均破坏负载。

D. 55

大电流冲击 **high current impulse**

具有 4/10 或 2/20 波形的冲击放电电流峰值,用于试验避雷器在直击雷时的稳定性。

D. 56

避雷器元件 **unit of an arrester**

一个完全封装好的避雷器部件。可与其他元件串联和/或并联,构成更高额定电压和/或更高标称放电电流等级的避雷器。避雷器元件不一定是避雷器比例单元。

D. 57

冲击 **impulse**

一种无明显振荡的单极性的电压或电流波,它迅速上升到最大值,然后通常缓慢地下降到零,即使带有反极性振荡,其幅值也很小。

注:定义冲击电流和冲击电压的参数是:极性、峰值、波前时间和波尾半峰值时间。

D. 58

陡波冲击电流 steep current impulse

视在波前时间为 $1\ \mu\text{s}$ 的一种冲击电流。因设备调整的限制,实测值为 $0.9\ \mu\text{s}\sim 1.1\ \mu\text{s}$ 。视在波尾半峰值时间不应大于 $20\ \mu\text{s}$ 。

D. 59

雷电冲击电流 lightning current impulse

一种 8/20 波形冲击电流。因设备调整的限制,视在波前时间的实测值为 $7\ \mu\text{s}\sim 9\ \mu\text{s}$,视在波尾半峰值时间为 $18\ \mu\text{s}\sim 22\ \mu\text{s}$ 。

注:在残压型式试验时,波尾半峰值时间不是重要的,可有任意偏差。

D. 60

避雷器参考电流 reference current of an arrester

用于确定避雷器工频参考电压的工频电流阻性电流的峰值(如果电流是非对称的,取两个极性中较高的峰值)。

注 1:工频参考电流应足够大,使杂散电容对所测避雷器元件(包括设计的均压系统)的参考电压的影响可以忽略,该值由制造厂规定。

注 2:工频参考电流取决于避雷器的标称放电电流和/或线路放电等级。对单柱避雷器,参考电流值的典型范围为每平方厘米电阻片面积 $0.05\ \text{mA}\sim 1.0\ \text{mA}$ 。

D. 61

避雷器热崩溃 thermal runaway of an arrester

当避雷器承受的持续功率损耗超过外套和连接件的散热能力而引起电阻片的温度累积升高,最终导致避雷器损坏的状况。

D. 62

避雷器热稳定性 thermal stability of an arrester

如果避雷器在动作负载试验引起温度上升后,在规定的条件下对电阻片元件施加规定的持续运行电压,电阻片的温度能随时间而降低,则称此避雷器是热稳定的。

D. 63

型式试验 type tests

设计试验 design tests

完成一种新的避雷器设计开发时所做的试验,以确定代表性的性能,并证明符合有关标准。

注:做了这些试验,无需重做。除非设计改变而改变其性能时,只需重做有关项目试验。

D. 64

例行试验 routine tests

按要求对每只避雷器或部件和材料进行的试验,以保证产品符合设计规范。

D. 65

弯矩 bending moment

施加在避雷器外套上的水平力乘以避雷器外套安装基座(法兰的下平面)与施力点之间的垂直距离。

D. 66

端子水平拉力 terminal line force

垂直于避雷器的纵轴,在避雷器中心线测量所得的力。

D. 67

扭转负荷 torsional loading

没有施加在避雷器纵轴上,作用在垂直安装避雷器外套顶端的水平力。

D. 68

避雷器的续流 follow current of an arrester

来自连接的电源,紧随放电电流流过避雷器的电流。

D. 69

冲击放电伏秒曲线 impulse sparkover voltage-time curve

冲击放电电压与放电时间的关系曲线。

附录 E

(资料性附录)

带间隙 SiC 避雷器的寿命终结和替换

E.1 简介

20 世纪 70 年代末以来,无间隙金属氧化物避雷器已经取代了带间隙碳化硅(SiC)避雷器。尽管如此,仍有许多带间隙 SiC 避雷器在运行。大多数碳化硅(SiC)避雷器已运行 25 年以上,正在迅速接近它们经济和物理寿命的终点。

E.2 SiC 避雷器的设计和运行

SiC 避雷器的内部设计远比现在的无间隙 ZnO 避雷器复杂,基本上有两种不同的间隙设计,被动或主动间隙。主动间隙通过电磁力将电弧移离放电点并尽可能拉长,以便在工频电流过零前启动熄灭电弧,可以吸收较高的能量。电磁力来源于与间隙串联的电感。主动间隙设计的避雷器通常用于超高压长距离输电线路和较低系统电压下的电容器组。被动间隙通常使用简单的平板电极设计。所有的 SiC 避雷器必须在工频电流的第一个过零点熄弧,否则,间隙可能再也无法熄弧,而且避雷器将会短路。

