



中华人民共和国国家标准

GB/T 311.2—2013
代替 GB/T 311.2—2002

绝缘配合 第2部分：使用导则

Insulation co-ordination—Part 2: Application guide

(IEC 60071-2:1996, MOD)

2013-02-07 发布

2013-07-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 符号及定义	2
4 运行中的代表性作用电压	5
4.1 作用电压的起源和分类	5
4.2 过电压保护装置的特性	5
4.2.1 一般说明	5
4.2.2 无间隙金属氧化物避雷器	5
4.2.3 有串联间隙的避雷器	6
4.2.4 火花间隙	6
4.3 代表性电压和过电压	6
4.3.1 持续(工频)电压	6
4.3.2 暂时过电压	6
4.3.3 缓波前过电压	9
4.3.4 快波前过电压	13
4.3.5 特快波前过电压	16
5 配合耐受电压	17
5.1 绝缘强度特性	17
5.1.1 概述	17
5.1.2 极性和过电压波形的影响	18
5.1.3 相间绝缘和纵绝缘	18
5.1.4 气候条件对外绝缘的影响	18
5.1.5 绝缘的破坏性放电概率	19
5.2 性能指标	20
5.3 绝缘配合程序	21
5.3.1 概述	21
5.3.2 持续(工频)电压和暂时过电压的绝缘配合	22
5.3.3 缓波前过电压的绝缘配合	23
5.3.4 快波前过电压下绝缘配合	25
6 要求耐受电压	26
6.1 概述	26
6.2 大气修正	26
6.2.1 概述	26
6.2.2 海拔修正	26
6.3 安全因数	26
6.3.1 概述	26

6.3.2	老化	27
6.3.3	生产和装配的分散性	27
6.3.4	耐受电压的偏差	27
6.3.5	推荐的安全因数(K_s)	27
7	标准(额定)耐受电压和试验程序	27
7.1	标准耐受电压	27
7.1.1	概述	27
7.1.2	标准操作冲击耐受电压	28
7.1.3	标准雷电冲击耐受电压	28
7.2	试验换算因数 K_t	29
7.3	用型式试验确定绝缘的耐受能力	29
7.3.1	绝缘类型与试验方法	29
7.3.2	非自恢复绝缘	30
7.3.3	自恢复绝缘	30
7.3.4	复合绝缘	30
7.3.5	试验程序的限制	31
7.3.6	型式试验程序的选择	31
7.3.7	型式试验电压的选择	32
8	对变电站的特殊考虑	32
8.1	概述	32
8.1.1	典型变电站	32
8.1.2	运行电压	33
8.1.3	暂时过电压	33
8.1.4	缓波前过电压	33
8.1.5	快波前过电压	33
8.2	过电压的绝缘配合	34
8.2.1	在范围 I 内 U_m 为 40.5 kV 及以下的配电系统中的变电站	34
8.2.2	在范围 I 内 U_m 为 72.5 kV 和 252 kV 之间的系统中的变电站	34
8.2.3	在范围 II 内系统中的变电站	34
附录 A (资料性附录) 接地故障引起的暂时过电压		36
附录 B (资料性附录) 维泊尔(Weibull)概率分布		39
B.1	一般说明	39
B.2	外绝缘的破坏性放电概率	39
B.3	过电压的累积频率分布	41
附录 C (资料性附录) 线路合闸和重合闸产生的代表性缓波前过电压的确定		43
C.1	一般说明	43
C.2	预期相对地过电压代表性幅值的概率分布	43
C.3	预期相间过电压代表性幅值的概率分布	43
C.4	绝缘特性	44
C.5	数值算例	46
附录 D (资料性附录) 变压器的传递过电压		50

D.1	一般说明	50
D.2	传递暂时过电压	50
D.3	容性传递冲击波	51
D.4	感性传递冲击波	52
附录 E (资料性附录)	雷电过电压	55
E.1	一般说明	55
E.2	确定临界距离(X_p)	55
E.3	代表性雷电过电压幅值的估算	56
E.4	简化法	58
E.5	代表性雷电过电压的设定最大值	59
E.6	代表性雷电过电压的 EMTP 行波法计算值	60
附录 F (资料性附录)	由实验数据计算空气间隙击穿强度	61
F.1	一般说明	61
F.2	对工频电压的绝缘响应特性	61
F.3	对缓波前过电压的绝缘响应	62
F.4	快波前过电压的绝缘响应	62
附录 G (资料性附录)	绝缘配合程序的示例	65
G.1	一般说明	65
G.2	范围 I 内系统(标称电压 220 kV)的数值示例	65
G.3	范围 II 设备的数值计算例	70
G.4	1 100 kV 设备的数值计算例	75
G.5	范围 I 内 $U_m=12$ kV 配电系统中变电站设备的数值计算	79
参考文献		83

前 言

GB 311《绝缘配合》已经或计划发布以下部分：

- 第 1 部分：定义、原则和规则；
- 第 2 部分：使用导则；
- 第 3 部分：高压直流换流站绝缘配合程序；
- 第 4 部分：电网绝缘配合及其模拟的计算导则。

本部分为 GB 311 的第 2 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 和 GB/T 20000.2—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 311.2—2002《绝缘配合 第 2 部分：高压输变电设备的绝缘配合使用导则》。

本部分结合最新修订的 GB 311.1—2012 在主要技术内容上与 IEC 60071-2:1996 等效，并结合我国实际进行补充和修改。

本部分与 GB/T 311.2—2002 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 将“电压修正因数 K_{vc} ”改为“确定性配合因数 K_{cd} ”，并更改了绝缘配合程序内容（见 5.3）；
- 删除了“为保证整套装置满足规定的冲击耐受电压的空气间隙”附录；
- 绝缘配合程序的计算示例中增加了 1 100 kV 设备的绝缘配合程序和绝缘水平算例（见附录 G）。

本部分修改采用 IEC 60071-2:1996《绝缘配合 第 2 部分：使用导则》，与 IEC 60071-2:1996 标准的技术性差异及其原因如下：

- 根据我国实际情况在“缓波前过电压”中增加“弧光接地过电压”（见 4.3.3）；
- 为了便于指导应用，在“绝缘配合程序”中增列了“绝缘配合方法的选用”的说明（见 5.3）；
- 由于海拔修正已在 GB 311.1—2012 中做了规定，因此本部分中不再说明；
- 给出我国变电站实际接线方式图（见 8.1 图 10）；
- 取我国典型设备最高电压 550 kV 作为“线路合闸和重合闸产生的代表性缓波前过电压的确定”的“数值算例”（见 C.5）；
- 取我国四个典型的设备最高电压：12 kV、252 kV、550 kV 和 1 100 kV 作为绝缘配合程序计算示例（见附录 G）；
- 因 GB 311.1 仅是输变电设备的绝缘配合，且架空线路的绝缘配合已有标准，故本部分未考虑架空线路的绝缘配合，这与 GB 311.1—2012 一致。

本部分与 IEC 60071-2:1996 的上述主要差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(|)进行了标示。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会(SAC/TC 163)归口。

本部分负责起草单位：西安高压电器研究院有限责任公司、国网电力科学研究院。

本部分参加起草单位：国家绝缘子避雷器质量监督检验中心、国家电力电容器质量监督检验中心、西安交通大学、中国电力科学研究院、昆明电器科学研究院、国网直流工程建设有限公司、南方电网技术研究中心、机械工业高压电器产品质量检测中心（沈阳）、陕西电力科学研究院、湖北省电力试验研究院、西安西电开关电气有限公司、新东北电气（沈阳）高压开关有限公司、河南平高电气股份有限公司、西安西电变压器有限责任公司、深圳电气科学研究所、桂林电力电容器有限责任公司、湖北省电力公司生产技术部、苏州华电电气股份有限公司、江西省电力科学研究院、西门子（中国）有限公司。

本部分主要起草人：王建生、谷定燮、崔东、周沛洪、贾涛、戴敏、王新霞、蔺跃宏。

GB/T 311.2—2013

本部分参加起草人:王亭、王森、杨左、肖敏英、廖学理、马为民、赵磊、周琼芳、郭洁、左强林、邓万婷、吕金壮、蔡汉生、黄莹、葛栋、殷晶辉、李银行、邓永辉、张姝、吴文海、李新春、阎关星、曾其武、卢军、程正、张鹏、余青、古龙江。

GB/T 311 的本部分所代替标准的历次版本发布情况为:

——GB/T 311.2—1988、GB/T 311.2—2002。

绝缘配合 第2部分:使用导则

1 范围

GB/T 311 的本部分将为正确执行 GB 311.1—2012《绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则》提供指导,以便经济合理地确定三相交流电力系统中输变电设备或成套装置的额定耐受电压、选取相应于设备最高电压 U_m 的标准绝缘水平。

本部分与 GB 311.1—2012 相对应,适用于高压交流输变电设备的相对地绝缘、相间绝缘和纵绝缘,并按设备最高电压分为两个范围,即范围 I 和范围 II。

与设备最高电压的关联性仅是为了绝缘配合的目的,本部分不包括对人员安全的要求。

本部分适用于标称电压为 1 kV 以上的三相交流系统,给出或推荐的数值一般也仅适用于这些系统。但是,提供的基本原则对两相和单相电力系统也是适用的。在导则中强调结合具体工程研究绝缘配合,以合理确定绝缘水平的必要性,这对范围 II 的设备更有意义。

本部分不考虑例行试验,有关例行试验由相关设备委员会规定。

本部分的内容严格遵循 GB 311.1—2012 给出的绝缘配合的程序(GB 311.1—2012 中图 1)。本部分第 2 章至第 5 章与 GB 311.1—2012 图 1 中相应的框格对应,给出了如何掌握绝缘配合程序原则的详细信息,求取要求耐受电压。

本部分强调,在绝缘配合程序的最初阶段,必须充分考虑到运行中作用电压的所有起因、分类以及类型,与设备最高电压的范围(范围 I、范围 II)无关。只有在程序的最后阶段,在选取标准(额定)耐受电压时,采用了用标准耐受电压涵盖特殊运行作用电压的原则,给出了 GB 311.1—2012 中标准绝缘水平与设备最高电压之间的对应关系。

附录中给出了支撑标准正文阐述的原则或解释所需的实例和详细信息以及采用的基本分析技术。

2 规范性引用文件

下列文件对于本部分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部分。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本部分。

GB 311.1—2012 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则(IEC 60071-1:2006 和 IEC 60071-1 1号修订:2010,MOD)

GB/T 772 高压绝缘子瓷件 技术条件

GB/T 7327 交流系统用碳化硅阀式避雷器

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

GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第1部分:一般定义和试验要求(IEC 60060-1:2010,MOD)

GB/T 26218.1 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(GB/T 26218.1—2010,IEC/TS 60815-1:2008,MOD)

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

3 符号及定义

本部分使用了下列符号和定义。符号后面括号中的是单位,无量纲的量用(—)表示。

A	(kV)	表征雷电影响的参数,对设备的严酷程度取决于连接到设备的架空线的类型
a_1	(m)	连接避雷器至线路的引线长度
a_2	(m)	连接避雷器至地的引线长度
a_3	(m)	避雷器和被保护的设备之间的相导线的长度
a_4	(m)	避雷器本体有效部分的长度
B	(—)	描述相间放电特性时使用的因数
C_e	(nF)	变压器一次绕组的对地电容
C_s	(nF)	变压器一次绕组的串联电容
C_2	(nF)	变压器二次绕组的对地电容
C_{12}	(nF)	变压器一次和二次绕组间的电容
C_{1in}	(nF)	三相变压器端子的等值入口电容(见附录 D)
C_{2in}	(nF)	三相变压器端子的等值入口电容(见附录 D)
C_{3in}	(nF)	三相变压器端子的等值入口电容(见附录 D)
c	(m/ μ s)	光速
c_f	(p. u.)	地线和架空线路的相导线之间的电压耦合因数
E_0	(kV/m)	土壤电离场强
F		表示过电压幅值累积分布的函数, $F(U)=1-P(U)$ 。见附录 C.3
f		表示过电压幅值的概率密度函数
g	(—)	容性传递冲击波的系数
H	(m)	海拔高度
h	(—)	经变压器传递冲击波的工频电压因数
H_t	(m)	离地面的高度
I	(kA)	雷电流幅值
I_g	(kA)	塔基电阻计算中雷电流的限值
J	(—)	经变压器感性传递冲击波的绕组因数
K	(—)	考虑间隙结构对电气强度影响的间隙因数
K_t	(—)	大气修正因数[参见 GB 311.1—2012,4.28]
K_a	(—)	海拔修正因数[参见 GB 311.1—2012,4.29]
K_c	(—)	配合因数[参见 GB 311.1—2012,4.25]
K_s	(—)	安全因数[参见 GB 311.1—2012,4.30]
K_{cd}	(—)	确定性配合因数
K_{co}	[μ s/(kVm)]	电晕阻尼常数
K_{cs}	(—)	统计配合因数
K_{ff}^+	(—)	正极性快波前冲击波的间隙因数
K_{ff}^-	(—)	负极性快波前冲击波的间隙因数
k	(—)	接地故障因数[参见 GB 311.1—2012,4.15]
L	(m)	避雷器和被保护设备间的距离
L_a	(m)	跳闸率等于可接受的故障率的架空线长度(与 R_a 有关)

L_t	(m)	雷电跳闸率等于变电站预设故障率的架空线长度(与 R_t 有关)
L_{sp}	(m)	档距
M	(—)	同时受过电压作用的并联绝缘的数目
N	(—)	自恢复绝缘的 U_{50} 和 U_0 间的标准偏差数值
n	(—)	估算侵入波过电压幅值时所考虑的接到变电站的架空线数目
P	(%)	自恢复绝缘的放电概率
P_w	(%)	自恢复绝缘的耐受概率
q	(—)	外绝缘耐受用大气修正因数计算公式中的指数
q_r	(—)	用于感性传递冲击波的变压器绕组的响应因数
R	(—)	故障风险率(每一事件的故障)
R_a	(1/a)	设备可接受的故障率。对于输电线路,此参数通常用 $(1/a)/100$ km 来表示
R_{hc}	(Ω)	大电流下的塔基电阻值
R_{km}	[1/(m · a)]	用于设计对应变电站前 1 km 架空线每年的跳闸率
R_t	(1/a)	临界距离内对架空线杆塔和屏蔽地线的雷击率
R_{lc}	(Ω)	小电流下的塔基电阻值
R_p	(1/a)	架空线的绕击率
R_{sf}	(1/a)	架空线的绕击闪络率
R_t	(1/a)	雷电过电压下变电站的预设故障率
R_u	(kV)	在 U^+/U^- 平面上表示相-相-地缓波前过电压的圆半径
R_0	(Ω)	零序电阻
R_1	(Ω)	正序电阻
R_2	(Ω)	负序电阻
S	(kV/ μ s)	侵入变电站的雷电冲击波的陡度
S_e	(kV)	相对地过电压分布的标准偏差
S_p	(kV)	相间过电压分布的标准偏差
S_{rp}	(kV/ μ s)	侵入变电站的雷电冲击波的典型陡度
s_e	(—)	标准偏差 S_e 的归一化值(S_e 相对于 U_{e50})
s_p	(—)	标准偏差 S_p 的归一化值(S_p 相对于 U_{p50})
T	(μ s)	雷电冲击的传播时间
U	(kV)	过电压(或电压)的幅值
U^+	(kV)	相间绝缘试验的正极性操作冲击波分量
U^-	(kV)	相间绝缘试验的负极性操作冲击波分量
U_0	(kV)	自恢复绝缘的放电概率函数 $F(U)$ 的截断值: $F(U \leq U_0) = 0$
U_0^+	(kV)	用于表示最苛刻的相间过电压的等值正极性相对地分量
U_{1e}	(kV)	变压器一次绕组中性点处的对地暂时过电压
U_{2e}	(kV)	变压器二次绕组中性点处的对地暂时过电压
U_{2N}	(kV)	变压器二次绕组的额定电压
U_{10}	(kV)	自恢复绝缘的 10% 放电电压值, 即 GB 311.1—2012 中规定的绝缘的统计耐
受电压		
U_{15}	(kV)	自恢复绝缘的 15% 放电电压值
U_{50}	(kV)	自恢复绝缘的 50% 放电电压值
U_{50M}	(kV)	M 个并联自恢复绝缘的 50% 放电电压值
U_{50RP}	(kV)	棒-板间隙的 50% 放电电压值

U_c^+	(kV)	定义表示相-相-地缓波前过电压的圆心的正极性分量
U_c^-	(kV)	定义表示相-相-地缓波前过电压的圆心的负极性分量
U_{cw}	(kV)	设备的配合耐受电压[参见 GB 311.1—2012,4.24]
U_e	(kV)	相对地过电压幅值
U_{e1}	(kV)	相对地过电压的累积分布 $F(U_e)$ 的截断值: $F(U_e \geq U_{e1}) = 0$; 见附录 C.3
U_{e2}	(kV)	2% 概率超过相对地过电压的值: $F(U_e \geq U_{e2}) = 0.02$; 见附录 C.3
U_{e50}	(kV)	相对地过电压的累积分布 $F(U_e)$ 的 50% 值; 见附录 C.3
U_1	(kV)	雷电过电压侵入冲击波的幅值
U_m	(kV)	设备最高电压[参见 GB 311.1—2012,4.10]
U_p	(kV)	相间过电压的幅值
U_{p2}	(kV)	2% 概率超过相间过电压的值: $F(U_p \geq U_{p2}) = 0.02$; 见附录 C.3
U_{p50}	(kV)	相间过电压的累积分布 $F(U_p)$ 的 50% 值; 见附录 C.3
U_{rw}	(kV)	要求耐受电压[参见 GB 311.1—2012,4.27]
U_s	(kV)	系统最高电压[参见 GB 311.1—2012,4.9]
U_w	(kV)	标准(额定)耐受电压[参见 GB 311.1—2012,4.34]
U_{ws}	(kV)	统计耐受电压
U_{pl}	(kV)	避雷器的雷电冲击保护水平[参见 GB 311.1—2012,4.21]
U_{ps}	(kV)	避雷器的操作冲击保护水平[参见 GB 311.1—2012,4.21]
U_{pt}	(kV)	相间过电压的累积分布 $F(U_p)$ 的截断值: $F(U_p \geq U_{pt}) = 0$; 见附录 C.3
U_{rp}	(kV)	代表性过电压幅值[参见 GB 311.1—2012,4.19]
U_{T1}	(kV)	作用在变压器一次绕组上的过电压经传递在二次绕组上产生的过电压
U_{T2}	(kV)	作用在变压器二次绕组上的过电压经传递在一次绕组上产生的过电压
u	(p. u.)	以 $U \sqrt{2} / \sqrt{3}$ 为基准值的过电压(或电压)幅值的标幺值
w	(—)	变压器二次对一次相间电压的比值
X	(m)	雷击点和变电站之间的距离
X_p	(km)	限定的架空线距离,必须考虑此距离内的雷击事件
X_T	(km)	在简化雷电过电压计算中使用的架空线长度
X_0	(Ω)	系统的零序电抗
X_1	(Ω)	系统的正序电抗
X_2	(Ω)	系统的负序电抗
x	(—)	自恢复绝缘的放电概率函数 $P(U)$ 中的归一化变量
x_M	(—)	M 个并联自恢复绝缘的放电概率函数 $P(U)$ 中的归一化变量
Z	(kV)	自恢复绝缘的放电概率函数 $P(U)$ 的标准偏差
Z_0	(Ω)	零序阻抗
Z_1	(Ω)	正序阻抗
Z_2	(Ω)	负序阻抗
Z_e	(Ω)	架空地线的波阻抗
Z_L	(Ω)	架空线的波阻抗
Z_M	(kV)	M 个并联自恢复绝缘的放电概率函数 $P(U)$ 的标准偏差
Z_s	(Ω)	变电站相导线的波阻抗
z	(—)	表示 U_{50} 的标准偏差 Z 的归一化值
a	(—)	负极性操作冲击分量与相间过电压的正负两个分量之和的比值
β	(kV)	维泊尔累积函数的尺度参数

δ	(kV)	维泊尔累积函数的截断值
Φ		高斯积分函数
ϕ	(—)	相间绝缘特性的倾角
γ	(—)	维泊尔累积函数的形状参数
σ	(p. u.)	过电压分布标准偏差(S_s 或 S_p)的标么值
ρ	(Ωm)	土壤电阻率
τ	(μs)	由于架空线上反击引起的雷电过电压的波尾时间常数

4 运行中的代表性作用电压

4.1 作用电压的起源和分类

在 GB 311.1—2012 中,作用电压按它们对绝缘或保护装置的影响,根据适当的参数分类,如工频电压的持续时间或过电压波形。这些类型的作用电压有几种起源:

- 持续(工频)电压:起源于正常运行条件下的系统运行。
- 暂时过电压:起源于故障、操作(如甩负荷)、谐振、非线性谐振(如铁磁谐振)或它们的组合。
- 缓波前过电压:起源于故障、操作或雷电直击架空线路导线。
- 快波前过电压:起源于操作、雷击或故障。
- 特快波前过电压:起源于气体绝缘变电站(GIS)的故障或操作。
- 联合过电压:可为上述任意一种起源。它发生于系统的相间(相对相),或系统同一相的不同部分(纵向)之间。

除联合过电压外,上述所有的过电压都将在 4.3 中作为单独条款进行讨论。联合过电压在这些条目的适当位置给出。

在各类作用电压中,宜考虑通过变压器的传递电压(参见附录 D)。

一般说来,各类过电压在电压范围 I 和范围 II 中都可能存在。然而,经验表明,在特定的电压范围内,某些类型的电压更为重要,这将在本部分中给出。应该指出,无论情况如何,只有使用系统及过电压限制装置特性的适当模型,通过详细研究才能获得对作用电压(峰值和波形)的深刻了解。

4.2 过电压保护装置的特性

4.2.1 一般说明

——标准化的保护装置:无间隙金属氧化物避雷器,见 GB 11032;

——有串联间隙的避雷器,见 GB/T 7327。

注 1:碳化硅阀式避雷器目前仍有少量在使用,制造厂已不生产,本部分不再考虑。

注 2:额定电压 52 kV 及以下带串联间隙金属氧化物避雷器,见 GB/T 28182。

此外,尽管我国及 IEC 中没有标准规定,火花间隙可作为替代性过电压限制装置。当使用其他类型的保护装置时,制造厂必须给出它们的保护性能,或通过试验确定。不同保护程度的保护装置的选取取决于多种因素,如被保护设备的重要性、运行中断的后果等。它们的特性将从绝缘配合的角度加以考虑,它们的影响将在涉及各种过电压的条款中给出。

为限制被保护设备上的过电压幅值,应设计和安装保护装置,以使在动作时保护装置和连线上的电压不超过可接受值。首要一点是在确定避雷器保护特性时必须考虑避雷器动作前和动作期间其两端间产生的电压。

4.2.2 无间隙金属氧化物避雷器

这种避雷器及其特性详见 GB 11032。

4.2.2.1 对快波前过电压的保护特性

金属氧化物避雷器的保护特性由下述电压确定：

- 陡波前冲击电流下的残压；
- 雷电冲击电流下的残压。

用于绝缘配合的雷电冲击保护水平取为选定标称放电电流下的最大残压。

4.2.2.2 对缓波前过电压的保护特性

用规定操作冲击电流下的残压来表征避雷器的保护特性。

用于绝缘配合目的的避雷器的操作冲击保护水平取为规定操作冲击电流下的最大残压。

这样估算保护水平给出的是代表一般可接受的近似值。金属氧化物避雷器保护性能的更详细信息可参见 GB 11032。

4.2.3 有串联间隙的避雷器

这种避雷器及其特性的定义参见 GB/T 28182,包括额定电压 52 kV 及以下交流配电系统用瓷外套或复合外套带内部串联间隙的金属氧化物避雷器。

额定电压 52 kV 及以下带内部串联间隙避雷器的保护特性由下述电压确定。

4.2.3.1 对快波前过电压的保护特性

- 陡波前冲击电流下的残压和波前放电电压；
- 雷电冲击电流下的残压和 1.2/50 μ s 冲击放电电压。

4.2.3.2 对缓波前过电压的保护特性

用规定操作冲击电流下的残压和操作冲击放电电压来表征避雷器的保护特性。

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。

4.2.4 火花间隙

火花间隙是由跨接在被保护设备两端的敞开式空气间隙构成的保护装置。火花间隙一般不用于 U_m 等于或大于 126 kV 的系统。间隙调整通常须综合考虑可靠保护和火花间隙动作的后果。

过电压保护特性由间隙在几种电压波形下的伏秒特性、放电电压分散性以及它的极性效应决定。因为没有标准,所以这些特性应由制造厂提供,或由用户根据自己的规范确定。

注：由于过电压特性,对有绕组的绝缘需考虑快速电压跌落和可能的后果。

4.3 代表性电压和过电压

4.3.1 持续(工频)电压

正常运行条件下,预计工频电压幅值会有一定变化,且系统各节点间也有差异。然而,从绝缘设计和绝缘配合的目的来说,代表性持续工频电压应视为恒定,并等于系统最高电压。实际上,对 72.5 kV 及以下的等级,系统最高电压 U_0 会低于设备最高电压 U_m ,而随着电压等级提高,两个值会趋于相等。

4.3.2 暂时过电压

4.3.2.1 概述

暂时过电压的特性由其幅值、波形和持续时间确定。所有参数均取决于过电压的起源,在过电压持

续时间内,其幅值和波形可能会产生变化。

就绝缘配合的目的来说,代表性暂时过电压波形可视为标准的短时(1 min)工频电压。其幅值可用一个值(假定最大值)、一组峰值或完整的峰值统计分布表示。选取代表性暂时过电压的幅值时应考虑:

- 运行中实际过电压的幅值和持续时间;
- 绝缘的工频幅值/持续时间耐受特性。

如后一特性未知,为简化起见,幅值可取为等于运行中持续时间小于 1 min 的实际最高过电压,持续时间可取为 1 min。

特殊情况下,可采用统计配合法,用运行中预期的暂时过电压的幅值/持续时间分布频率来表述代表性过电压。

4.3.2.2 接地故障

单相对地故障可能产生影响另外两相的相对地过电压。通常不产生相间或纵绝缘过电压。过电压波形是工频电压波形。

过电压幅值取决于系统中性点接地方式和故障位置。附录 A 给出了确定它们的导则。常规系统结构下,代表性过电压的幅值宜假定等于其最大值。非常规系统结构,例如在常规中性点接地的系统中,部分系统中性点不接地,则应考虑该部分失去中性点接地与接地故障同时发生的概率,应单独处理。

过电压持续时间是与故障持续时间相对应的(直至故障切除)。在中性点接地系统,该时间一般小于 1 s。在有故障切除的中性点谐振接地系统,该时间一般小于 10 s。无故障切除的系统,持续时间可达数小时。这种情况下,可能必须将持续工频电压规定为接地故障期间的暂时过电压值。

注:要注意,接地故障发生期间,健全相可能出现的工频最高电压不仅取决于接地故障因数,还取决于故障时的运行电压值,它一般可取为系统最高电压 U_0 。

4.3.2.3 甩负荷

甩负荷产生的相对地及纵向暂时过电压取决于甩掉的负荷大小、分断后的系统结构以及电源特性(变电站短路容量、发电机转速和电压调节等)。

若三相对地的电压升高相同,则出现的各相对地和相间过电压也相同。在长线路远端甩负荷的情况下,这种升高(Ferranti 效应)可能特别重要,它主要作用于远端变电站分闸的线路断路器的线路侧电器设备。

纵向暂时过电压取决于网络分断后两侧的相位差,最不利的可能情况是反相。

注:从过电压观点看,宜对各种系统结构类型作区分。例如,可考虑下列极端情况:

- 系统中的线路较短,变电站短路容量较大,因而产生的过电压较低;
- 系统中的线路很长,发电机处短路容量很小,超高压线路的建设初期往往是这种情况,这种系统如突然在线路末端甩掉很大负荷,则会产生非常高的过电压。

分析暂时过电压时,建议考虑以下情况(其中基准电压 1.0 p. u. 等于 $U_0\sqrt{2/3}$);

——中等分布的系统中,完全甩负荷导致的相对地过电压幅值通常低于 1.2 p. u.。过电压持续时间取决于电压控制设备的动作,可达几分钟。

——分布很广的系统中,完全甩负荷后,相对地过电压可达 1.5 p. u.,如产生 Ferranti 效应和谐振效应,甚至会更高。其持续时间约为数秒。

——如甩掉侧仅为静态负荷,纵向暂时过电压通常等于相对地过电压。在甩掉侧有电动机和发电机的系统中,电网解列可产生由两个相位相反的相对地过电压分量组成的纵向暂时过电压,其最大值通常低于 2.5 p. u.(对特殊情况,如分布很广的高压系统,可观测到更高值)。

4.3.2.4 谐振和铁磁谐振

有大容性元件(线路、电缆、串联补偿线路)和有非线性激磁特性的感性元件(变压器、并联电抗器)

的回路合闸,或甩负荷,因谐振和铁磁谐振会产生暂时过电压。

因谐振现象产生的暂时过电压可达到极高值。应通过 4.3.2.7 推荐的措施予以预防或加以限制。因此,通常不应把谐振过电压作为选择避雷器额定电压或绝缘设计的基础,除非这些预防或限制措施不够充分(见 4.3.2.8)。

4.3.2.5 同期操作期间的纵向过电压

代表性纵向暂时过电压可从运行中预期过电压求得,其幅值等于两倍相对地运行电压,持续时间为数秒到几分钟。

此外,如果同期操作很频繁,则应考虑发生接地故障的概率和其产生的过电压。这种情况下,代表性过电压幅值为一端上的接地故障过电压的假定最大值与另一端上的反相持续运行电压值之和。

4.3.2.6 暂时过电压起因的组合

只有在仔细研究了不同起因的暂时过电压同时发生的概率后,才能将暂时过电压起因组合。因为组合可导致选择更高的避雷器额定值,从而升高了保护水平和绝缘水平,所以只有不同起因的暂时过电压同时发生概率足够高时,这样做在技术和经济上才是合理的。

a) 接地故障加甩负荷

在线路接地故障期间,若负荷侧断路器首先分闸,切断负荷导致仍处于接地故障中的系统产生甩负荷过电压,直至电源侧断路器分闸,则可存在接地故障与甩负荷的组合。

甩掉负荷后的系统产生的暂时过电压又导致后续接地故障,也可能存在接地故障与甩负荷过电压的组合。然而因负荷变化产生的过电压本身就很低,且后续故障只有在极端条件下(如重污秽)才会发生,这种事件的概率很小。

如线路接地故障后断路器分闸失败,则这种组合也可能发生。其概率尽管很低却不可忽视,因为这些事件在统计上并不是孤立的。发生这种情况时,会使发电机通过变压器连至故障长线,从而在健全相产生相当高的过电压,该过电压由缓波前瞬态和变化的长时间暂时过电压组成,该暂时过电压是发电机特性和调速器—调压器作用的函数。

如果认为这种组合是可能的,则建议进行系统研究。如果不进行这种研究,则会使人们认为必须将这些过电压组合起来,但这样做是过于保守了,其理由如下:

——涉及甩负荷过电压时,其接地故障因数改变了。

——负荷变化后系统接线变化了。例如,中性点接地的发电机变压器在与系统脱离后,它的接地故障因数小于 1。

——对系统变压器,失去全部额定负荷是少见的。

b) 其他组合

因为谐振现象应该避免,所以谐振现象与其他起因的组合只作为谐振的附加结果考虑。然而,在某些系统中,并不能简单地避免谐振现象,对这样的系统,必须进行详细研究。

4.3.2.7 暂时过电压的限制

a) 接地故障过电压。接地故障过电压取决于系统参数,只有在系统设计阶段通过合理选取系统参数来控制。在中性点接地系统中,过电压幅值通常不太严重。然而也有例外,在中性点接地系统中处于异常情况的一部分(变压器中性点不接地)可能与系统分离。这种情况下,在分离部分,为控制产生高幅值过电压的接地故障持续时间,可通过开关和火花间隙将这些中性点快速接地,或特殊选择的中性点避雷器,其本身在过电压下击穿能将中性点短路。

b) 负荷突变。这类过电压可用并联电抗器、串联电容器或静止补偿器控制。

c) 谐振和铁磁谐振。这类过电压可通过改变系统结构或用阻尼电阻使系统偏离谐振频率的方法限制。

4.3.2.8 暂时过电压的避雷器保护

考虑到避雷器的能量吸收能力,通常根据预期暂时过电压的包络线选择避雷器额定电压。一般来说,对范围Ⅱ,使避雷器额定值与暂时过电压的匹配更为重要,因为该范围内的裕度低于范围Ⅰ。通常,避雷器在暂时过电压作用下的通流能力由制造厂提供的幅值/持续时间特性表示。

就使用目的来说,避雷器并不能限制暂时过电压。但一部分因谐振而引起的暂态过电压是个例外,避雷器可限制这种过电压。在这种使用情况下,应详细研究避雷器承受的热效应,以避免过热。

4.3.3 缓波前过电压

4.3.3.1 概述

缓波前过电压的波前时间为数十到数千微秒,波尾时间的数量级相同,且实际是振荡的。它一般起源于:

- 弧光接地过电压¹⁾;
- 线路合闸和重合闸;
- 故障和故障切除;
- 甩负荷;
- 开合容性或感性电流;
- 远方雷击架空线路导线。

代表性作用电压的特性为:

- 代表性电压波形;
- 代表性电压幅值,它可以是设定的最大过电压,也可为过电压幅值的概率分布。

代表性电压波形是标准操作冲击[波前时间(到峰值时间)为 250 μs ,半峰值时间为 2 500 μs]。代表性电压幅值可认为是与实际波前时间无关的过电压幅值。然而,在范围Ⅱ的某些系统,会产生波前非常长的过电压,求取代表性幅值时应将波前时间对绝缘强度的影响考虑在内。

无避雷器动作时过电压的概率分布特性用其 2% 值、偏差和截断值表示。尽管不是完全适用,但在 50% 值和截断值之间的概率分布可用高斯分布来近似。截断值以上的值可认为不存在。作为替代,也可使用修正的维泊尔(Weibull)分布(参见附录 B)。

代表性过电压的设定最大值等于过电压截断值(见 4.3.3.1~4.3.3.6),或避雷器操作冲击保护水平(见 4.3.3.9),取其中的较低值。

4.3.3.2 弧光接地过电压

由于接地电弧的不稳定燃烧,故障相重复接地所导致的过电压。

4.3.3.3 线路合闸和重合闸产生的过电压

三相线路合闸和重合闸会在线路三相中均产生操作过电压。因此,每次投切操作都会产生三个相对地及相应的三个相间的过电压^[1]。

估算实际应用中的过电压时,引入了几个简化。关于每次操作的过电压倍数,使用两种方法:

- 相峰值法(phase-peak method):每次投切操作中,每个相对地或每个相间过电压的最高峰值都包含在过电压概率分布内,即每次操作给代表性过电压概率分布提供三个峰值。因此假定每相的三个绝缘:相对地、相间和纵绝缘的过电压分布都是相同的。
- 事件峰值法(case-peak method):每次投切操作中,所有三相对地或三相相间过电压的最高峰值

1) 采标说明:根据我国实际情况增加此类过电压。

包含在过电压概率分布内,即每次操作对代表性过电压概率分布提供一个值。因此这种分布适用于各种绝缘类型的任一种。

线路合闸产生的过电压幅值取决于多种因素,包括断路器类型(有无合闸电阻)、合闸操作的母线侧系统特性和短路容量、被合闸线路的补偿特性及线路长度、线路末端的类型(开路、变压器、避雷器)等。

线路三相重合闸会因线路残余电荷产生很高的缓波前过电压。重合闸时,线路上维持的过电压(由残余电荷引起)幅值可高达暂时过电压峰值。该残余电荷的泄放取决于仍与线路连接的设备、绝缘子表面的导电率以及导线的电晕情况和重合闸时间。

正常系统中,单相重合闸过电压不会产生高于合闸过电压。然而,对谐振效应或 Ferranti 效应很显著的路径,单相重合闸会产生高于三相合闸过电压。

过电压幅值概率的正确分布只能用计算机或暂态分析仪等进行投切操作的详细模拟获得,图 1 所示的典型值只应视为一个粗略的导则。所有考虑都是针对线路开路端(受端)过电压的。送端过电压明显低于开路端过电压。由于附录 C 所述的理由,图 1 既可用于相峰值法,也可用于事件峰值法。

a) 相对地过电压

估算代表性过电压概率分布的步骤在附录 C 给出。

作为粗略导则,图 1 说明了相对地之间没有避雷器限制过电压时,预期的 2%过电压值(以 $U_n\sqrt{2/3}$ 为基准的标么值)的范围^[5]。图 1 数据的依据是大量现场结果和研究,包括了对确定过电压有影响的大部分因素。

图 1 宜用来表明某种情况下过电压是否高得足以产生问题。如果确实存在问题,则图中过电压值的范围表明了过电压可被限制到何种程度。为此需进行详细研究。

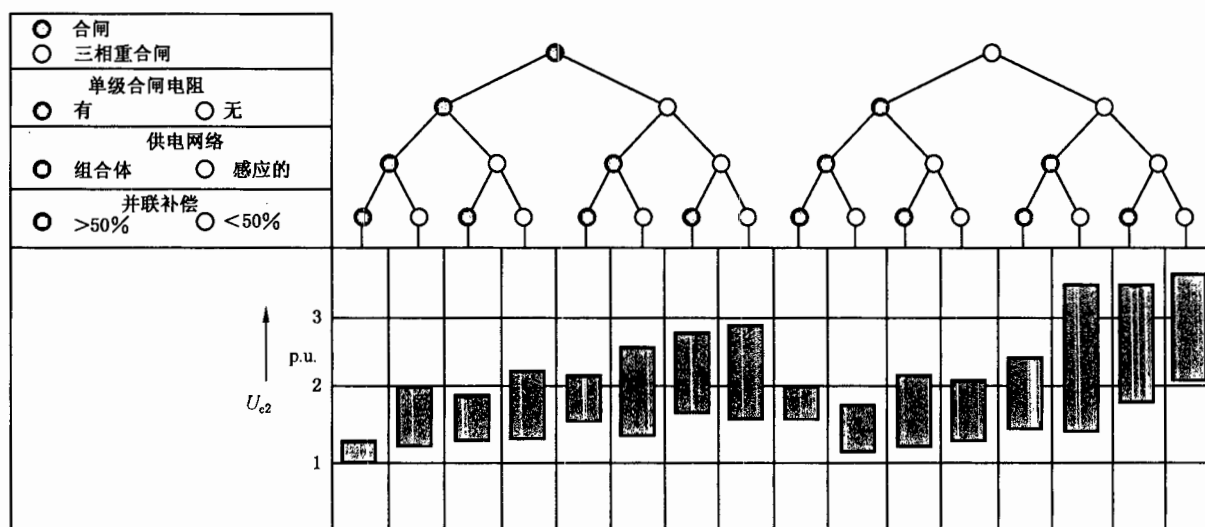


图 1 由于线路合闸和重合闸在线路受端处产生的 2%缓波前过电压的范围

b) 相间过电压

评估相间过电压时,需补充一些附加参数。因为相间绝缘对给定相间过电压值的两个相对分量的大小很敏感,特定时刻的选取应考虑绝缘特性。已选取了两个时刻:

- 相间过电压峰值时刻:该时刻给出相间过电压的最大值。它代表所有绝缘结构受到最大的作用电压。此时相间绝缘强度对相对地分量的大小不敏感。典型例子是绕组间绝缘或短空气间隙。
- 相对地过电压峰值时刻相对应的相间过电压:尽管该时刻给出的相间过电压低于相间过电压峰值,但它对那些相间绝缘强度受相对地分量大小影响的绝缘结构却可能更严苛。

如长空气间隙,相对地过电压为正极性峰值时最严苛;气体绝缘变电站(三相封闭式),相对地过电压为负极性峰值时最严苛。

相间过电压统计特性和属于两个时刻的电压值间的关系在附录 C 中描述。结论是除电压范围 II 的空气间隙外,对所有绝缘类型来说,代表性相间过电压都等于相间过电压峰值。对电压范围 II 的空气间隙,特别是系统电压等于或大于 500 kV 时,代表性过电压宜由相对地和相间过电压的峰值确定,如附录 C 所述。

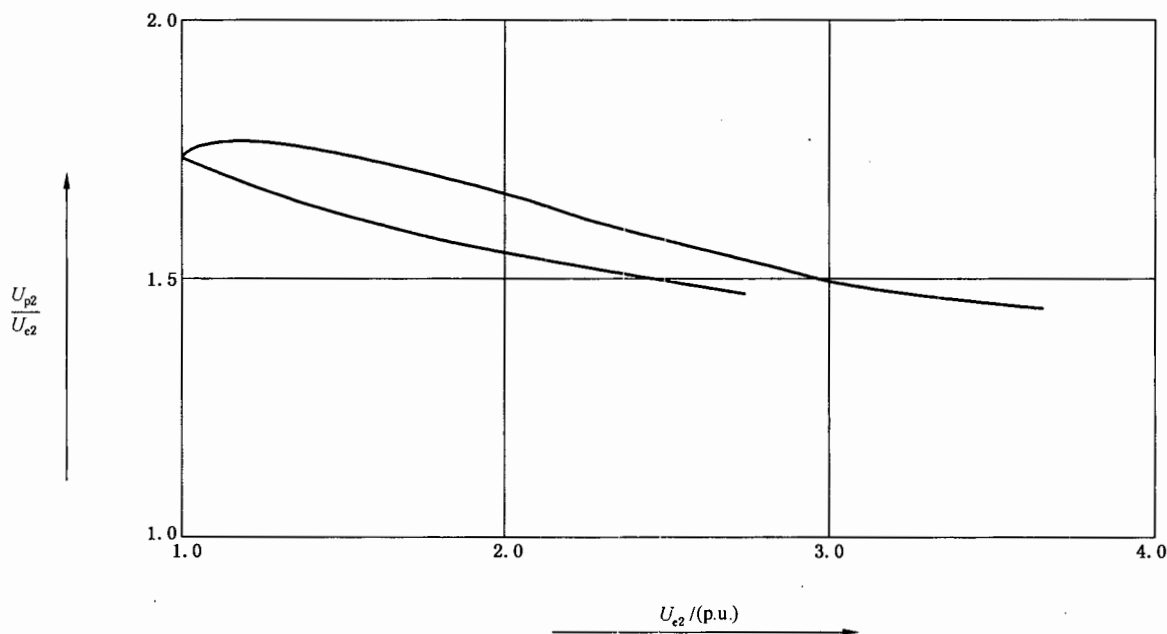
2%相间过电压值可从相对地过电压近似确定。图 2 是 2%相间过电压和 2%相对地过电压之比的可能范围。该范围的上限用于快速三相重合闸过电压,下限用于三相合闸过电压。

c) 纵向过电压

合闸和重合闸时,端子间的纵向过电压由一端的持续运行电压和另一端的操作过电压组成。在同步系统中,最高操作过电压和运行电压极性相同,纵向绝缘上的过电压低于相对地绝缘的过电压。

但非同步系统间的纵向绝缘可受到一个端子的合闸电压和另一端子的反极性正常运行电压峰值的作用。

对缓波前过电压分量,可采用有关相对地绝缘的同样原则。



说明:所示范围的上限适用于三相重合闸,下限适用于合闸。

图 2 2%相间和 2%相对地缓波前过电压值的比值

d) 过电压设定最大值

如果没有使用避雷器保护,则合闸和重合闸过电压设定最大值为:

- 相对地过电压:截断值 U_{et} ;
- 相间过电压:截断值 U_{pt} ,对范围 II 的外绝缘为按附录 C 确定的值,两者都再分为两个极性相反的相等分量;
- 纵向过电压:在一端合闸产生的相对地过电压截断值 U_{et} 和另一端正常运行电压的反极性峰值。

这样定义纵向过电压最大值是假定断路器两侧系统(通过并联回路)保持工频同步,因此纵向过电压不必再单独考虑重合闸情况(因为这种假定已把重合闸时的残余电荷影响考虑在内)。

4.3.3.4 故障和故障切除过电压

故障起始和故障切除可产生缓波前过电压,健全相电压从运行电压变为暂时过电压,而故障相电压则从零值返回运行电压。两种起因都仅产生相对地过电压。相间过电压可以忽略。设定代表性过电压最大值 U_{et} 的保守估计值如下:

——故障起始: $U_{et} = (2k - 1)U_s\sqrt{2/3}$ (kV, 峰值)

——故障切除: $U_{et} = 2.0U_s\sqrt{2/3}$ (kV, 峰值)

式中:

k ——接地故障因数。

在电压范围 I, 对变压器中性点绝缘或谐振接地系统, 应考虑接地故障产生的过电压。这种系统中, 接地故障因数约等于 $\sqrt{3}$ 。此时, 绝缘配合可以设定最大过电压为依据, 无需考虑其幅值分布。

在电压范围 II, 当合闸和重合闸过电压被限制到 2.0 p. u. 以下时, 如故障起始和故障切除过电压不是被控制到同一水平, 则需要对它们进行仔细研究。

4.3.3.5 甩负荷引起的过电压

甩负荷产生的过电压只对范围 II 内合闸和重合闸过电压被控制到 2.0 p. u. 以下的系统是重要的。这种情况下, 需对它们进行研究, 特别是涉及发电机变压器或长线时。

4.3.3.6 开合感性和容性电流引起的过电压

应重视开合感性和容性电流产生的过电压。特别宜考虑到下述投切操作:

- 切断电动机启动电流;
- 切断感性电流, 如切断变压器励磁电流或切除并联电抗器;
- 投切电弧炉及其变压器, 它可能导致电流截断;
- 投切空载电缆和电容器组;
- 用高压熔丝切断电流。

切断容性电流(切除空载线路、电缆或电容器组)时引起断路器的重击穿可产生特别危险的过电压, 必须使用无重击穿的断路器。而且电容器组, 特别是不接地电容器组投入时, 对相间过电压的估算必须非常慎重(参见 4.3.4.3)。

4.3.3.7 缓波前雷电过电压

长线路(大于 100 km)系统中, 缓波前雷电过电压起源于远方雷击导线。若雷电流很小, 不会引起线路绝缘闪络, 若雷击点与所考虑过电压的地点距离较远, 则会产生缓波前雷电过电压。

由于雷电流半峰值时间很少超过 200 μ s, 不会产生对绝缘有危险的高幅值和长波前时间的过电压, 因此缓波前雷电过电压对绝缘配合并不重要, 并通常被忽略。

4.3.3.8 缓波前过电压的限制

限制线路缓波前(操作)过电压最常用的方法是在线路断路器上装合闸电阻。也可使用其他手段, 如用相位控制和灭弧室跨接非线性电阻等限制线路合闸和投切容性和感性电流产生的过电压。

采用并联电抗器补偿长线路, 可降低工频过电压, 随之也降低了叠加其上的缓波前过电压。

线路端子上连接的电磁式电压互感器可有效降低线路分闸后各相的残余电荷, 从而可将三相重合闸产生的缓波前过电压限制到线路合闸产生的过电压水平。

4.3.3.9 缓波前过电压的避雷器保护

无间隙金属氧化物避雷器和特殊设计的有间隙避雷器适用于中等暂时过电压系统的缓波前过电压保护,而由于串联间隙的击穿特性,非线性电阻片型避雷器仅在极端工况下才对缓波前过电压动作。应该指出,当避雷器安装于长输电线路两端时,线路中部的过电压明显地高于线路两端的过电压。

作为一般原则,可假定金属氧化物避雷器将相对地过电压幅值(kV,峰值)限制到约两倍的避雷器额定电压(kV,有效值)。这意味着金属氧化物避雷器适合限制线路合闸和重合闸以及投切感性和容性电流产生的缓波前过电压,但一般不适合限制接地故障和故障切除产生的过电压,因为后者的预期幅值太低(产生于串补线路的故障和特高压工况可能出现例外)。

起源于线路合闸和重合闸的过电压在避雷器中产生的电流小于0.5 kA~2.0 kA。在此电流范围内,由于金属氧化物材料的极度非线性,了解电流的确切幅值并不重要。金属氧化物避雷器残压与电流波前时间之间依赖关系不大,这种关系对缓波前过电压也是可忽略的,而且在变电站内也不必考虑距离效应。然而远方架空线路绝缘受到的过电压作用可明显高于保护水平。

避雷器通常安装于相对地之间,而且应注意到,如果使用金属氧化物避雷器将缓波前过电压限制到未经控制的2%相对地过电压值的70%~80%,则相间过电压可达到避雷器相对地保护水平的两倍。此时相间过电压将由两个相对地分量组成,它们最常见的比例为1:1^[7]。

设定代表性最大相对地过电压等于避雷器保护水平: $U_{rp} = U_{ps}$ 。

对相间过电压,它等于(1.5~2.0)倍保护水平或附录C中确定的相间过电压截断值。如果要求更低的相间过电压,则应在相间额外安装避雷器。

对使用避雷器控制缓波前过电压的所有情况,选择避雷器等级时都应考虑所需的负载循环和通流要求。

4.3.4 快波前过电压

4.3.4.1 作用于架空线的雷电过电压

雷电过电压产生于雷直击相导线(绕击)、逆闪络(反击)或雷击线路附近地面的感应。雷电感应在架空线路上产生的过电压通常在400 kV以下,因而只对较低电压范围的系统才是重要的。由于绝缘强度较高,范围II的反击概率低于范围I,而在500 kV及以上系统则很少见。

雷电过电压的代表性波形是标准雷电冲击(1.2/50 μ s)。代表性幅值可用设定最大值或峰值概率分布给出。后者通常取决于过电压预设故障率下的峰值。

4.3.4.2 作用于变电站的雷电过电压

变电站的雷电过电压和它的发生概率取决于:

- 与变电站相连的架空线路的雷电性能;
- 变电站布置、尺寸,特别是进出线数;
- (雷击瞬间)运行电压的瞬时值。

变电站设备所受雷电过电压的严重程度决定于这三个因素的组合,为保证保护可靠,必须采取一些措施。雷电过电压幅值通常过高(未经避雷器限制的),不能以它们作为绝缘配合的基础。然而,某些情况下,特别是变电站进线段为电缆时,电缆低波阻抗为变电站提供的自保护可将雷电过电压幅值降至适当低值(参见附录E)。

对相间和纵绝缘,必须考虑另一端的瞬时工频电压值。对相间绝缘,可假定工频电压效应和架空线路导线间的耦合互相抵消,另一端可视为接地。对电压范围II工频电压效应比架空线路导线间的耦合大一些,宜适当考虑增大过电压值。然而,对纵绝缘不存在这种抵消效应,必须将工频电压考虑在内。

a) 绕击(直接雷击)

绕击可随机地发生于工频波形的任一点。纵绝缘另一端的工频电压的影响必须以下述方式考虑在内:

- 计算对运行电压各瞬时值下的雷电过电压预设故障率。
- 估算过电压中两分量不同划分比例下的绝缘故障概率。通常,两分量之和是决定性参数。
- 确定与雷电过电压和工频瞬时值之和相关的绝缘故障率。
- 将性能指标应用于该预期故障率,以获得所需的两分量之和。

如该电压分为雷电冲击分量和工频分量,雷电冲击分量等于代表性相对地雷电过电压,则工频电压分量将小于或等于运行电压相对地峰值。一般认为因数不小于 0.7 比较合适。这意味着,绕击时,代表性纵向过电压可由一个端子上的代表性对地雷电过电压和另一端子上的(0.7~1.0)倍反极性相对地运行电压峰值组成。

b) 反击(逆闪络)

反击最可能发生在具有反极性最高瞬时工频电压的相上。这意味着,对变电站来说,代表性纵向雷电过电压应等于一个端子上的代表性对地雷电过电压与另一端子上运行电压峰值(反极性)之和。

4.3.4.3 投切操作和故障引起的快波前过电压

主要在变电站内,当设备通过短连接线接入系统或断开时,会产生快波前操作过电压。外绝缘闪络时也会产生快波前过电压。这类事件可对临近的内绝缘(如绕组)产生极为严重的作用电压。

此过电压波形通常是振荡的,但就绝缘配合的目的而言,代表性过电压波形可认为是相应的标准雷电冲击(1.2/50 μs)。然而,对有绕组的设备要特别注意,因为其匝间会受到高电压的作用。

最大过电压峰值取决于投切设备的类型和性能。因为这类过电压的峰值通常低于雷电产生的过电压峰值,所以它们的重要性局限于某些特殊情况。从技术上说,完全可以用下列最大值表示代表性过电压的幅值特性[标么值,其基准值(1.0 p. u.)为 $U_n\sqrt{2/3}$]:

- 断路器无重击穿操作:2.0 p. u.;
- 断路器有重击穿操作:3.0 p. u.;

注:投切无功负荷时,某些类型的中压断路器会产生多次瞬态电流分断,如不采取适当保护措施可产生高达 6.0 p. u. 的过电压。

- 隔离开关操作:3.0 p. u.。

4.3.4.4 限制快波前过电压的措施

对输电线路,可通过适当的设计来限制雷电过电压的产生,其可能措施有:

- 对绕击,采用架空地线设计;
- 对反击,降低塔基接地阻抗或加强线路绝缘。

某些情况下,可在变电站附近使用接地横担或火花间隙,以限制雷电侵入波过电压的幅值。然而,这些措施都会提高变电站附近发生闪络的可能性,从而产生快波前冲击。此外,还要特别注意变电站附近接地线和杆塔的接地,以降低这一区域的反击概率。

恰当选择操作设备(无重击穿断路器、小电流截断特性、使用分闸或合闸电阻、相位控制)可降低投切操作产生的快波前过电压的严重程度。

4.3.4.5 快波前过电压的避雷器保护

避雷器对快波前过电压的保护取决于:

- 过电压幅值和波形;

- 避雷器保护特性；
- 通过避雷器的电流幅值和波形；
- 被保护设备的波阻抗和/或电容；
- 避雷器与被保护设备的距离，包括避雷器接地引下线(见图 3)；
- 进出线数量及其波阻抗。

为保护雷电过电压，通常采用下述标称放电电流的避雷器：

- 对范围 I 的系统：5 kA 或 10 kA；
- 对范围 II 的系统：10 kA 或 20 kA。

当预期通过避雷器的电流会大于其标称放电电流时，必须校核其相应残压是否仍能适于限制过电压。

为确定安装在变电站内的避雷器的能量吸收(雷电)，可假定到达变电站的预期代表性雷电过电压幅值等于架空线的负极性 50%雷电冲击放电电压。但对总的能量吸收，宜考虑多次雷击的概率。

避雷器的保护特性仅在其安装位置有效。因此限制被保护设备的过电压时，应考虑两者位置之间的距离。避雷器与被保护设备的间隔距离越大，对设备的保护作用越差，而且实际上施加于设备上的过电压高于避雷器保护水平，其差值随间隔距离加大而增加。此外，如在确定避雷器保护水平时忽略了避雷器本体长度的影响，则在估算避雷器限制过电压的效果时，必须将这一长度加到引线长度上去。对无间隙金属氧化物避雷器，材料本身的响应时间可忽略不计，避雷器长度应加到引线长度上。

简化估算被保护对象上的代表性过电压时，可使用公式(1)。然而，对变压器保护，使用公式(1)则必须慎重，因为大于几百皮法的电容可能导致更高的过电压。

$$U_{rp} = U_{pl} + 2ST \quad U_{pl} \geq 2ST \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$U_{rp} = 2U_{pl} \quad U_{pl} < 2ST \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中：

U_{pl} ——避雷器雷电冲击保护水平，单位为千伏(kV)；

S ——侵入波陡度，单位为千伏每微秒(kV/ μ s)；

T ——雷电波传播时间，按下式确定：

$$T = L/c$$

式中：

c ——光速， $c = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ；

$$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4, \text{图 3 中的距离(m)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

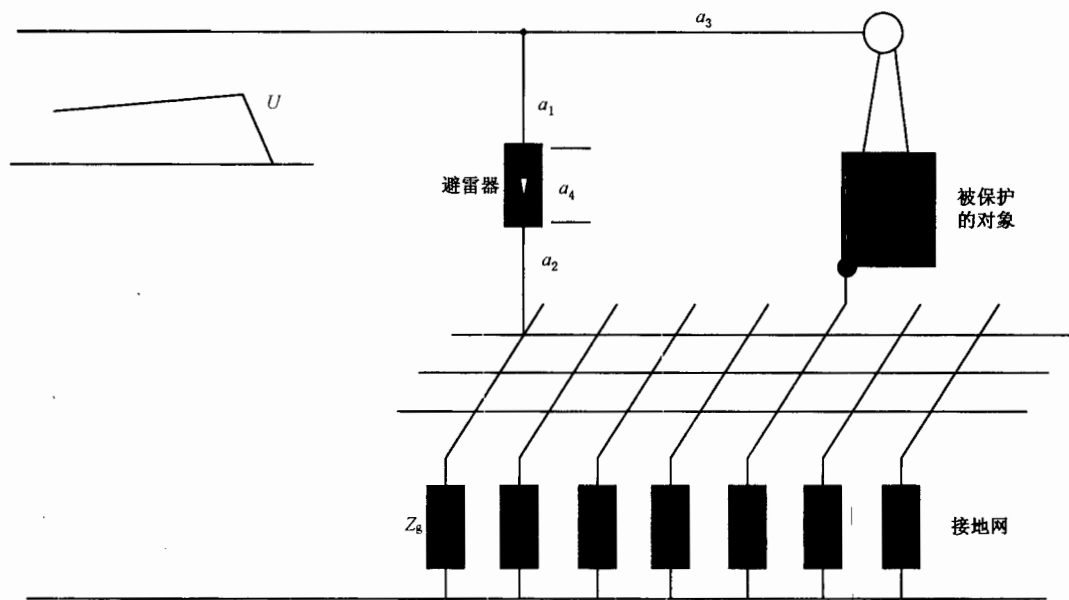
除考虑避雷器残压外，应该考虑避雷器上下引线及本体电感的影响。

陡度值必须按连接变电站的架空线的雷电性能和采用的变电站故障率确定。附录 E 给出了完整说明。

变电站的代表性雷电过电压幅值概率分布可通过瞬态过电压计算确定，要考虑输电线路的雷电性能，架空线和变电站的行波特性以及与过电压幅值和波形有关的设备绝缘和避雷器的性能，可参考附录 E。

作为一般性推荐，在确定代表性过电压幅值时，也应考虑绝缘耐受特性与过电压波形的关系。这特别适用于外绝缘和油-纸绝缘，对它们来说，代表性过电压幅值可能明显高于伏秒特性曲线波前时间对应的电压峰值。对 GIS 或固体绝缘这一差别可忽略不计，代表性过电压幅值即等于过电压峰值。

估算代表性雷电过电压幅值概率分布的简化法在附录 E 中给出。代表性雷电过电压的设定最大值为概率分布的截断值或根据现有系统经验得到的值，这些值的估算方法参见附录 E。