持续运行电压基本由间隙来承担,而 SiC 电阻片几乎不承受持续运行电压。SiC 避雷器内部如果一个小间隙放电,其他的间隙也会跟着放电。通常每个间隙的闪络电压只有几千伏,因此,为了确保间隙组中单个间隙电压分布均匀,以及沿多元件避雷器总高度的电压分布的一致性,应采取均压措施。均压元件通常是小的 SiC 电阻片和陶瓷电容器。

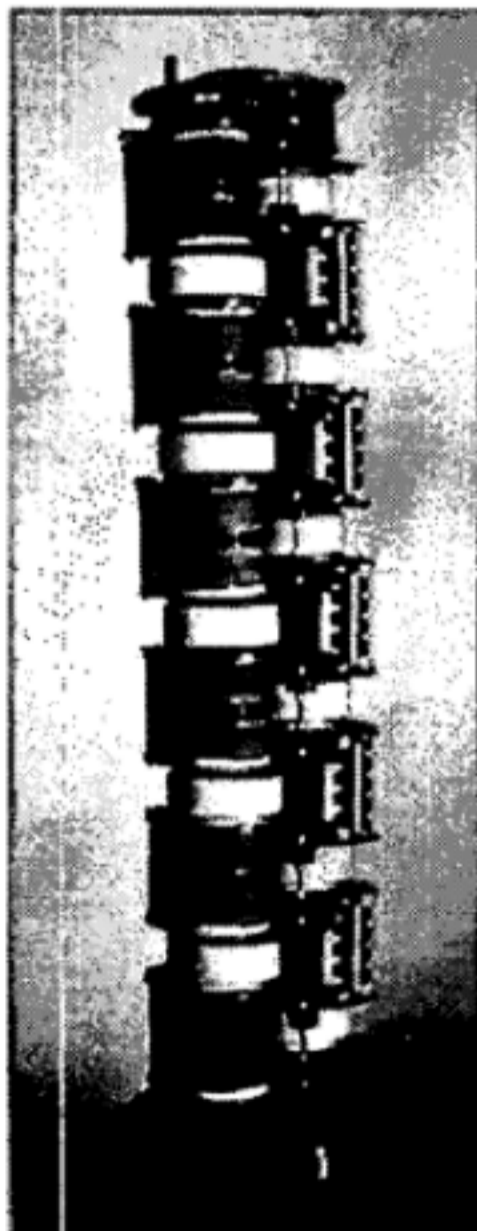


图 E.1 SiC 避雷器内部结构

为了降低避雷器高度,对于高压避雷器内部结构必须设计成 Z 字形,这样就导致了它的瓷套外径比 ZnO 避雷器大,尤其是对于超高压避雷器来说更是如此。图 F.1 为典型的带有主动间隙的 SiC 内部

结构,内部结构放置于带有法兰的瓷外套中,采用特殊的密封圈密封。为了避免间隙电极的腐蚀,每个避雷器元件充装惰性气体密封,有些设计使用干燥的空气,但大多数是用干燥的氮气。

E.3 故障原因和老化现象

由于这些避雷器有较多的组件,存在许多潜在的可能故障和/或失效的原因。

E.3.1 密封问题

SiC 避雷器最普遍的故障原因是密封问题。不仅密封圈易损和随着使用时间老化,整个密封系统由于法兰缘故设计寿命不会超过 20 年~30 年。随着水分进入,避雷器会由于内部电晕和爬电而导致故障。

E.3.2 内部、外部压力的平衡和环境

即使密封垫圈工作良好,25 年后,仅仅通过扩散,内部气体也会泄漏。通过氧气和水分的扩散,水分进入会污染或者改变内部最初的气体成分,引起内部电晕和爬电,导致避雷器在 TOV 或甚至在运行电压下放电。因为间隙再也无法熄弧,进而引起避雷器故障。

为了方便测量泄漏,某些避雷器设计为微正压。如果最初内部充的气压不同于实际的外界空气压力,当内外压力相等时,可能会导致内部电晕,影响避雷器运行和/或减少设备保护裕度。对于高海拔运行的避雷器,设计和制造的避雷器内部压力比较小。