说明：

- a_1 ——避雷器到线路的引线长度；
- a_2 ——避雷器接地的引线长度；
- a_3 ——避雷器和被保护设备间的相导线长度；
- a_4 ——避雷器有效部分长度；
- Z_g ——接地电阻；
- U ——过电压侵入波。

图 3 避雷器与保护对象的接线图

4.3.5 特快波前过电压

GIS 内部故障或隔离开关操作时，因气体间隙的快速击穿及冲击波在 GIS 内部几乎无衰减的传播，可产生特快波前过电压。离开 GIS，例如在套管处，特快波前过电压幅值迅速衰减，其波前时间通常将增大到快波前过电压范围。特快波前过电压也可发生在与开关设备连线很短的中压干式变压器上。

该过电压波形的特点是电压迅速上升，接近峰值，导致 $0.1 \mu\text{s}$ 以下的波前时间。对于隔离开关操作，在该波前之后紧随着典型频率为 1 MHz 以上的振荡。特快波前过电压的持续时间小于 3 ms，但可发生多次。过电压幅值取决于隔离开关结构和变电站接线，其最大幅值可达到 2.5 p. u.，该过电压在与 GIS 直接连接的变压器上可产生高的局部过电压。

与 GIS 相连设备（如变压器）会因 GIS 的内部故障而受到过电压作用。过电压的波形和幅值取决于设备与 GIS 的连接方式以及 GIS 内部的故障位置。过电压幅值可达击穿电压的 1.6 倍，且所含频率可达 20 MHz。

在通过短高压架空线与 GIS 相连的设备端子上，过电压的振荡频率在 0.2 MHz~2.0 MHz 范围内，幅值可达闪络电压的 1.5 倍，这种情况下，可用避雷器对设备进行保护。然而，由于部分绕组的谐振，此频率的过电压分量仍可在变压器绕组内引起高的内部作用电压，可能有必要仔细研究其他的保护方式。这些措施可包括通过安装附加电容改变（降低）频率，然而，采用这种方法时必须注意保证确切了解变压器的谐振特性。

由于目前尚没有相应的标准，因而还不能确定代表性过电压。然而，估计特快波前过电压对选择额定耐受电压无影响。

5 配合耐受电压

5.1 绝缘强度特性

5.1.1 概述

在所有材料中,导电是由带电粒子移动引起的。导体具有大量的自由电子,它们在外施电场中漂移;而绝缘体拥有很少量的自由电子,当作用在绝缘材料中的电压增加到足够高的水平时,沿绝缘体路径上的电阻率从高值变化到与导体可以比拟的值,此变化称之为击穿。

发生击穿的三个主要阶段:

- 在一点或多点处开始电离;
- 间隙两端间电离通道发展;
- 间隙桥接并转为自持放电。

影响绝缘电气强度的因素很多,包括:

- 施加电压的幅值、波形、持续时间和极性;
- 绝缘中电场分布:均匀或非均匀电场,间隙附近的电极和它们的电位;
- 绝缘的类型:气体、液体、固体或它们的组合,出现杂质和局部不均匀性;
- 绝缘的物理状态:温度、压力和其他周围条件、机械应力等,绝缘的历史状况同样可能具有重要性;
- 在应力、化学效应、导体表面效应等作用下绝缘的变形。

在空气中的击穿主要取决于间隙的布置和外施作用电压的极性和波形。此外,对所有作用电压(波形和极性),大气条件对击穿强度有影响。从实验室获得的空气击穿强度的关系曲线测量结果是按 GB/T 16927.1—2011 规定换算到了标准大气条件,即:

- 温度:20 °C;
- 压力:101.3 kPa(1 013 mbar);
- 绝对湿度:11 g/m³。

至于包括低空气密度、高相对湿度、污秽、冰和雪、高温和燃灰的存在的非标准条件,也进行了实验室测量。

对于户外绝缘,温度、雨和表面污秽的影响变得非常重要。GB/T 16927.1—2011 中还规定了对于在干和湿条件下外绝缘的试验程序。对于金属封闭气体绝缘开关设备,内部压力和温度以及局部不均匀和杂质的影响起重要作用。

在液体绝缘中,由化学和物理作用或局部放电引起的颗粒杂质、气泡可能会严重降低绝缘强度。还要强调指出绝缘的化学劣化程度可能具有随时间而增加的趋势,这种情况同样也适用于固体绝缘。此时,电气强度还要受机械作用的影响。

实际上,击穿过程还具有统计特性且应予以考虑。由于自恢复绝缘的恢复特性,它对作用电压的统计特性可由适当的试验得到,因此,自恢复绝缘一般用相应于 90% 耐受概率的统计耐受电压表示。对于非自恢复绝缘,绝缘强度的统计特性一般不能用试验得到,因而采用相应于 100% 的耐受概率的设定耐受电压。

风对于绝缘设计有影响,尤其是在架空线路使用悬垂绝缘子串的情况。在工频和操作冲击电压下选择间隙长度时,风的影响一般显得更重要。

5.1.1~5.1.4 给出有关影响绝缘特性的不同因素。对于更详细的资料,可参考 CIGRE 技术文献^[7]。

5.1.2 极性和过电压波形的影响

5.1.2.1 过电压极性的影响

在高电压下的典型电极的几何形状中,大多数情况下,带电导体所承受的电压远高于接地导体。对于空气绝缘,如果承受高电压的电极带正电,则间隙的击穿电压较之带负电时为低。这是因为,在正极性电压下比在负极性电压下电离的传播更容易形成。

在两个电极所承受的电压近似相等的情况下,将包含正负两个特性的正、负极性两个放电过程。对于特定绝缘系统和间隙布置,如果知道某个极性更严苛,则将根据该极性设计;否则两个极性都要考虑。

5.1.2.2 过电压波形的影响

在冲击作用下,击穿电压一般还与冲击的波形有关。

对于缓波前冲击,冲击的波前对于外绝缘的强度的影响比波尾的影响大。只有当外绝缘表面有污秽时波尾的影响才特别重要。内绝缘的强度假定仅受峰值的影响。

对于外绝缘,存在一特有现象,即每一个间隙长度都有一个击穿电压为最小的冲击波前时间(临界波前时间)。通常最小击穿电压的波前时间在缓波前过电压的波前时间范围内,间隙愈长最小击穿电压值愈明显。对于范围Ⅰ内的空气间隙最小击穿电压影响小且可以忽略。对于范围Ⅱ内的空气间隙最小击穿电压,不论目的和用途,均等于波前时间为标准的 $250\ \mu\text{s}$ 下的击穿电压。这就是说,用绝缘在标准电压波形($250/2\ 500\ \mu\text{s}$)下的耐受电压作为对缓波前过电压的绝缘设计是保守的。对于一些系统中缓波前过电压所具有的波前时间比标准的长得多,则可优先采用在这些波前下较高的绝缘强度。

在雷电冲击作用下外绝缘的击穿电压随波尾持续时间的增加而降低。对于耐受电压,此降低可忽略,击穿电压假定等于在标准雷电冲击($1.2/50\ \mu\text{s}$)下的值。然而,当考虑雷电过电压波形和其影响时,例如由避雷器保护的敞开式变电站中可能会出现绝缘强度的某些降低。

5.1.3 相间绝缘和纵绝缘

相间和纵绝缘结构的绝缘强度取决于两个端子上的两个电压分量之间的关系,这对范围Ⅱ内的外绝缘或金属封闭变电站是很重要的。

对于范围Ⅱ内的外绝缘,绝缘对操作过电压的响应取决于正、负极性作用电压分量的关系 α 值(见附录 C)。因此应进行验证耐受电压试验以便反映这一现象。

在 GB 311.1—2012 中标准化的代表性过电压波形是具有相反极性的两个同步分量组成的联合过电压;正极性分量是标准操作冲击,而负极性分量是具有波前和波尾时间不小于正极性分量波前和波尾时间的冲击。因为相间和纵绝缘受两个分量的比值影响,所以将实际过电压幅值换算到代表性过电压幅值时,要考虑绝缘这种响应特性(见 4.3.3.3 和附录 C 给出的特例)。

对纵绝缘结构,电压分量由代表性过电压确定(见第 4 章)。

当取 50% 闪络电压作为施加到两个端子上的分量总和时,5.1.4 中给出的相对地绝缘强度的标准偏差也适用于相间或纵绝缘的外绝缘。

5.1.4 气候条件对外绝缘的影响

空气间隙的闪络电压取决于空气中的水分含量和空气密度。绝缘强度随绝对湿度增加而增加(直至绝缘表面形成凝露);随空气密度减小而降低。GB/T 16927.1—2011 给出了空气密度和绝对湿度对不同类型作用电压影响的详细论述。

在确定绝缘耐受电压时,从强度的观点应考虑到最不利的条件(即低的绝对湿度、低气压和高温)一

般不会同时出现。此外,在给定地点,不论作何用途,对所采用的修正中,湿度和周围温度的变化可能会相互抵消。因此,通常可根据安装处的平均周围条件估算强度。

对绝缘子,应考虑到由于雪、冰、露或雾可能会使耐受电压降低。

5.1.5 绝缘的破坏性放电概率

对单个非自恢复绝缘的破坏性放电概率,目前无法确定。所以,假定绝缘在规定耐受电压下的耐受概率从 0 变到 100%。

对于自恢复绝缘,可用统计的方法表示绝缘对施加给定波形的冲击电压的耐受能力。对于给定的绝缘、给定的波形和不同峰值电压 U 的冲击波,放电概率 P 可与每一个可能的 U 值有关,于是建立起关系 $P=P(U)$ 。通常函数 P 随 U 值单调增加,所得到的曲线可由三个参数表示:

- U_{50} : 对应于绝缘具有 50% 闪络或耐受概率下的电压。
- Z : 表示闪络电压分散性的标准偏差。规定为对应 50% 和 16% 闪络概率的电压间的差。

即:

$$Z = U_{50} - U_{16} \quad \dots\dots\dots (4)$$

- U_0 : 截断电压,低于此值时破坏性放电不可能发生的最大电压。然而,在实际试验中不可能确定此值。

通常, P 完全由参数 U_{50} 、 Z 和 U_0 表示的数学函数(累积概率分布)表示。在传统使用的高斯分布中, U_{50} 也是平均值,而标准偏差直接从公式(4)中求取。为了简单起见通常不考虑截断电压。

统计法适用于缓波前过电压的绝缘配合,使用公式(5)给出的修正的维泊尔累积概率分布相对高斯分布具有优点(在附录 B 中给出了解释)。公式(5)表示维泊尔累积函数,选取其参数使其在 50% 和 16% 闪络概率时的高斯累积概率函数相匹配,且在 $U_{50} - NZ$ 处分布截断(见附录 B)。

$$P(U) = 1 - 0.5^{(1+\frac{U-U_{50}}{Z})^\gamma} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

x ——对应于 U 的标准偏差, $x = (U - U_{50})/Z$;

N ——对应截断电压 U_0 的标准偏差, $P(U_0) = 0$ 。

在高斯概率分布的一个标准偏差 ($x = -1$) 下,公式(5)中 $P(U) = 0.16$ 。如果在公式(5)中选择 $N=4$,那么 γ 的准确值为 4.83。将此值近似取 $\gamma=5$ 不会引起任何明显误差,因此,本部分推荐修正的维泊尔分布,用公式(6)表示。

$$P(U) = 1 - 0.5^{(1+\frac{U-U_{50}}{Z})^5} \quad \dots\dots\dots (6)$$

图 4 表示此修正的维泊尔分布和高斯分布,两者吻合。

图 5 表示在高斯概率刻度上的同一分布。

对于外绝缘预期性能的统计计算,应当利用从现场或实验室试验中获得的详细数据。在缺少这些数据的情况下,对统计计算推荐采用下列从大量的试验结果中获得的标准偏差值:

—— 对于雷电冲击: $Z = 0.03U_{50}$ (kV)

—— 对于操作冲击: $Z = 0.06U_{50}$ (kV)

以上偏差已包括气象条件(见 5.1.4)的影响。

GB 311.1—2012 中的参数 U_{10} [由公式(7)求取] 相当于 90% 的耐受概率,用耐受概率分布和偏差表示:

$$U_{10} = U_{50} - 1.3Z \quad \dots\dots\dots (7)$$

附录 B 给出了适用于同时受到电压作用的许多并联绝缘的详细资料和统计公式。

附录 F 给出了有关确定不同类型过电压作用下的空气绝缘的击穿强度的导则。

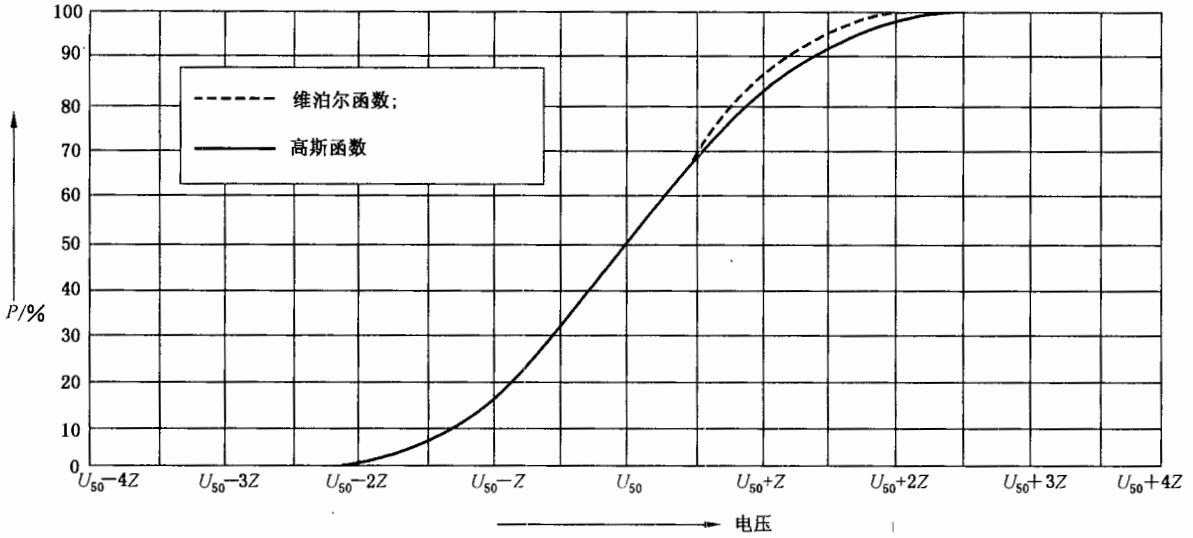


图 4 在线性刻度上表示的自恢复绝缘的破坏性放电概率

5.2 性能指标

按 GB 311.1—2012 的定义,在运行中所要求的设备绝缘的性能指标以其可接受的故障率(R_a)表征。根据运行期间绝缘故障数来评价系统中设备的绝缘性能。

不同的系统结构、系统中的不同部分、不同设备和故障类型所产生的故障后果的严重程度是不同的。例如,在环网式系统中出现的永久性线路故障或因缓波前过电压导致的不成功重合闸产生的后果与母线故障或放射状系统中的相同故障相比,其严重程度要轻些。据此,宜取不同的故障率或对不同的系统、系统和设备制造发展不同的阶段取不同的绝缘水平。当然这要结合具体工程情况计算比较确定。对变电站设备,由于过电压引起的可接受的故障率在 IEC 60071-2 中取(0.001~0.004)/年,这和我国的长期经验和运行统计结果大体是一致的。对架空线路,由于雷击引起的可接受的故障率为(0.1~20)/100 公里·年(最高值适用于配电线路);相应地由于操作过电压引起的可接受的故障率的范围为(0.01~0.001)/每次操作。这些可接受的故障率的范围与我国的运行统计结果数量级相同。

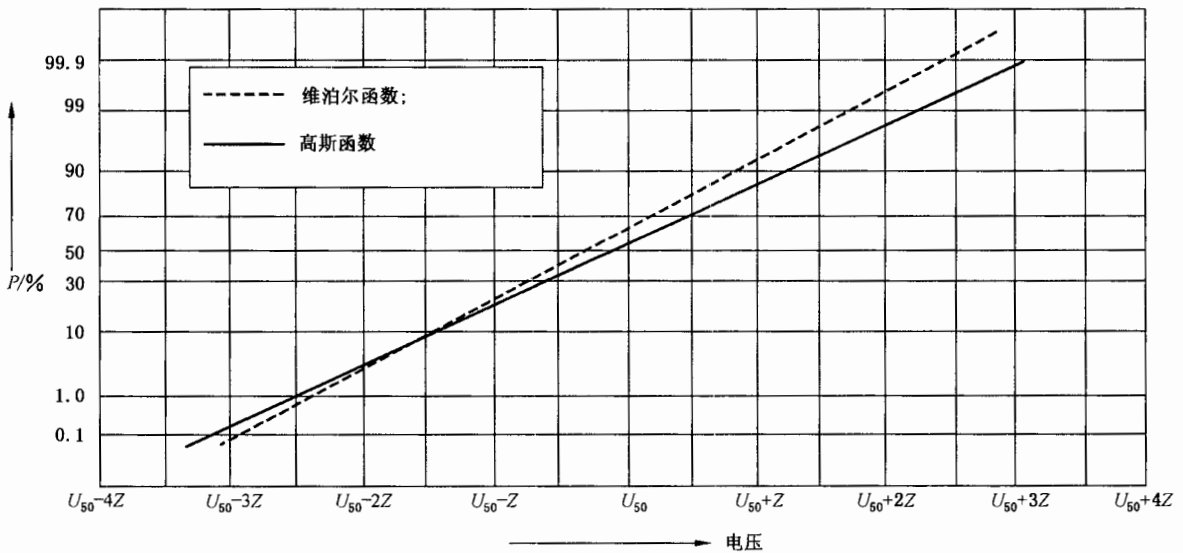


图 5 在高斯刻度上表示的自恢复绝缘的破坏性放电概率

5.3 绝缘配合程序

5.3.1 概述

确定配合耐受电压应首先求取绝缘的最低耐受电压值,最低耐受电压值应满足在运行条件下绝缘承受各种类型代表性过电压时相应的性能指标。

对于瞬态过电压的绝缘配合使用两种方法:确定性法(惯用法)和统计法。然而在许多实用程序中往往是两种方法的综合。例如,在确定性法中采用的某些因数可能是从统计中得到的;在统计法中往往忽略某些统计变量。

a) 确定性法(惯用法)

当无法从试验中得到有关设备预期的运行故障率统计资料时,则采用确定性法。

——当绝缘强度取惯用设定耐受电压($P_w = 100\%$)时,耐受电压值等于配合耐受电压。配合耐受电压由代表性过电压(一个设定的最大值)乘以配合因数 K_c , K_c 考虑了设定的两个值(设定耐受电压和设定代表性过电压)不确定度的影响。

——对外绝缘,当绝缘强度取统计耐受电压时($P_w = 90\%$), K_c 同样需考虑统计耐受电压与设定耐受电压之间的差异。

确定性法不涉及运行中设备可能发生的故障率。

典型的确定性法应用例如:

——当用避雷器保护设备绝缘时,缓波前过电压下,设备内绝缘的绝缘配合;

——用避雷器限制连接架空线的设备上的雷电过电压时,可用同类设备的已有经验进行绝缘配合。

b) 统计法

统计法是以某一特定过电压起因发生的频次、由该起因引起的过电压概率分布以及绝缘的放电概率为依据,并结合同时计算过电压及其放电概率来确定故障率,考虑过电压和放电的统计特性,用适当统计程序(如蒙特卡洛法)逐点进行计算。

通过对不同绝缘类型以及不同系统运行方式的反复计算,以获得因绝缘故障导致的系统的总停电率。

应用统计法进行绝缘配合使得直接评估绝缘的故障率具有可行性,而故障率是系统设计的要素。

原则上,如果停电损失能与不同类型故障相关联,优化绝缘设计也是可能的。实际上,由于很难估算系统在不同运行方式下同样的绝缘故障造成的后果和由于输送容量损失的不确定程度,优化绝缘设计很困难。加上统计法随机因素较多,而且某些随机因素的统计规律还有待于资料累积和认识。因此,通常系统绝缘尺寸宁可偏大而不是最佳值。系统绝缘设计仅基于比较不同设计方案带来的风险。

故障率的不确定度取决于过电压出现概率和绝缘放电概率的不确定度。由于两者的准确度较低,导致算得的故障率准确度不够高。绝缘配合中的统计法当前主要用来进行敏感性分析,研究分析各有关因素对故障率的影响,使设计人员能在更全面、更合理的基础上对绝缘配合作出决定。

c) 绝缘配合方法的选用²⁾

在 GB 311.1—2012 中,绝缘配合的统计法仅用于:

1) 自恢复型绝缘;

2) 电压范围 II 的设备在操作过电压下的绝缘配合。

在这些条件下,便于定量估算绝缘的故障率。操作过电压可能成为控制因素,且降低绝缘水平可能带来明显的经济效益。

简化统计法是按确定性法的思路简便地应用统计法,其前提仍是要有过电压和绝缘特性各自的统

2) 采标说明:为方便指导应用,增列了两种配合方法的选用。

计分布。

当受到某些实际条件的限制或设备绝缘水平的变动并无显著的效益时,一般采用确定性法(惯用法),所涵盖的应用范围较广,包括:

- 所有设备的非自恢复绝缘;
- 范围 I 设备在各电压和过电压下的绝缘配合;
- 雷电过电压下设备的绝缘配合。

对这些不推荐采用统计法是因为:

- 虽然在某些假定条件下可以计算在雷电过电压下的线路的闪络率,但变电站设备上的雷电过电压的统计分布尚无完整的表述;
- 非自恢复型绝缘的击穿概率的统计分布很难得知,且在绝缘耐受电压试验时,只能施加有限次数的冲击电压;
- 在电压范围 I 内,设备绝缘水平的改变所产生的经济效果较小。

电压范围 I 和 II 设备绝缘配合程序的示例参见附录 G。

5.3.2 持续(工频)电压和暂时过电压的绝缘配合

5.3.2.1 概述

有关绝缘配合程序应考虑持续工频电压和暂时过电压对设备外绝缘污秽和内绝缘老化的影响,这涉及运行中实际过电压的幅值和持续时间以及设备绝缘对工频电压幅值/持续时间的耐受特性。

持续(工频)电压下的配合耐受电压取为:

- 相间:最高系统电压 U_s ;
- 相对地: $U_s/\sqrt{3}$ 。

即,4.3.1 中给出的代表性电压的设定最大值。其持续时间等于整个运行寿命。

当采用确定性法时,配合短时耐受电压等于代表性暂时过电压;而采用统计法且代表性暂时过电压是以幅值/持续时间分布频率特性表示(见 4.3.2)时,应确定满足性能指标的绝缘,配合耐受电压的幅值应等于绝缘幅值/持续时间耐受特性曲线上对应 1 min 时刻的值。

5.3.2.2 污秽

存在污秽时,外绝缘对工频电压所呈现的特性变得重要并可能支配着外绝缘的设计。当表面有污秽或由于无明显冲洗作用的小雨、雪、露或雾而变湿时通常发生绝缘闪络。

在 GB/T 26218.1 中给出了每一污秽等级所对应的典型周围环境给出说明。绝缘子应以可接受的闪络率在污秽条件下持续耐受最高系统电压。要求绝缘耐受电压等于代表性过电压并根据区域的污秽严重程度选择适合的耐受污秽度,以满足性能指标。因此,长持续时间的工频配合耐受电压,对于相间绝缘子应为相应的最高系统电压,而对相对地绝缘子应当为最高系统电压除以 $\sqrt{3}$ 。

不同类型的绝缘子甚至同一类型的绝缘子处于不同方向在同一环境下积聚的污秽程度可能不同。此外,同一污秽等级,它们可能呈现出不同的闪络特性。而且,在污秽物质的性质上的改变可能会使某些形状的绝缘子比其他形状的绝缘子更有影响。因此,作为绝缘配合之目的,应对使用的每一类型绝缘子确定污秽严重程度。

在具有高污秽等级的地区,可考虑给绝缘子涂复合材料或冲洗。

对污秽条件下用以检验绝缘子的耐受情况的试验要求由有关设备委员会规定。

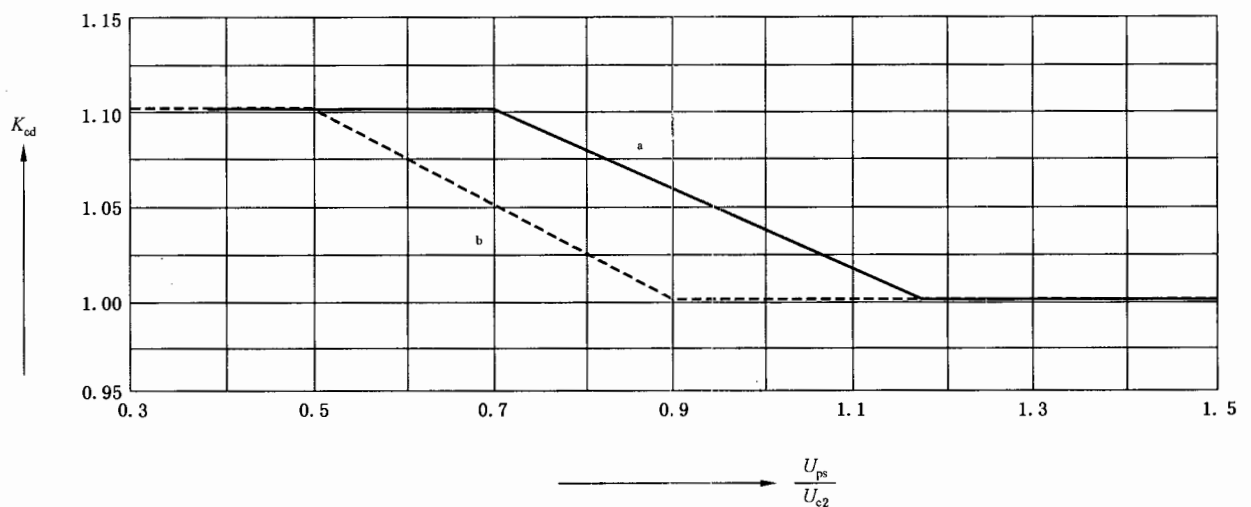
5.3.3 缓波前过电压的绝缘配合

5.3.3.1 确定性法

确定性法包括确定作用在设备上的最大电压,然后以一定的裕度选取该设备的最小绝缘强度,所取裕度应包括确定这些数值时存在的不确定度。将相应的代表性过电压的设定最大值乘以确定性配合因数 K_{cd} 求得配合耐受电压。

对避雷器保护的设备,设定最大过电压等于避雷器的操作冲击保护水平 U_{ps} 。但和预期的缓波前过电压幅值相比,过电压的统计分布可能发生严重偏斜、不对称的情况。避雷器的保护水平愈低,偏斜愈明显。所以,绝缘耐受强度或避雷器保护水平之值的小变化可能对故障率有大的影响^[4]。考虑到这一影响,建议根据 U_{ps} 对预期的相对地统计操作过电压 U_{c2} (2% 之值) 之比来估算确定性配合因数 K_{cd} 。图 6 给出了这种关系。

对不受避雷器保护的设备,设定最大过电压等于按 4.3.3.3 确定的过电压统计分布曲线上的截断值 (U_{et} 或 U_{pt}), 且确定性配合因数 $K_{cd} = 1$ 。



a 适用于避雷器保护水平的配合因数,以获得相对地代表性操作过电压水平(也适用于纵绝缘);

b 适用于两倍避雷器保护水平的配合因数,以获得相间代表性操作过电压水平。

注: 根据我国实际运行经验, K_{cd} 可取 1.0。

图 6 确定性配合因数 K_{cd} 的估算

5.3.3.2 统计法及相应的故障风险率

采用统计法时,首先需要根据技术经济分析及运行经验确定可接受的故障风险率(如 5.2 所述)。

故障风险率给出绝缘故障的概率。故障率用预期的绝缘故障的平均频率表示(例如,每年的故障数),作为过电压作用引起的事件结果;为了计算故障率,必须研究引起这类过电压的事件及其数值。幸好,对绝缘设计很重要的事件类型很少,使得此方法能实用。

本部分中推荐的统计法是基于过电压的峰值。对于特定事件的相对地过电压的频率分布根据下述假定确定:

——对任何给定的过电压的波形,除了最高峰值外,其他峰值都忽略;

——认为最高峰值过电压的波形与标准操作冲击的波形相同;

——所有最高过电压峰值都取为相同极性,即是对绝缘最严的极性。

一旦过电压的频率分布以及相应绝缘的击穿概率分布给定,相对地绝缘的故障风险率可按公式(8)

和公式(9)计算:

$$R = \int_0^{\infty} f(U) \times P(U) dU \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中:

$f(U)$ ——过电压的概率密度;

$P(U)$ ——冲击电压 U 作用下的绝缘的闪络概率(见图 7)。

$$R = \int_{U_{50}-4Z}^{U_1} f(U) \times P(U) dU \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中:

$f(U)$ ——用截断高斯或维泊尔函数表示的过电压出现的概率密度;

$P(U)$ ——用修正的维泊尔函数表示的绝缘的放电概率;

U_1 ——过电压概率分布的截断值;

$U_{50}-4Z$ ——放电概率分布的截断值。

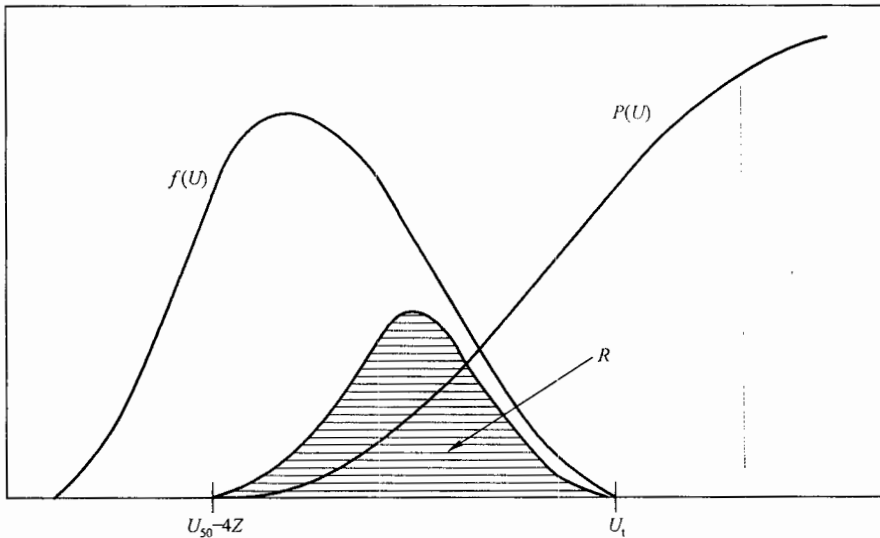


图 7 故障风险率的估算

如果出现多个独立峰值,则一相的总故障风险率可以按所考虑的全部峰值的故障风险率来计算。例如,如果在特定的相上的一次操作冲击包含三个正的峰值,引起的故障风险率分别是 R_1 、 R_2 和 R_3 ,则对于投切操作的相对地的故障风险率由公式(10)计算:

$$R = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \quad \dots\dots\dots(10)$$

如果过电压分布基于相峰值法(见 4.3.3.3),且三相中的绝缘是相同的,则总的故障风险率由公式(11)计算:

$$R_{\text{总}} = 1 - (1 - R)^3 \quad \dots\dots\dots(11)$$

如果使用事件峰值法,则总的故障率是 $R_{\text{总}} = R$ 。

注:如果过电压的一个极性明显地对绝缘耐受更为严格,则故障风险率值可除以 2。

对于相对地和相间绝缘的故障风险率,只有当两种绝缘之间的距离足够大,以至于对地闪络和相间闪络的机理不基于同一物理事件,才可用简单的方法单独计算。如果相对地和相间绝缘不具有共用的电极,此单独计算方法才有效。如果它们具有共用的电极,则故障风险率通常小于单独计算值。

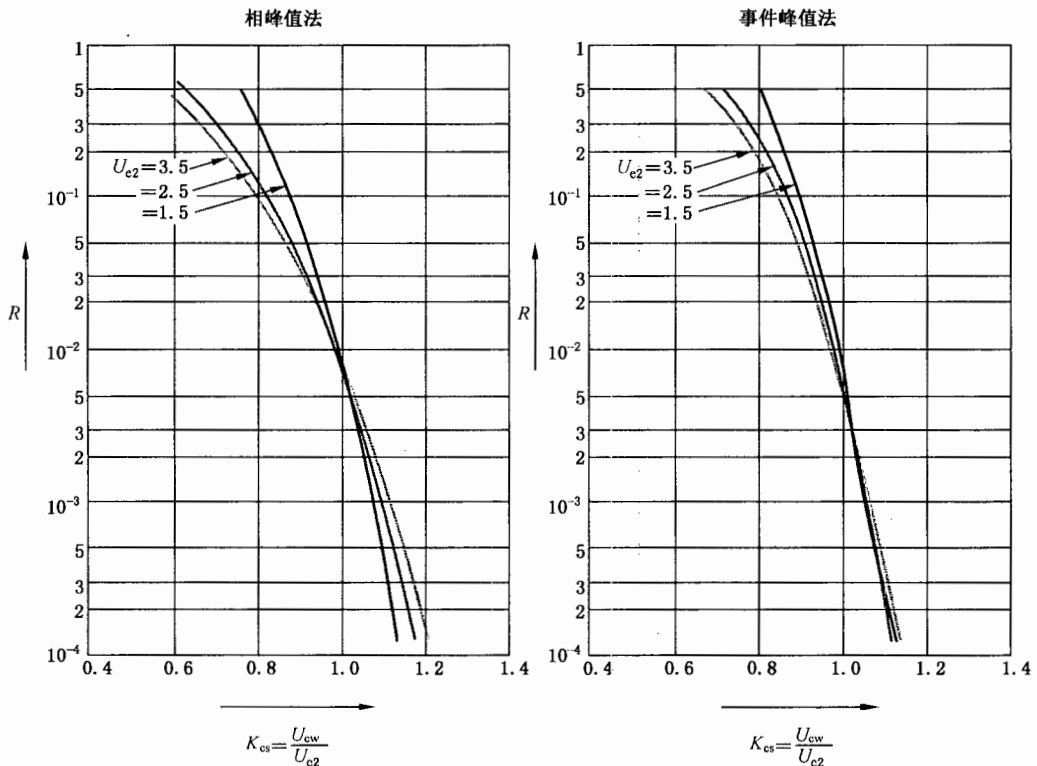
对于把统计方法应用于许多相同的并联绝缘的重要场合,详见附录 B。

对缓波前过电压的简化统计方法:

若假定用各自曲线上的一个点能够确定过电压和绝缘强度的分布,则根据冲击波的幅值可以用简化统计法。用统计过电压标记过电压分布,超过该过电压的概率为2%。用统计耐受电压标记绝缘强度分布,在该电压下绝缘呈现90%的耐受概率。统计配合因数(K_{cs})是统计耐受电压与统计过电压之比。

统计配合因数和故障风险率之间的关系仅略微受到过电压分布参数变化的影响。这是由于在所考虑的故障风险率范围内选取作为过电压参考概率的2%值恰好落在对故障风险率起主要作用的过电压分布的那一部分上。

图8表示,当对作用电压采用高斯分布,对绝缘强度采用修正的维泊尔分布时,附录C中概述的采用相峰值和事件峰值两种方法计算出的故障风险率与统计配合因数之间的关系的一个例子。曲线已考虑了这样的事实:即标准偏差是附录C中给出的2%过电压值的函数。绝缘强度的偏差中极端的变化导致过电压明显地呈非高斯分布,尤其是过电压的波形会使曲线误差达一个数量级。另一方面,曲线表明故障风险率变化一个数量级,仅相当于电气强度变化了5%。



说明: 过电压参数见 4.3.3.3 和附录 C; 绝缘强度参数见 5.1.4。

图 8 缓波前过电压下外绝缘的故障率与统计配合因数 K_{cs} 的关系

5.3.4 快波前过电压下绝缘配合

5.3.4.1 确定性法

对快波前雷电过电压,取过电压的设定最大值计算配合耐受电压,确定性配合因数 $K_{cd} = 1$ 。这是因为计算雷电代表性过电压包括了概率影响。对快波前操作过电压,可采用与缓波前过电压一样的方法(见 5.3.2.1)。

5.3.4.2 统计法

本部分推荐的统计法是基于代表性雷电过电压的概率分布(见附录 E)。由于过电压的概率分布是

通过雷电过电压预设故障率除以总的过电压次数求得的,且概率密度函数 $f(U)$ 是结果的求导,因此可以用 5.3.3.2 中给出的程序来计算故障风险率,而绝缘故障率等于故障风险率乘以总的雷电过电压次数。

对内绝缘,设定耐受电压的耐受概率为 100%。高于该电压下的耐受概率为零。这意味着配合耐受电压为预设故障率等于可接受的故障率时的代表性雷电过电压幅值。

注:估算由于雷电引起的快波前过电压时没有考虑瞬时的工频电压,因此忽略了反极性的联合作用情况。只要工频幅值与快波前过电压的幅值相比很小时,这是可以接受的。对范围 II 以及范围 I 中 U_m 较高的油纸内绝缘的设备如变压器来说,可能不保守了。而且,本部分中所述的绝缘配合实例中并没有严格考虑这类设备由于在端子上出现的作用电压所引起的内部电压(如匝间)。

对外绝缘,放电概率的标准偏差与过电压的分散性相比通常较小,作为简化,可以忽略其影响,且可以采用与内绝缘一样的公式。

6 要求耐受电压

6.1 概述

在规定的标准型式试验条件和标准参考大气下检验要求耐受电压,应考虑可能降低运行中绝缘强度的所有因素以使在安装处设备的寿命期间满足绝缘耐受电压。为达此目标,应当考虑两个典型的校正因数:

- 与大气条件有关的修正因数;
- 考虑绝缘的实际运行条件和标准耐受试验中的条件之间差别的修正因数(称安全因数)。

6.2 大气修正³⁾

6.2.1 概述

对于内绝缘,可假定大气条件对其特性无影响。

外绝缘耐受电压的大气条件修正见 GB/T 16927.1—2011,对绝缘配合来说,应采用下列建议:

- 1) 空气间隙和清洁绝缘子,必须对配合操作和雷电冲击耐受电压进行修正;对要求进行污秽试验的绝缘子,还需要对长时间工频耐受电压进行修正。
- 2) 确定大气修正因数时,可以假定环境温度和湿度的影响相互抵消,因此,对绝缘配合来说,无论是干燥绝缘还是湿绝缘,只需考虑设备安装点的海拔高度。

注:该假定可认为适用于绝缘子外形不会因雨水明显降低其耐受电压的情况,对伞间距较小的绝缘子,雨水可能会使伞裙桥接,此时,该假定可能不完全正确。

6.2.2 海拔修正

见 GB 311.1—2012 的附录 B。

6.3 安全因数

6.3.1 概述

对电气绝缘,其主要影响因素和相关的运行方式相应于下列作用:

- 热作用;
- 电气作用;

3) 采标说明:因 GB 311.1 对大气条件、海拔修正作了明确的规定,所以本部分未采纳 IEC 相关内容。

- 环境作用；
 - 机械作用。
- 安全因数用于补偿：
- 设备装配中的差异；
 - 产品质量的分散性；
 - 安装质量；
 - 预期寿命时间内绝缘的老化；
 - 其他未知影响。