E.3.3 间隙电极的腐蚀

这是比较危险的情况,会导致避雷器放电电压升高或降低,因此,即使避雷器实际没有故障,也可能不会跟最初的保护裕度一样。

电极腐蚀有两个原因:第一,避雷器动作的次数可能会改变电极的性能。通常,间隙避雷器的冲击放电次数一般不会超过 50~100 次。第二,避雷器的密封系统的寿命为 20 年~25 年,此后潮气可能开始侵蚀电极,会影响所有已过预期寿命的 SiC 避雷器。

E.3.4 均压元件的老化

均压电阻和均压电容器的特性随时间变化,可能导致放电电压的变化。放电电压可能提高或降低,引起与电极腐蚀同样的危险。户外运行经验表明,相比于均压电阻,直接故障更可能发生在均压电容上。但是,两种类型的均压元件都发现有老化现象。设计这些避雷器时,对于均压元件的老化测试没有任何要求,这些均压元件都是处于运行电压(相当于今天的 U_c)的持续负荷之下。这些元件很少有通过现今用于氧化锌电阻片的 1 000 h 老化试验而不改变特性的。

E.3.5 系统条件的改变

系统条件的改变将会影响 SiC 避雷器的性能,系统条件的改变一般是电容器组的安装和/或线路的扩张。通常, SiC 避雷器对于电容器释放的能量吸收能力差。因此,间隙必须能够胜任仅在工频电流过零时才能做到的熄弧。间隙放电后,避雷器将会承受电容器放电的能量和续流。因为 SiC 避雷器不能吸收这些能量,它们对于电容器放电能量的吸收能力显著低于 ZnO 避雷器,这进一步限制了 SiC 避雷器吸收高能量的应用。系统的扩充和/或加强可能会增大系统的短路电流,超过避雷器原先的要求和能力。线路扩充将会提高线路操作释放的能量,而且要求比最初规定的更高的线路放电等级。

E.3.6 污秽水平的增高

一个小间隙引发整个避雷器放电的特性使得避雷器对污秽非常敏感,因为瓷套表面的火花放电能

够轻易地引发内部间隙的放电。因此,工业污染的增加和农田化肥的使用,使避雷器面临非常高的潜在故障危险。

E.4 监测避雷器状态的可能性

永久性监测不是一个合理的方法。一般来说,监测方案在经济上是不可行的。其花费能够轻易地超过更换一个新 ZnO 避雷器。另外,当避雷器已经运行超过 20 年的时候,应尽快进行替换。

如果已经决定对避雷器进行监测,推荐程序是抽取一部分进行检查,从试验结果作出决定。至少要做工频放电电压试验。对于密封问题,应该打开避雷器检查均压元件、间隙和放电痕迹等情况,然后做出更换计划。试验过的避雷器不能再使用。检查的花费应该与更换的成本作比较,并需要考虑旧避雷器的重要性的数量。

更换的考虑应包括制造、型号、制造年份、安装的重要程度和故障的结果。

E.5 提前计划更换的优点

提前计划更换有很多优点。

E.5.1 提高可靠性

由于 ZnO 避雷器的残压较低,所以安全裕度大,保护距离增加,不会出现间隙放电时陡的过电压脉冲。

E.5.2 成本优势

延长旧的变压器寿命,有些估计大概能延长 7 年的寿命。

计划更换比故障时对避雷器的紧急更换更节约成本。

E.5.3 增加安全要求

避雷器是系统保护的第一道防线,防止超出系统设计的耐受能力这样的低概率事件造成的危害,避雷器还将保护系统免受过电压的损害。如果吸收的能量超过避雷器的耐受能力,避雷器将会由于内部短路而故障。避雷器故障时的非爆炸式设计由相应 IEC 标准规定的压力释放试验或短路试验来进行验证。但是,旧标准中对于 SiC 避雷器的要求远远没有现行 IEC 标准严格,因此,旧的避雷器不能满足所有的短路电流值,特别对于长的元件可能会面临很高的危险。应当注意直到今天该试验还是非强制性的,只要不声称具有短路电流耐受能力,按 GB 11032—2010,避雷器仍可出售。对于 1970 年以前制造的避雷器,其中有些避雷器设计,特别对于较低的系统电压,没有压力释放装置保证内部短路时安全运行,这些避雷器很有可能在故障时爆炸。

避雷器设计应考虑以下方面:

- 在避雷器严重故障时,不应对人员造成伤害;
- 在避雷器严重故障时,不应对附近设备造成破坏。

E.6 更换问题

所有老式 SiC 避雷器不可能同时更换,因此以风险和计划停电最少的方式优化更换是很重要的。无论何时在较早的变电站有计划地进行停电维护,检查是否有旧类型的避雷器需要更换是恰当的。

E.6.1 优先更换的建立

下列条款作为优先更换的原则：

- 没有压力释放装置的避雷器。
- 关键安装处应该首先替换。由于老式 SiC 避雷器的故障,大部分在 SiC 避雷器时代建的核工厂已关闭。
- 后加装电容器的系统/线路,因为附近的避雷器可能不符合实际的电容器放电要求。
- 安装有非常老式避雷器的系统/线路,统计故障概率高。
- 变化运行环境的系统/线路,像新工业污染或者更长的线路。
- 安装有旧设备的系统/线路,因为金属氧化物避雷器能够延长设备如老式变压器的寿命。

E.6.2 选择更换金属氧化物避雷器

如果无间隙金属氧化物避雷器的规范中包含实际的系统电压,应按规范选择。对于特殊应用的避雷器,按以下规定选择：

- 额定电压的选择:通常可以选择与 SiC 避雷器额定电压相同。唯一的例外可能是有高的 TOV 要求的不接地系统,应当选择稍微高一点额定电压。
- 线路放电等级的选择:除非系统增加了并联电容器组或扩大,否则,没有必要改变线路放电等级。当系统条件改变时,推荐修订避雷器规范。
- 机械性能的考虑:现在的金属氧化物避雷器外形比老式 SiC 避雷器更短、瓷套直径更小,因而安装尺寸较小。由于内部结构的复杂性,这些大直径的瓷外套可能在 145 kV 及以上系统使用。预先做好过渡安装板有利于利用已有的安装结构。

参 考 文 献

- [1] G. N. ALEXANDROV. Methods of choosing insulation for distribution networks with the view to reliable operations in the presence of internal voltage surges. *Energetika*, No. 7, 1962.
- [2] G. W. BROWN. "Designing EHV Lines to a Given Outage Rate—Simplified Techniques. *IEEE Trans. On PA&S*, Apr. 1978.
- [3] C. F. WAGNER, G. D. MCCANN and C. M. LEAR. Shielding of substations. *AIEE Trans*, 1942.
- [4] R. H. LEE. Lightning protection of buildings. *IEEE Trans. On Industry and Applications*, May/June, 1979.
- [5] A. M. MOUSA. Shielding of HV and EHV substations. *IEEE Trans on PA&S*, 1976.
- [6] A. R. HILEMAN, C. L. WAGNER, R. B. KISNER. Open breaker protection of EHV systems. *IEEE Trans. On PAS*, 1969.
- [7] A. R. HILEMAN. Insulation co-ordination for power systems. Marcel Dekker.
- [8] CIGRÉ technical brochure: Technical requirements for substation equipment exceeding 800 kV AC.
- [9] China 2006, ACTECH006, Study on insulation co-ordination in 1 000 kV UHV AC transmission project.
- [10] China 2006, ACTECH007, Study on overvoltage and insulation co-ordination for 1 000 kV AC Transmission System.
- [11] IEC/CIGRÉ UHV symposium Beijing 18-21 July 2007, paper 2-5-1. Development of 1 100 kV AC GIS-arrester and the verification tests.
- [12] IEC/CIGRÉ UHV symposium Beijing 18-21 July 2007, paper 2-5-1. MO surge arresters for systems above 550 kV—Experience and challenges for the future .
- [13] A3-07(WG22)141 "Italian 1 000 kV project" by E. Colombo.
- [14] BRUNKE J, LEGATE A, RAY J, YASUDA E. Elimination of closing resistors on EHV circuit breakers. *IEEE Trans. Power Delivery* Vol. 3, No. 1 January 1988, p 223.
- [15] STENSTROM L, MOBEDJINA M. Limitation of switching overvoltages by use of transmission line arresters. Paper 30, CIGRÉ conference Zagreb 1998. 116 37/361/CD.
- [16] MUSA Y. I, JAGTIANI A. S, STENSTROM L, JOHNNERFELT B, KHAN A, a. o. . Application of 800 kV SF₆ dead tank circuit breakers with transmission line arresters to control switching transient overvoltages. *IEEE Trans. Power delivery*, Vol. 17, Issue 4, Oct. 2002, p 957-962.
- [17] SMITH, S. D. , DUGAN, R. C. . Low-voltage-side current-surge phenomena in single-phase distribution transformer systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 2, April 1988, pp. 637-647.
- [18] BURGER U. . "Surge arresters with spark gaps" In "Surges in high voltage networks". Edited by K. Ragaller, PLENUM PRESS, New York, 1980, pp. 251-282.
- [19] MATSUOKA M. , MATSUYAMA T. and IIDA Y. . Voltage nonlinearity of zinc oxide ceramics doped with alkali earth metal oxide. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 8, 1969, pp. 1275-1276.
- [20] KOBAYASHI M. , MUZINO M. , AIZAWA T. , HAYASHI M and MITANI K. Development of zinc oxide non-linear resistors and their applications to gapless surge arresters". *IEEE Trans.*