在不同类型的设备之间,安全因数的重要程度和作用方式可能不同。

6.3.2 老化

由于热、电、化学的作用或机械作用或其综合作用,运行中所有设备的电气绝缘都会老化。

为绝缘配合的目的,假定外绝缘不会老化。但对包含有机材料的外绝缘的老化须认真研究,特别是用于户外条件时。

对内绝缘,老化影响可能很重要,须采用 6.3.5 给出的安全因数。

6.3.3 生产和装配的分散性

额定耐受电压常常在一个有代表性的装配部件上或仅对绝缘系统的一部分作型式试验来验证。由于结构或绝缘条件不同,运行中的设备可能和型式试验时的不同。设备运行的耐受电压可能低于额定值。

对工厂中完全装配好的设备,对绝缘配合来说,其分散性甚小,可忽略。

对现场装配的设备,实际的耐受电压可能低于要求的耐受电压,这要在安全因数中予以考虑(见 6.3.4)。

6.3.4 耐受电压的偏差

对外绝缘,除包含在所选型式试验程序内的统计偏差外,还应考虑试验布置和运行中实际布置引起的可能偏差和试验室内周围物体的影响。

对内绝缘,在 GB 311.1—2012 中假定耐受概率为 100%,通常用 3 次冲击进行冲击型式试验,安全因数应包括这一试验的统计不确定度。

6.3.5 推荐的安全因数(K_s)

如果有关设备委员会没有规定,则采用下列安全因数:

- 对内绝缘: $K_s=1.15$;
- 对外绝缘: $K_s=1.05$ 。

注:对电压范围 II 的 GIS,可采用较高的安全因数。在此情况下,可考虑现场试验。

7 标准(额定)耐受电压和试验程序

7.1 标准耐受电压

7.1.1 概述

GB 311.1—2012 的表 2 和表 3 分别对电压范围 I 和范围 II 规定了标准绝缘水平 U_w 。在两个表中,标准耐受电压是一组与设备最高电压 U_m 的标准值相关联的标准绝缘水平。

范围Ⅰ设备的标准绝缘水平是额定雷电冲击耐受电压和额定短时工频耐受电压两者的组合；范围Ⅱ设备的标准绝缘水平则是额定雷电冲击耐受电压和额定操作冲击耐受电压的组合。根据我国惯例，表3也列出了相应的额定短时工频耐受电压。

对系统标称电压为220 kV及以上的设备至少给出了两个绝缘水平供在不同的条件下选用。

对系统标称电压为20 kV及以下的设备给出了绝缘水平的两个系列：系列Ⅰ和系列Ⅱ。GB 311.1—2012的表4和表5按设备分类分别给出了额定雷电冲击耐受电压和额定短时工频耐受电压，其值主要来自表2和表3，可能更便于在制定设备标准时引用。

GB 311.1—2012的表6是据我国惯例给出电力变压器中性点绝缘水平。

GB 311.1—2012中给出的标准绝缘水平反映了我国长期的经验和研究结果，也含有国外的不少经验，并考虑了已有的技术进步和新的过电压保护装置和限制过电压措施。至于特定的标准绝缘水平则宜按本部分所述之绝缘配合程序并考虑有关特定设备的绝缘特性选取。

7.1.2 标准操作冲击耐受电压

对特定设备最高电压在GB 311.1—2012表3中选取标准操作冲击耐受电压时宜作以下考虑：

- a) 对缓波前(操作)过电压受避雷器保护的设备：
 - 暂时过电压的预期值；
 - 已有避雷器的特性；
 - 设备的操作冲击耐受电压和避雷器保护水平之间的配合因数和安全因数。
- b) 对缓波前(操作)过电压不受避雷器保护的设备：
 - 在设备安装点出现过电压的可能范围内可接受的破坏性放电的风险率；
 - 从经济角度要求的过电压控制程度、可通过仔细选择操作装置和系统设计予以实现。

7.1.3 标准雷电冲击耐受电压

在GB 311.1—2012表3中选取与特定的标准操作冲击耐受电压相关联的标准雷电冲击耐受电压时宜作以下考虑：

- a) 对受避雷器有效保护的设备，宜选取较低的雷电冲击耐受电压。但应考虑避雷器能够达到的雷电冲击保护水平和操作冲击保护水平之比并选择适当的裕度。
- b) 对不受避雷器保护的设备(或非有效保护)，应采用较高的雷电冲击耐受电压。这些数值是根据设备(如断路器、隔离开关、互感器等)外绝缘的雷电和操作冲击耐受电压的典型比值决定的。这样，绝缘设计将主要由外绝缘耐受操作冲击试验电压的能力确定。
- c) 在少数极端情况下，须采用更高的雷电冲击耐受电压，此值宜由GB 311.1—2012中6.8标准系列值中选取。

在范围Ⅰ，标准短时工频或/和雷电冲击耐受电压涵盖了相对地、相间以及纵绝缘耐受操作冲击的要求。

在范围Ⅱ，如果有关设备委员会无规定，则标准操作冲击耐受电压涵盖了持续工频电压和要求的短时工频耐受电压。

为了满足上述一般要求，必须用7.2给出的试验换算因数把要求耐受电压换算到规定的标准耐受电压的电压波形。从已有结果中得到的试验换算因数对额定耐受电压来讲数值偏保守。因此，它们仅用于特定的场合。

GB 311.1—2012中把因设备内绝缘老化或外绝缘污秽情况下的性能所需的长时工频耐受电压试验留给有关产品委员会去考虑。

7.2 试验换算因数 K

范围 I 和范围 II 的 K , 分别列于表 1 和表 2, 供在没有恰当的换算因数时使用(若无相关设备委员会规定)。这些换算因数均适用于设备的相对地、相间和纵绝缘。

表 1 范围 I 由要求的操作冲击耐受电压换算成短时工频和雷电冲击耐受电压的试验换算因数

绝 缘	短时工频耐受电压 ^a	雷电冲击耐受电压
外绝缘		
——空气间隙和清洁的绝缘子, 干状态		
• 相对地;	$0.6 + U_{rw}/8\ 500$	$1.05 + U_{rw}/6\ 000$
• 相间。	$0.6 + U_{rw}/12\ 700$	$1.05 + U_{rw}/9\ 000$
——清洁的绝缘子, 湿状态	0.6	1.3
内绝缘		
——GIS;	0.7	1.25
——液体浸渍绝缘;	0.5	1.10
——固体绝缘	0.5	1.00
注: U_{rw} 是要求的操作冲击耐受电压(单位: kV)。		
^a 试验换算因数包括由峰值变换成方均根值的因数 $1/\sqrt{2}$ 。		

7.3 用型式试验确定绝缘的耐受能力

7.3.1 绝缘类型与试验方法

绝缘的电气强度通过试验来检验。给出下述资料和指导以便帮助从绝缘配合角度考虑来选取最合适型式试验。

对于给定的设备选择试验类型时应考虑设备的绝缘特性。

根据绝缘在试验中发生破坏性放电的特征, 在 GB 311.1—2012 中把绝缘分成自恢复绝缘和非自恢复绝缘。

事实上, 一台设备的绝缘结构大都是由自恢复绝缘和非自恢复绝缘两种绝缘组成。因此, 一般不能简单地把一台设备的绝缘说成是自恢复和非自恢复型的。仅当在所有感兴趣的电压范围内, 在一台设备的自恢复绝缘部分发生沿面或贯穿性放电的概率可以忽略不计时(此时整台设备的放电概率与其自恢复绝缘部分的放电概率一致), 才可以称其绝缘为自恢复型的, 或者相反。

表 2 范围 II 内由要求的短时工频电压换算成操作冲击耐受电压的试验换算因数

绝 缘	操作冲击耐受电压
外绝缘	
——空气间隙和清洁的绝缘子, 干状态;	1.4
——清洁的绝缘子, 湿状态	1.7
内绝缘	
——GIS;	1.6
——液体浸渍绝缘;	2.3
——固体绝缘	2.0
注: 试验换算因数包括由 r. m. s 值换成峰值的因数 $\sqrt{2}$ 。	

7.3.2 非自恢复绝缘

在非自恢复绝缘的情况下,破坏性放电会损坏绝缘的绝缘性能,即使没有引起破坏性放电的试验电压也可能影响绝缘。例如,工频过电压试验和极性相反的冲击试验可能在聚合物绝缘内引发树枝形击穿,在液体和液体浸渍绝缘内产生气体。由于这些原因,试验非自恢复绝缘时,在标准耐受水平下施加有限次数的试验电压,即按 GB/T 16927.1—2011 的 7.3.1.1 的耐受电压试验程序 A,每一极性下施加 3 次冲击,如果没有发生破坏性放电,则试验合格。

作为绝缘配合目的,对于通过此试验的设备应认为其设定的耐受电压等于施加的试验电压(即额定耐受电压)。由于试验的冲击次数有限和不允许故障发生,所以无法推导出关于设备实际耐受电压的有用的统计资料。

对含有非自恢复和自恢复两种绝缘的一些设备,作为绝缘配合的目的,如果试验时破坏性放电会对非自恢复绝缘部分产生严重的损坏(如变压器试验时,装有标准冲击耐受电压较高的套管),则对这类设备,应看作为非自恢复绝缘。

7.3.3 自恢复绝缘

在自恢复绝缘的情况下,试验电压可能施加多次,加压次数仅受试验制约而不受绝缘本身限制,甚至在存在击穿放电的情况下也是如此。施加多次试验电压的优点在于,可求得绝缘耐受的统计资料。GB/T 16927.1—2011 标准化了供选择的三种方法从而可估算 90% 耐受电压。作为绝缘配合的目的,以每组 7 次冲击和至少 8 组的升降法是确定 U_{50} 的优先选用的方法。可用假定的一个标准偏差推出 U_{10} (见 5.1.4)或用多级法试验确定 U_{10} 。关于试验方法统计意义的评价可参阅 GB/T 16927.1—2011 的附录 A。

7.3.4 复合绝缘

对于自恢复绝缘和非自恢复绝缘不能分开试验的设备(如套管、电缆终端和仪用互感器),在所用的方法中必须采取兼顾双方面的要求。这就必须不损害符合要求的非自恢复绝缘,与此同时,还要试图保证试验适当地鉴别符合要求的和不符合要求的自恢复绝缘。一方面非自恢复绝缘部件要求施加有限次数的试验电压;另一方面,自恢复绝缘需要施加多次试验电压(具有选择性)。经验表明,GB/T 16927.1—2011 的耐受电压试验程序 B(15 次冲击,在自恢复绝缘部件上允许不超过 2 次破坏性放电)是可接受的折衷办法。

其选择性可表示为通过试验的概率达 5% 和 95% 的实际耐受水平之间的差,参考表 3。

于是,用程序 B 试验的设备,若在可接受的边界线上(U_{10} 下额定的和实际试验的),设备通过试验的概率为 82%。好一点的设备所具有的耐受电压 U_{10} 比标准值 U_w 高 $0.32Z$ (在其 $U_{5.5}$ 下时额定的和试验的电压之间的差值),通过试验的概率为 95%。差一点的设备所具有的耐受电压 U_{10} 比标准值 U_w 低 $0.92Z$ (在其 U_{36} 下时额定的和试验的电压之间的差值),通过试验的概率为 5%。试验的这种选择性(1.24Z)可用 Z 的假定值(雷电和操作冲击分别为 U_{50} 的 3% 和 6%)来进一步量化(应注意 Z 不能由试验确定)。在图 9 中进一步用图解说明 15/2 试验的选择性与理想试验的比较。

GB/T 16927.1—2011 的耐受电压试验程序 C 可以替代上面的程序 B。在该程序中,施加 3 次冲击,若在自恢复绝缘上仅 1 次破坏性放电,则再施加 9 次冲击,如果没有发生破坏性放电则认为满足试验要求。在表 3 和图 9 中都给出了这种程序的选择性及和 15/2 试验的比较。

表 3 GB/T 16927.1—2011 中试验程序 B 和 C 的选择

试验程序	冲击次数	在 U_{10} 下通过试验的概率/%	通过试验概率为 95% 的耐受水平	通过试验概率为 5% 的耐受水平	选择性
B	15/2	82	$U_{5.5}$ ($U_w + 0.32Z$)	U_{36} ($U_w - 0.92Z$)	1.24Z
C	3+9	82	$U_{4.6}$ ($U_w + 0.40Z$)	U_{63} ($U_w - 1.62Z$)	2.02Z

7.3.5 试验程序的限制

由于从破坏性放电至绝缘的恢复与时间有关,所以施加试验电压之间的时间间隔要足够以使得自恢复绝缘完全恢复其绝缘电气强度。设备委员会宜规定与绝缘类型有关的施加试验电压之间的时间间隔容许的限值(如果有的话)。还应考虑到,由于试验电压的重复施加即使没有发生破坏性放电,非自恢复绝缘也可能劣化。

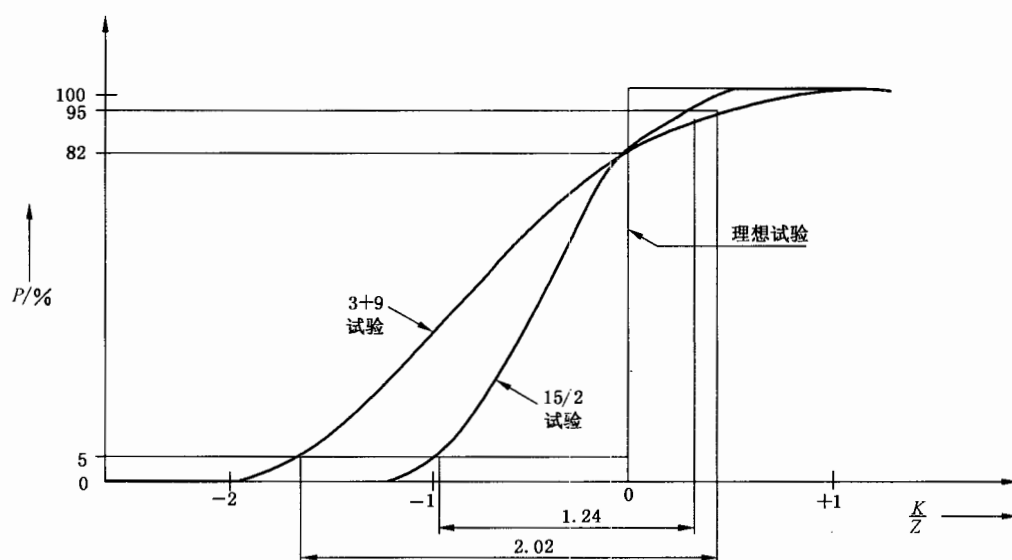


图 9 设备通过试验的概率 P 与实际 (U_{10}) 和额定冲击耐受电压 (U_w) 之间的差值 K 的关系

7.3.6 型式试验程序的选择

根据上述观点,作为绝缘配合的目的,对于进行的试验程序提出下述推荐:

- 宜用升降耐受方法试验自恢复绝缘(GB/T 16927.1—2011 的耐受电压试验程序 D 中所述方法之一)。
- 宜用 3 次冲击耐受方法对非自恢复绝缘进行试验(GB/T 16927.1—2011 的耐受电压试验程序 A)。
- 通常,包括自恢复和非自恢复两种绝缘的设备(即复合绝缘)宜用 15/2 次电压耐受试验(GB/T 16927.1—2011 的耐受电压试验程序 B)。不过,当在非自恢复绝缘中树枝状扩展的危

险性具有重要意义且认为施加电压的次数过多时,3+9 次电压耐受试验(GB/T 16927.1—2011 的耐受电压试验程序 C)是可接受的选择。

——特定的适用于电力电缆及其附件(终端及接头)采用耐受正负极性各 10 次的雷电冲击电压试验及操作冲击电压试验。

——同样,作为绝缘配合的目的,若要求进行工频试验时,不管是自恢复、非自恢复还是复合绝缘都进行短时工频耐受电压试验。

7.3.7 型式试验电压的选择

对于仅包括空气绝缘的设备,以标准耐受电压进行试验,并按 GB/T 16927.1—2011 的规定进行大气修正。

对于只包括内绝缘的设备,试验以未进行大气修正的标准耐受电压进行。

对于包括内、外两种绝缘的设备,应用大气修正因数,如果修正因数在 0.95 和 1.05 之间,则以修正过的电压值进行试验。当修正因数超出此范围时,作为绝缘配合的目的,下面列举的方法是可接受的。

a) 外绝缘的试验电压高于内绝缘的试验电压(大气修正因数 >1.05)

当内绝缘的设计裕度大时,外绝缘试验才能正确。如果不是这样,则应当以标准值试验内绝缘,而对外绝缘,可按有关设备委员会的规定或协商考虑下述的替代方法:

- 1) 只在模型上进行外绝缘的试验;
- 2) 在已有的试验结果之间插值;
- 3) 根据绝缘尺寸估算耐受电压。

如果空气间隙距离等于或大于 GB 311.1—2012 中附录 A 的表 A.1、表 A.2 和表 A.3 中给出的值,则一般来说,外绝缘是不需要试验的。

对垂直绝缘子的湿试验,绝缘子的形状应当满足一定的附加要求。已有资料证明,如果绝缘子的形状满足 GB/T 772 的要求,则可认为已达到这些要求。

如果间隙大于额定工频耐受电压除以 230 kV/m 且绝缘子的形状满足 GB/T 772 的要求,则仅需进行湿条件下的工频试验,不需要另外进行外绝缘试验。

b) 外绝缘的试验电压低于内绝缘的试验电压(大气修正因数 <0.95)

当外绝缘设计裕量大时,才能对内绝缘进行正确的试验。如果不是这样,则外绝缘应当用修正过的电压值进行试验,而对于内绝缘,可按有关技术设备委员会或协商考虑下述选择:

- 1) 仅用一种极性(通常为负极性)冲击对内绝缘进行试验;
- 2) 通过增加外绝缘的强度,例如,不同气隙下的电极用不同电晕控制方法对内绝缘进行试验。加强的措施不影响内绝缘的性能。

8 对变电站的特殊考虑

8.1 概述

8.1.1 典型变电站

一般变电站接线如图 10 所示⁴⁾,站内的所有电气设备将受到下述 8.1.1~8.1.4 中说明的作用电压。

4) 采标说明:根据我国实际情况,给出我国超高压变电站典型接线图(未选用 IEC 图 11)。

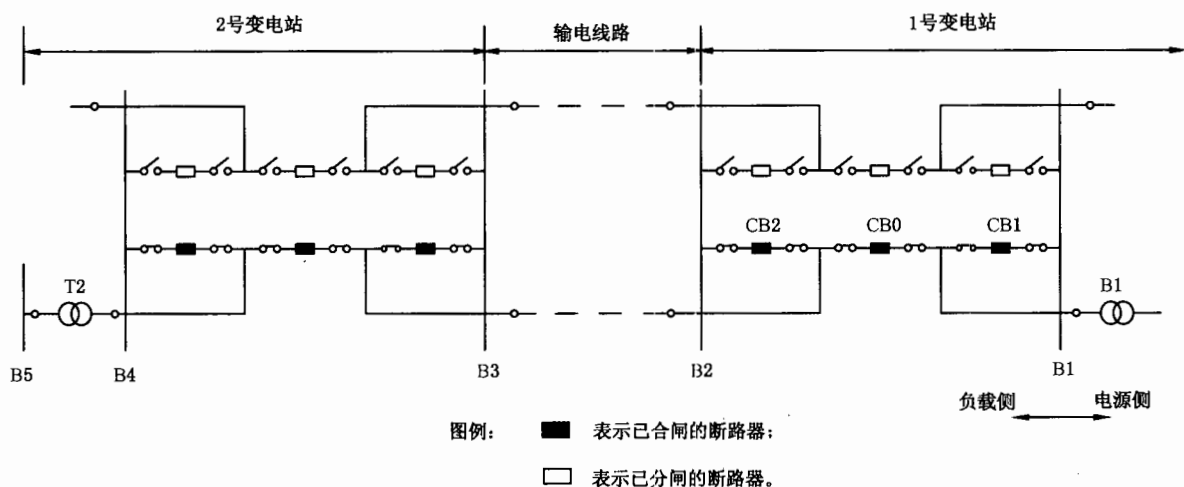


图 10 用于表示电压作用位置的超高压变电站典型接线示意图

8.1.2 运行电压

运行电压等于系统最高电压，变电站的各部分的电压相等。

8.1.3 暂时过电压

负载侧接地故障引起的暂时过电压对变电站某相上的各部分的作用是相等的。

在变电站内可能产生甩负荷过电压，这主要是由于在远端变电站(2号变电站)处的故障所致。根据保护方式1号、0号、2号(CB1、CB0、CB2)断路器和变压器之间的全部或2号变电站一些部件将受到该过电压的作用。

对变电站自身内的故障，仅断路器CB0、CB1和变压器之间的部件承受甩负荷过电压。

在同步期间，如果变压器接到发电机上，则在断路器CB0、CB1处可能存在纵向过电压作用。

8.1.4 缓波前过电压

由线路合闸或重合闸引起的过电压可能仅在线路入口和断路器CB2、CB0之间的受端具有高的幅值。送端处变电站中其他地方也受到过电压的作用。

由故障和切除故障引起的过电压在所有地方都可能出现。

8.1.5 快波前过电压

在变电站所有部分处都可能遭受雷电过电压作用，但幅值不同，这取决于离避雷器的电气距离。

当母线隔离开关分合空载母线，快波前操作过电压仅发生在变电站中操作的那一部分(如某一条母线上)或一台断路器上。

在附录G中用三个选择例说明绝缘配合的各步骤。

有关长持续时间工频试验电压的规定委托给有关设备委员会，例子中省略了要求的长持续时间工频耐受电压的检验。

注1：在最初阶段，可能仅一条线路在运行，需要考虑由于接地故障后甩负荷引起的暂时过电压。

注2：当变压器通过长线路接入时，缓波前雷电过电压也可能作用于变压器和母线。

注3：在GIS中，可能需要考虑由隔离开关开合操作引起的特快波前过电压，因为这类过电压会危及GIS本身以及与之相连的电气设备的安全。

8.2 过电压的绝缘配合

8.2.1 在范围 I 内 U_m 为 40.5 kV 及以下的配电系统中的变电站

8.2.1.1 概述

对于在这个电压范围内的设备,GB 311.1—2012 规定额定短时工频和雷电冲击耐受电压。

作为一般导则,可假定在配电电压范围内,标准短时工频耐受电压覆盖了要求的操作冲击耐受电压(相对地)。因此要求的操作冲击耐受电压(相间)必须在选取标准雷电冲击耐受电压,或短时工频耐受电压时考虑。

只要设备相间绝缘与缓波前相间过电压相适应,则按 GB 311.1—2012 表 2 中较低的标准雷电冲击耐受电压值设计的设备(系列 I)可能适合于下情况:

- a) 不与架空线路相连接的系统和工业装置。
- b) 只经变压器接到架空线上的系统和工业装置,连接变压器低压端的电缆的对地电容每相至少为 $0.05 \mu\text{F}$ 。当电缆对地电容不足时,应当在开关设备的变压器侧并尽可能靠近变压器端增设电容器,以使每相电缆对地电容加上附加的电容器的电容之和至少为 $0.05 \mu\text{F}$ 。
- c) 当采用由避雷器提供足够的过电压保护时,直接和架空线连接的系统和工业装置。

在所有其他情况,或安全要求程度很高的地方的设备应采用较高额定雷电冲击耐受电压值。

8.2.1.2 经变压器和架空线连接的设备

当变压器是由高压侧架空线供电时,和变压器低压侧连接的设备不会直接受到来自架空线的雷电和操作过电压的作用。但是,由于这类过电压从变压器的高压侧绕组至低压绕组的静电和电磁传递,这种设备可能受到过电压的作用,所以在绝缘配合程序中必须考虑可能采用的保护装置。

在附录 D 中给出传递电压静电和电磁分量的分析表达式。

8.2.1.3 经电缆和架空线连接的设备

在这种情况下,绝缘配合不仅涉及对变电站设备的保护也涉及对电缆的保护。

当雷电冲击沿架空线进入电缆时,分解成反射波和入射波,入射波的幅值明显地低于侵入冲击波幅值。但是,随后电缆的多次折反射通常导致电缆的电压增加,且大大超过起始值。一般说来,应当选取 GB 311.1—2012 的表 2 中较高的额定雷电冲击耐受电压并在架空线和电缆的连接点处安装避雷器。

当在架空线路中使用木质杆和仅有一条线路可能接到变电站时,则在变电站的电缆入口处可能需要装设附加避雷器。

8.2.2 在范围 I 内 U_m 为 72.5 kV 和 252 kV 之间的系统中的变电站

对于在此电压范围内的设备,GB 311.1—2012 规定了额定短时工频和雷电冲击耐受电压。

作为一般导则,可假定在范围 I 内的电压范围内,标准的短时工频耐受电压中已覆盖了操作冲击耐受电压(相对地)。然而,对线路入口处的设备,在选取雷电冲击耐受电压或标准短时工频耐受电压时必须考虑要求的相间操作冲击耐受电压,对三相设备可能需要附加相间操作冲击试验。

关于雷电冲击耐受电压的选取,在范围 I 内,对于配电电压范围的多种考虑同样适用于输电电压范围。但是,由于设备和安装地点的变化不那么大,对大量代表性的变电站、架空线组合推荐的绝缘配合程序,至少应使用附录 E 中叙述的简化程序进行。

8.2.3 在范围 II 内系统中的变电站

对于在此范围内的设备,GB 311.1—2012 规定了额定操作和雷电冲击耐受电压。

在此电压范围内,一般宜采用绝缘配合的统计方法。应当检验由于操作或故障以及雷电事件产生的过电压的频率,并仔细考虑设备在变电站中的安装位置(例如,区别合闸线路送端或受端的设备)。此外若采用确定性法进行绝缘配合时是基于工频暂时过电压,则可能导致选取的标准冲击耐受电压过于保守,而宜采用更准确的计算程序,同时考虑实际工频暂时过电压的持续时间和绝缘的工频电压-时间耐受特性。

附录 A
(资料性附录)

接地故障引起的暂时过电压

接地故障因数是在一给定系统结构的三相系统的给定点上,在对系统任一点的一相或多相均有影响的故障期间,健全相的相对地最高工频电压有效值与无故障时该点相对地工频电压有效值之比。

计算接地故障因数要使用将故障电阻 R 考虑在内的正序和零序系统的复阻抗 Z_1 和 Z_0 。

采用值如下:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \text{ —— 正序和负序系统的电阻和电抗}$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \text{ —— 零序系统的电阻和电抗}$$

计算故障点处的接地故障因数。

注: 应注意,在分布广的谐振接地电网中,其他位置的接地故障因数可能大于故障点的因数。

图 A.1 为 $R_1 \ll X_1$ 和 $R=0$ 时的总体情况。

对正或负的 X_0/X_1 高值范围,适用于谐振接地或中性点绝缘系统。

正 X_0/X_1 的低值范围适用于中性点接地系统。

用阴影表示的负低值范围的 X_0/X_1 ,因谐振条件不适合于实际应用。

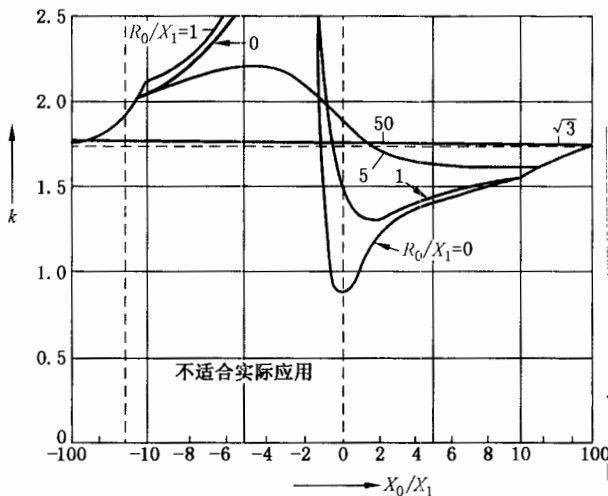


图 A.1 $R_1/X_1 = R=0$ 时接地故障因数 k 与 X_0/X_1 间的关系

中性点接地系统,图 A.2~图 A.5 所示为适用于特定 R_1/X_1 值的接地故障因数曲线族。

曲线按下述表示法分为代表最临界条件的区域:

- 相对地故障期间,最高电压产生于故障相的超前相。
 - 相对地故障期间,最高电压产生于故障相的滞后相。
 - 相对地故障期间,最高电压产生于无故障相。
- 曲线适用于给出最大接地故障因数的故障电阻值。

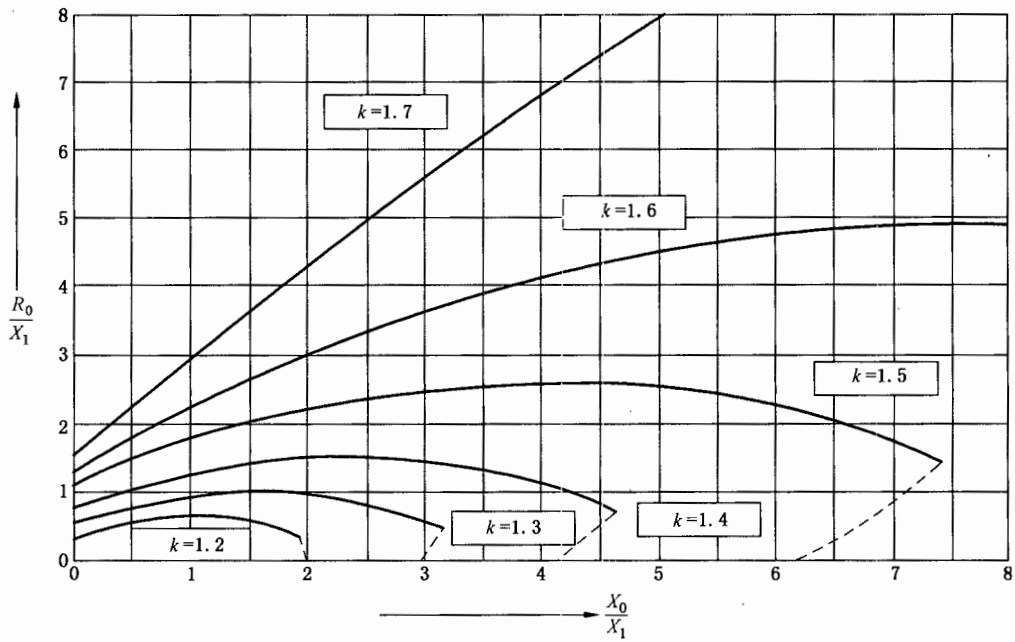


图 A.2 $R_1=0$ 且接地故障因数 k 为常数时, R_0/X_1 与 X_0/X_1 间的关系

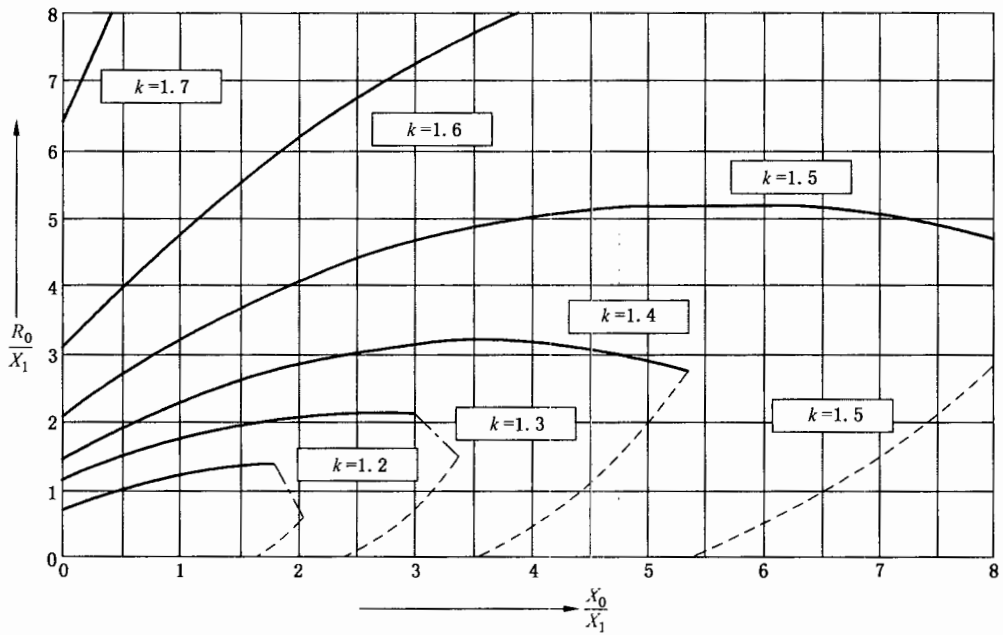


图 A.3 $R_1=0.5X_1$ 且接地故障因数 k 为常数时, R_0/X_1 与 X_0/X_1 间的关系

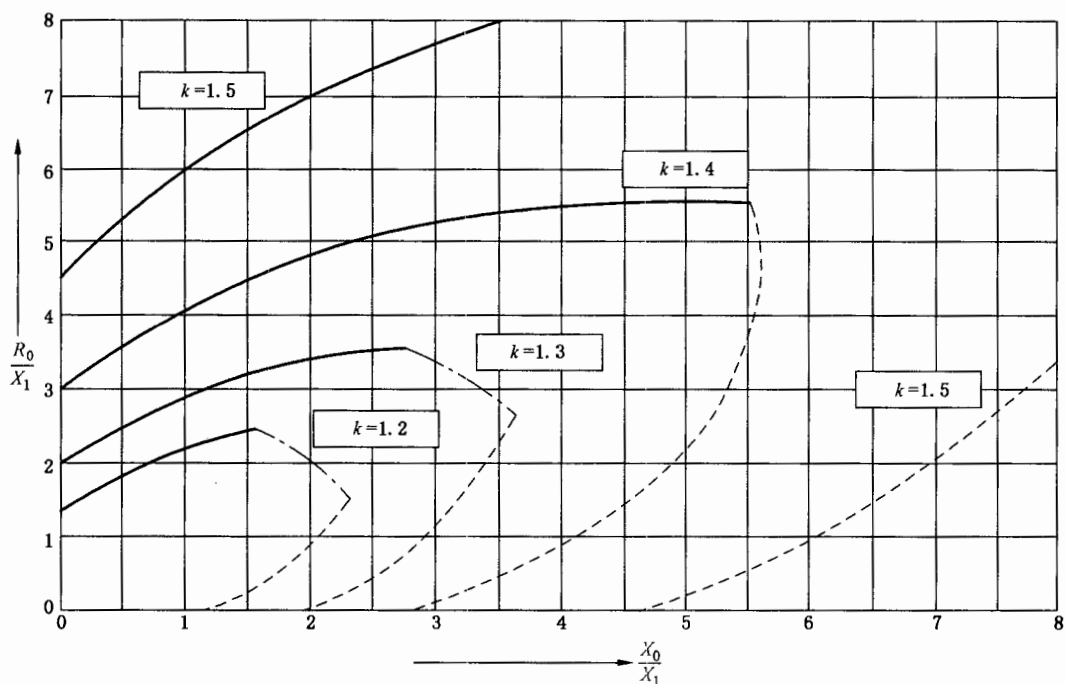


图 A.4 $R_1 = X_1$ 且接地故障因数 k 为常数时, R_0/X_1 与 X_0/X_1 间的关系

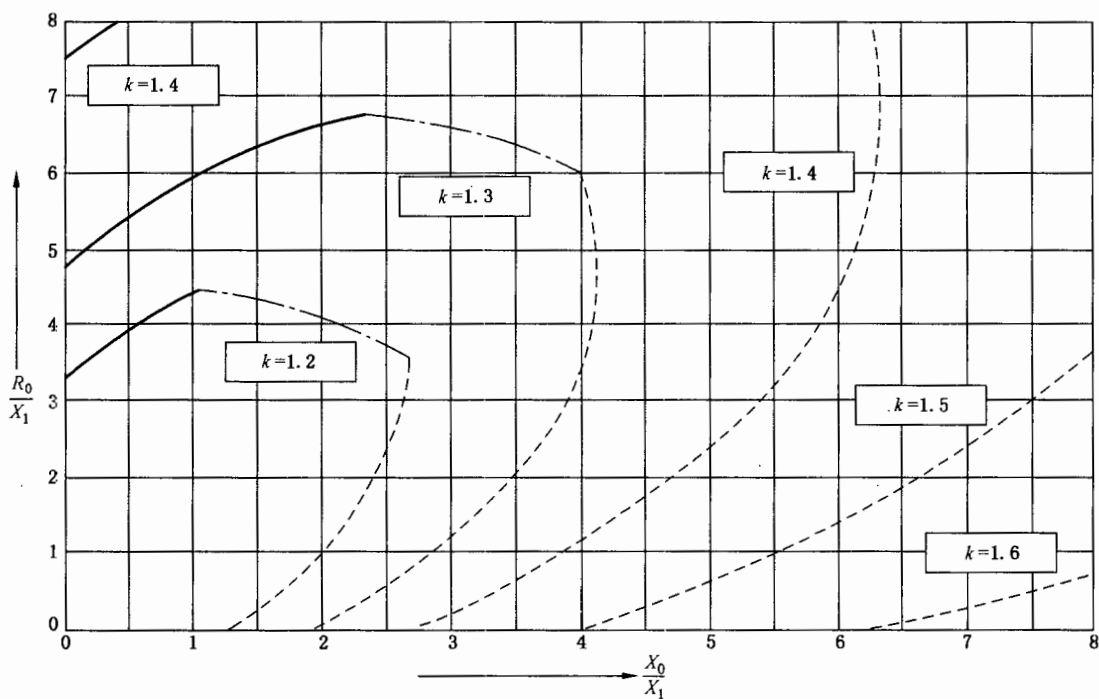


图 A.5 $R_1 = 2X_1$ 且接地故障因数 k 为常数时, R_0/X_1 与 X_0/X_1 间的关系

附录 B

(资料性附录)

维泊尔(Weibull)概率分布

B.1 一般说明

在论述外绝缘的大量文献中,作为施加电压峰值的函数,绝缘的破坏性放电概率 $P(U)$ 用公式(B.1)给出的高斯(Gaussian)累积分布表示:

$$P(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}y^2} dy \quad \dots\dots\dots(\text{B.1})$$

式中:

$x = (U - U_{50})/Z$;

U_{50} ——50%放电电压 [$P(U_{50}) = 0.5$];

Z ——按 GB/T 16927.1—2011 规定的标准偏差。

然而,根本问题是对 $P(U)$ 采用这一函数没有物理根据。缺乏这种根据的证据是,从物理角度看,在 U 低于某最小值时不可能发生放电。因此,该函数会在 $(U_0 = U_{50} - 3Z)$ 或 $(U_0 = U_{50} - 4Z)$ 处截断,从而使 $U \leq U_0$ 时 $P(U) = 0$ 。采用公式(B.1)的主要原因是因为它与试验结果相当吻合。

过电压累积频率分布通常也用高斯累积函数 $F(U)$ 描述。它通常在 $(U_{et} = U_{e50} + 3S_e)$ 或 $(U_{pt} = U_{p50} + 3S_p)$ 处截断,以表示计算过电压的上限。