PAS, Vol. PAS-97, No. 4, 1978, pp. 1149-1158.

[21] SWEETANA A., GUPTA T., CARLSON W., GREKILA R., KUNKLE N. and OSTERHOUDT J. . Gapless surge arresters for power systems applications Vol. 1; Development of 500 and 1 200 kV arresters. EPRI EL 3166, Vol. 1, Project 657-1, Final Report, September 1983.

[22] BLATTER G. and GREUTER F. . Carrier transport through grain boundaries in semiconductors. *Physica Scripta* Review B, Vol. 33, No. 6, 1986, pp. 3952-3966.

[23] HILEMAN A. R., ROGUIN J., WECK K. H. . Metal oxide surge arresters in AC systems, Part V; Protection performance of metal oxide surge arresters. *Electra*, No. 133, 1991, pp. 132-144.

[24] HADDAD. A. "Surge arresters" in "Advances in high voltage engineering". Chapter 5; in Haddad. A. and Warne, D. (Eds.) IEE, 2004, pp. 191-255.

[25] ELOVAARA J., FOREMANN K., SCHEI A., VÖLCKER O. . Metal-oxide surge arresters in a. c. systems. Part 3; Temporary overvoltages and their stresses on metal-oxide surge arresters. *ELECTRA* 128, 1989, pp. 114-125.

[26] STENSTRÖM L. . Metal-oxide surge arresters in a. c. systems Part 6; Selection of metal-oxide surge arresters from the standards. *ELECTRA* 133, 1990, pp. 146-165.

[27] SCHEI A., EKSTRÖM A. . Stresses on metal-oxide surge arresters in HVAC and HVDC systems by temporary and transient overvoltages and related tests. CIGRÉ Report 1986, 33-13.

[28] IEEE working group 3. 4. 11. Modelling of metal oxide surge arresters. *Transaction on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, 1992, pp. 302-309.

[29] A. SCHEI, B. HANSEN, K. KARIJORD, Resistive leakage current measurements on metal oxide surge arresters in service—Measuring equipment and results from measurements in 145 kV and 300 kV stations. Report No. 140-01, CIGRÉ Symposium, Berlin, 1993.

[30] LUNDQUIST J, STENSTROM L, SCHEI A, HANSEN B. New method for measurement of the resistive leakage currents of metal oxide surge arresters in service. *IEEE Trans. On Power delivery*, Vol. 5, No. 4, 1990, pp. 1811-1819.

[31] SHIRAKAWA S, ENDO F, KITAJIMA H, KOBAYASHI S, KURITA K, GOTO K, SAKAI M. Maintenance of surge arrester by portable arrester leakage current detector. *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 3 No. 3, 1988, pp. 998-1003.

[32] DEEP G S and NOWACKI K. Measurement of resistive leakage current of metal—Oxide surge arresters. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 64. 07, Athens (Greece), 5-9 September 1983. 117 37/361/CD.

[33] NAIDU SR and SRIVASTAVA KD. The validity of circuits for measuring the resistive leakage current of zinc oxide arresters. 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 82. 12, Braunschweig (FRG), 24-28, August 1987.

[34] SPELLMAN C., HADDAD A. . A technique for on-line condition monitoring of ZnO surge arresters. 10 th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Vol. 4, pp. 151-154, Montreal (Canada), 1997.

[35] Apparatus for detecting degradation of an arrester. European Patent Specification No. 0 228 153 B1.

[36] Maintenance devices for surge arresters. *Meiden Review*, No. 3, 1989.

[37] COFFEEN L. T., MCBRIDE J. E. . High voltage AC resistive current measurements using a computer based digital watts technique. *IEEE Trans. On PWRD* Vol. 6, No. 2, April 1991.

[38] KIRBY P., ERVEN C. C. and NIGOL O.. Long term stability and energy discharge capacity of metal oxide valve elements. *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 1656-1665.

[39] KIRKBY P.. The long term stability of valve elements used in metal oxide surge arresters. CEA Report No. 199 T 425, July 1986.

[40] HINRICHSEN V and PEISER R. Simulation of the electrical performance and thermal behaviour of metal oxide surge arresters under AC stress. Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 26.04, Braunschweig (FGR), 1987.

[41] EDA K.. Estruction mechanism of ZnO varistors due to high currents. *Journal of Applied PhySiCs*, Vol. 56, No. 10, 1984, pp. 2948-2955.

[42] BENZAOUA F., HADDAD A., ROWLANDS A. R., WATERS R. T.. A circuit model for polluted ZnO polymeric surge arresters. 10 th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Vol. 3, Montreal (Canada), 1997, pp. 317-320.

[43] RICHTER B., KRAUSE C. and MEPPPELINK J.. Measurement of the U-I characteristic of MO-resistors at current impulses of different wave shapes and peak values. Fifth Int. Sym. On High voltage Eng., Paper 82.03, Braunschweig (Germany), 1987.

[44] HADDAD A., NAYLOR P., METWALLY I., GERMAN D. M., WATERS R. T.. An improved non-inductive impulse voltage measurement technique for ZnO surge arresters. *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, 1995, pp. 778-784.

[45] TUA P. F., ROSSINELLI M. and GREUTER F.. Transient response of electrically active grain boundaries in polycrystalline semiconductors. *PhySiCa Scripta.*, Vol. 38, No. 3, 1988, pp. 491-497.

[46] SCHMIDT W., MEPPPELINK J., RICHTER B., FESER K., KEHL L. and QIU C.. Behaviour of MO-surge arrester blocks to fast transients. *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, 1989, pp. 292-300. 118 37/361/CD.

[47] SARGENT RA, DUNLOP GL, DARVENIZA M. Effects of multiple impulse currents on the microstructure and electrical properties of metal oxide varistors. *IEEE Trans. On Electrical Insulation*, vol. 27, No. 3, 1992, pp. 586-592.

[48] ABDUL MALEK Z., HADDAD A., GERMAN D. M., WATERS R. T.. Current sharing in multi-column surge arresters. 10 th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Vol. 5, Montreal (Canada), 1997, pp. 145-148.

[49] V. HINRICHSEN. Latest designs and service experience with station-class polymer housed surge arresters. 2003 World Conference on Insulators, Arresters & Bushings, Marcella (Malaga), Spain, November 16-19, 2003, Proceedings pp. 85-96.

[50] W. SCHMIDT, B. RICHTER, G. SCHETT; Metal oxide surge arresters for gas-insulated substations (GIS)—Design requirements and applications. CIGRÉ Paris Session 1992, Report 33-203.

[51] R. GÖHLER, L. KLINGBEIL. Special requirements on gas-insulated, metal-oxide surge arresters. 2006 International Conference on Power System Technology, 22-26 October, 2006 Chongqing, China.

[52] K. HIDAKA, Y. YAMAGATA, Y. ISHIZAKI, S. SHIRAKAWA, S. ISHIBE. Development of 1 100 kV a. c. GIS25 arrester and the verification tests. IEC/CIGRÉ UHV Symposium, Beijing 2007-07-23, Report 2-5-2.

[53] W. R. HENNING, A. D. HERNANDEZ, W. W. LIEN. Fault current capability of dis-

tribution transformers with under-oil arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, Nr. 1 1989, 405-412. .

[54] M. ISHII, S. YOKOYAMA, Y. IMAI, Y. HONGO, H. SUGIMOTO, Y. MOROOKA. Lightning protection of pole mounted transformer on Japanese MV lines. CIGRÉ Paris Session 2004, Report C4-305.

[55] M. REINHARD, V. HINRICHSEN, B. RICHTER, F. GREUTER (on behalf of CIGRÉ WG A3. 17). Energy handling capability of high-voltage metal-oxide surge arresters—Part 2: A results of a research test program. CIGRÉ Session 2008, 25-29. August 2008, Paris, Report A3-309.

[56] Cigre Technical Brochure 362 of 2008; Technical requirements for substation equipment exceeding 800 kV AC.

[57] Cigre Technical Brochure from WG A3. 22; Background of technical specifications for substation equipment exceeding 800 kV AC.