为考虑这些因素,本部分建议对过电压和自恢复绝缘的破坏性放电都使用维泊尔概率分布,因为它有下列优点:

- 在维泊尔表达式中,从数学上就包括了截断值 U_0 和 U_{et} ;
- 用袖珍计算器即可很容易地对该函数进行计算;
- 其反函数 $U = U(P)$ 和 $U_e = U_e(F)$ 可用数学式表达,并很容易用袖珍计数器计算;
- 修正的维泊尔表达式由表征两个截断高斯表达式相同的参数确定:对 $P(U)$ 用 $(U_{50}, Z$ 和 $U_0)$: 而对 $F(U)$ 用 $(U_{e2}, S_e$ 和 $U_{et})$;
- 几个并联绝缘的破坏性放电概率函数与单个绝缘的表达式相同,其特性很容易从单个绝缘的特性确定。

本附录将说明从三个参数的维泊尔累积概率分布推导两个修正函数,以用来表示操作和雷电冲击下外绝缘的破坏性放电概率函数和系统中产生的过电压峰值的累积概率分布。

B.2 外绝缘的破坏性放电概率

维泊尔分布的一般表达式为公式(B.2):

$$P(U) = 1 - e^{-(\frac{U-\delta}{\beta})^\gamma} \quad \dots\dots\dots(\text{B.2})$$

式中:

δ ——截断值;

β ——尺度参数;

γ ——形状参数。

用公式(B.3)和公式(B.4)值代换截断值 δ 和尺度参数 β , 该表达式即可修正用来表示带截断放电概率的绝缘放电概率:

$$\delta = U_{50} - NZ \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

$$\beta = NZ (\ln 2)^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

从而得出修正的维泊尔函数为公式(B.5):

$$P(U) = 1 - 0.5 \left(1 + \frac{U - U_{50}}{2N}\right)^{\gamma} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

常数 N 为低于 U_{50} 时对应于截断电压 [$P(U)=0$] 的标准偏差, 而指数由条件 $P(U_{50} - Z) = 0.16$ 确定, 因而得出公式(B.6):

$$\gamma = \frac{\ln \left[\frac{\ln(1 - 0.16)}{\ln 0.5} \right]}{\ln \left[1 - (1/N) \right]} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

对外绝缘, 假定在截断值 ($U_0 = U_{50} - 4Z$) 下, 即 $N=4$ 时, 不可能发生放电 (耐受概率 = 100%)。将 $N=4$ 代入公式(B.6), 得 $\gamma = 4.83$ 。可近似令 $\gamma = 5$ 而不致引起明显误差。

像高斯函数那样引入标准化变量 [$x = (U - U_{50})/Z$], 则所采用的修正维泊尔闪络概率分布即为公式(B.7):

$$P(U) = 1 - 0.5 \left(1 + \frac{x}{4}\right)^5 \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

图 4 画出了这一修正维泊尔分布及与之匹配的高斯分布。图 5 是在高斯概率坐标上的相同分布。

如同样的过电压作用于 M 个相同且并联的绝缘, 则所产生的并联绝缘的闪络概率 [$P'(U)$] 由公式(B.8)给出:

$$P'(U) = 1 - [1 - P(U)]^M \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

将公式(B.7)和公式(B.8)合并, 则 M 个并联绝缘的闪络概率为公式(B.9):

$$P'(U) = 1 - 0.5^{M \left(1 + \frac{x}{4}\right)^5} \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

引入标准化变量 [$x_M = (U - U_{50M})/Z_M$], 则公式(B.9)可表示为公式(B.10):

$$P(U) = 1 - 0.5 \left(1 + \frac{x_M}{4}\right)^5 \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

从公式(B.9)和公式(B.10)可得公式(B.11):

$$1 + \frac{x_M}{4} = \sqrt[5]{M} \left(1 + \frac{x}{4}\right) \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

一般地, 如单个绝缘的故障风险率 R 很低 (如 $R = 10^{-5}$), 则同时受到电压作用的 M 个相同并联绝缘的故障风险率可近似表示为 M 与 R 的乘积。

用它们各自的扩展定义来代替公式(B.11)中的 x 和 x_M , 且因为在截断点 ($U_{50} - 4Z = U_{50M} - 4Z = U_0$), 所以可得到公式(B.12)关系:

$$Z_M = \frac{Z}{\sqrt[5]{M}} \quad U_{50M} = U_{50} - 4Z \left(1 - \frac{1}{\sqrt[5]{M}}\right) \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

这些关系如图 B.1 所示。它给出了 M 个相同并联绝缘与单个绝缘的耐受特性间的关系。例如, 将上述公式用于 $M = 200$ 的情况:

$$U_{50(200)} = U_{50} - 2.6Z$$

$$U_{10(200)} = U_{50} - 1.3Z_{200} = U_{50} - 3.1Z$$

作为另一例子, 若有 100 个并联绝缘, 每个绝缘的 $U_{50} = 1\,600$ kV, $Z = 100$ kV, 则 $Z_M = 100/(100)^{1/5} = 39.8$ kV, $U_{50M} = 1\,359.2$ kV。表 B.1 是此例中各种闪络概率 $P(U)$ 下 U 和 U_M 值的整体情况。

表 B.1 单个绝缘和 100 个并联绝缘的击穿电压与累积闪络概率的关系

$P(U)/\%$	50	16	10	2	1	0.1	0 ^a
U/kV	1 600	1 500	1 475	1 400	1 370	1 310	1 200
U_M/kV	1 359	1 319	1 308	1 280	1 268	1 244	1 200
* 截断值保持不变。							

故障风险率计算：

为计算上例的故障风险率，假定 $U_{e2} = 1\,200\text{ kV}$ ， $S_e = 100\text{ kV}$ 。则对单个绝缘：

$$K_{cs} = U_{10}/U_{e2} = 1\,475/1\,200 = 1.23$$

$$R = 10^{-5}$$

对 100 个相同并联绝缘：

$$K_{cs} = 1\,308/1\,200 = 1.09$$

$$R = 10^{-3} \text{ (与图 8 比较)}$$

作为近似，可使用公式(B.13)计算 M 个并联绝缘的故障风险率：

$$R = M\Phi \left[\frac{U_{e50} - U_{50}}{\sqrt{S_e^2 + Z^2}} \right] \quad (\text{对 } R = 0.1 \text{ 有效}) \quad \dots\dots\dots (\text{B.13})$$

式中：

M ——同时受电压作用的绝缘数；

Φ ——不截断高斯积分函数；

U_{e50} ——过电压分布平均值，单位为千伏(kV)，即按附录 C 得到的 $U_{e2} - 2S_e$ 值；

U_{50} ——用耐受电压除以 $(1 - 1.3Z)$ 确定的 50% 闪络电压，单位为千伏(kV)；

S_e ——过电压概率分布的标准偏差，单位为千伏(kV)；

Z ——绝缘闪络概率的标准偏差，单位为千伏(kV)。

于是， $R = 100\Phi[(1\,000 - 1\,600)/140] = 100\Phi(-4.3) = 100 \times 10^{-5} = 10^{-3}$ ，与上述结果相同。对低故障风险率，使用本公式可能过于保守。

B.3 过电压的累积频率分布

为用修正的维泊尔函数表示过电压累积频率，考虑到该函数应在高电压值截断，因此只需改变公式(B.2)指数的电压符号即可。例如，相对地过电压：

$$F(U_e) = 1 - e^{-\left(\frac{U_e - U_e}{\beta}\right)^\gamma} \quad \dots\dots\dots (\text{B.14})$$

按附录 C 所做的假定，截断值为 $(U_{e1} = U_{e50} + 3S_e)$ ，而 2% 值等于 $(U_{e2} = U_{e50} + 2.05S_e)$ ，公式(B.6)的指数为 $\gamma = 3.07$ ，可近似取为 $\gamma = 3$ 。按这些假定，用于公式(B.14)的尺度参数为 $\beta = 3.5S_e$ 。

或者，过电压频率分布也可表示为与公式(B.5)的破坏性放电公式相似的形式：

$$F(U_e) = 1 - 0.5 \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{U_e - U_{e50}}{S_e} \right) \right]^3 \quad \dots\dots\dots (\text{B.15})$$

使用以上各因数，公式(B.14)和公式(B.15)都可给出 2% 值下的概率为 2.2%，此结果可认为是足够的。

如将事件峰值法与相峰值法(见 4.3.3.2 的定义)比较，且三相上的过电压在统计上是独立的，则概率分布为公式(B.16)：

$$F_{C-P} = 1 - (1 - F_{P-P})^3 = 1 - e^{-3\left(\frac{U_e - U}{\beta}\right)^\gamma} \quad \dots\dots\dots (\text{B.16})$$

式中：

$C-P$ 和 $P-P$ 分别指事件峰值法和相峰值法，参数 $\gamma=3, \beta=3.5S_c$ 。

这说明两种方法中的参数 β 服从下述关系公式(B. 17)：

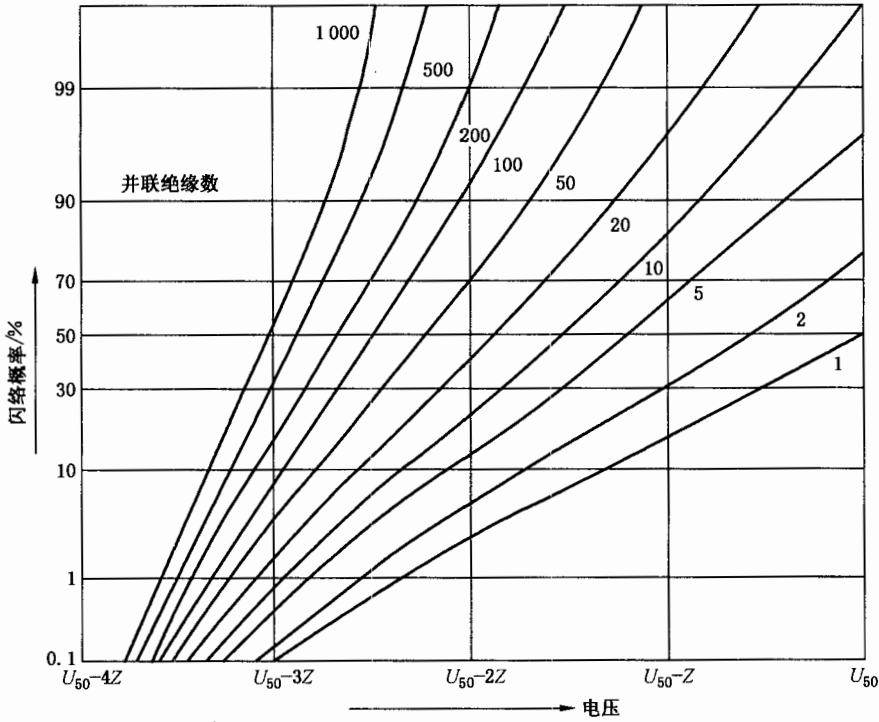
$$\beta_{C-P} = 3^{-\frac{1}{3}} \beta_{P-P} = 0.69\beta_{P-P} \quad \dots\dots\dots (B. 17)$$

从而偏差间的关系为公式(B. 18)：

$$S_{C-P} = 0.69S_{P-P} \quad \dots\dots\dots (B. 18)$$

而两种方法的截断值应该相同，所以有公式(B. 19)：

$$u_{e2C-P} = 1.08u_{e2P-P} - 0.08 \quad \dots\dots\dots (B. 19)$$



说明：

U_{50} ——单个间隙的 50% 闪络电压；

Z ——单个间隙的标准偏差。

图 B. 1 并联配置绝缘使耐受电压降低的变换图

附录 C (资料性附录)

线路合闸和重合闸产生的代表性缓波前过电压的确定

C.1 一般说明

CIGRE 第 33 研究委员会研究了合闸和重合闸过电压的确定,这类过电压下绝缘的响应,以及它对相-相-地绝缘结构的绝缘配合程序的影响,并为此出版了文献[1]、[6]、[7]、[8]。尽管它报道的原则仍然有效,但其使用却相当复杂。因此,本附录对其结果做了归纳,并且介绍在使用本部分时认为是必要的简化。对结果的解释可参照有关的 ELECTRA 出版物。

这些原则是为过电压计算的相峰值法(定义见 4.3.3.3)建立的。然而,其结果,特别是作了简化后,也适合于事件峰值法。

C.2 预期相对地过电压代表性幅值的概率分布

从相对地过电压 2% 值(图 1 的 U_{e2} 值)可估算代表性概率分布为:

——相峰值法:

- -2% 值: U_{e2}
- 偏差: $\delta_c = 0.25(U_{e2} - 1)$ (C.1)
- 截断值: $U_{et} = 1.25U_{e2} - 0.25$ (C.2)
- 相当于 $U_{et} = 1 + 5\delta_c$ 。
- 应指出,如 $U_{e2} = U_{e50} + 2\delta_c$, 则 $U_{et} = U_{e50} + 3\delta_c$ 。

注: 推荐采用 $U_{et} = U_{e50} + 3\delta_c$ 。

——事件峰值法:

- 2% 值: U_{e2} ;
- 偏差: $\delta_c = 0.17(U_{e2} - 1)$ (C.3)
- 截断值: $U_{et} = 1.13U_{e2} - 0.13$ (C.4)
- 相当于 $U_{et} = 1 + 6.65\delta_c$ 。

如附录 B 所示,对同样的投切操作,两种方法得到的截断值是相同的。因而 2% 值和偏差肯定不同。

两种方法的准确数值可通过研究得到。然而,从结果分散性看,图 1 对两种方法都适用。

C.3 预期相间过电压代表性幅值的概率分布

一般来说,计算三相过电压时的绝缘特性,必须从过电压波形确定其最重要瞬间(见 C.4)。这个最重要瞬间用下述 3 个瞬间之一定义即可:

a) 相对地过电压正极性峰值瞬间:

在此瞬间,过电压可表示为:

- 每端子的正极性峰值;
- 给出相间最高作用的相邻两端子的最大负极性分量;
- 相邻两端子的最小负极性分量。

b) 相对地过电压负极性峰值瞬间:该瞬间相当于正极性峰值瞬间,但极性相反。

c) 相间过电压峰值瞬间:

在此瞬间,过电压可表示为:

- 每对端子间的相间过电压峰值;
- 该过电压的正极性和负极性分量;
- 第三端子的对地分量。

在所有瞬间,第三分量都很小。因此,过电压可用两相的两个分量表示,第三相接地。过电压概率分布是双变量的,因为两个分量都在变化。在双变量概率分布中,通常用具有相同概率密度的一组过电压来代替所采用的单个电压值。用高斯分布近似各分量概率分布时,这些组合形成的曲线是椭圆;特殊情况下,如两个分布的分散性相等,则曲线为圆。如使用维泊尔分布,则曲线类似于椭圆或圆。

除表示固定概率密度外,该曲线的另一特性是它的每条切线都表示概率不变的合成相间过电压。图 C. 1 是摘自参考文献[7]的一例,它对应上面所说的三个瞬间的 2% 概率切线。按过电压计算,三曲线中仅一个对应于绝缘的最重要瞬间,且仅此曲线对过电压有代表性。

为简化并考虑三个所选瞬间中的各瞬间,参考文献[7]建议用图 C. 2 给出的圆代表这三条曲线。该圆完全由相对地过电压的正极性和相等的负极性峰值确定。该圆的圆心位于:

$$U_c^+ = U_c^- = \frac{U_p - \sqrt{2}U_c}{2 - \sqrt{2}} \dots\dots\dots (C. 5)$$

其半径为:

$$R_u = \frac{2U_c - U_p}{2 - \sqrt{2}} \dots\dots\dots (C. 6)$$

式中:

相对地过电压 U_c 和相间过电压 U_p 对应相同概率。

相间过电压概率分布可估算为(参考图 C. 1 和图 C. 2):

——相峰值法:

- 2% 值: U_{p2} ;(C. 7)
- 偏差: $\delta_p = 0.25(U_{p2} - 1.73)$ (C. 8)
- 截断值: $U_{pt} = 1.25U_{p2} - 0.43$ (C. 8)

——事件峰值法:

- 2% 值: U_{p2} ;(C. 9)
- 偏差: $\delta_p = 0.17(U_{p2} - 1.73)$ (C. 10)
- 截断值: $U_{pt} = 1.14U_{p2} - 0.24$ (C. 10)

C. 4 绝缘特性

计算三相过电压时,为确定对绝缘最关键的瞬态过电压瞬间(见 5.1.1),必须考虑基本绝缘特性。图 C. 3 所示为绝缘总体结构中的两相端子和接地端子,为简化起见省略了第三相。为描述这种结构的绝缘强度,使用了两种方法。

——属于某一给定放电概率的正极性分量与负极性分量有关。按这种方法对 50% 放电概率得到的绝缘特性如图 C. 4a) 所示。

——对应某一给定放电概率的两分量之和的总放电电压与比值 α 有关:

$$\alpha = U^- / (U^+ + U^-) = 1 / [1 + (U^+ / U^-)] \dots\dots\dots (C. 11)$$

式中:

U^- ——负极性分量;

U^+ ——正极性分量。

则由图 C. 4a) 的例子可得到图 C. 4b) 的关系。

绝缘特性分为三个区域[如图 C. 4b)]。区域 a 是正极性端子对地放电区域, 负极性分量对放电概率影响极小或没有影响; 区域 b 的放电发生在端子间, 放电概率与两个分量都有关(α 应考虑在内); 区域 c 与区域 a 对应, 但放电发生于负极性端子对地。

确定区域 a 和 c 的放电电压时可将对面的端子接地, 即令一个电压分量为零。然而在区域 b, 两分量的比值(即比值 α) 对结果会有影响, 绝缘特性的这一部分与相间闪络对应, 它取决于电极结构和放电物理过程。我们关注的是两种不同的电极结构:

- 第一种结构的相对地放电和相间放电发生于结构的不同部分, 例如电极半径与间隙相比很大时。相间放电仅由相间总电压决定。区域 b 的绝缘特性在图 C. 4a) 中以 45° 下降, 或在图 C. 4b) 中保持恒定。这种结构存在于三相电力变压器和 GIS 中。
- 第二种结构的相对地放电和相间放电发生于结构的相同部分。对这种结构, 绝缘特性取决于放电过程。

按放电过程, 可分为三种情况:

a) 均匀或准均匀电场结构

放电电压等于电晕起始电压, 绝缘特性可通过电场计算得到。这种绝缘结构存在于三相封闭 GIS。

尽管如此, 当电极尺寸与间隙相比很大时, 相间介质的电场几乎不受接地端子的影响, 因此它决定于总电压。区域 b 的绝缘特性在图 C. 4a) 中以 45° 下降, 在图 C. 4b) 中保持恒定。

b) 不均匀电场的短空气间隙

放电电压明显高于电晕起始电压。其放电过程对应于流注放电, 由于间隙很短, 先导不会发展。放电概率决定于两分量之和, 这意味着区域 b 的绝缘特性在图 C. 4a) 中以 45° 下降, 在图 C. 4b) 中保持恒定。GB 311.1—2012 范围 I 的空气间隙可属于这一种。

c) 长空气间隙

除短空气间隙所提到的条件外, 从正极性端子形成先导。这意味着正极性端子周围的介质电场是起决定性的, 正极性分量对放电的影响大于负极性分量。绝缘特性的下降小于 45° [6]。

GB 311.1—2012 范围 II 的空气间隙可属于这一种。

总之, 两相绝缘结构的绝缘特性可表示为:

- 相对地正极性操作冲击耐受电压(图 C. 4 的区域 a);
- 相对地负极性操作冲击耐受电压(图 C. 4 的区域 c);
- 对图 C. 4a) 的表示法, 可用公式(C. 12)表示相间绝缘特性(图 D. 4 的区域 b)。

$$U^+ = U_0^+ + BU^- \quad \dots\dots\dots (C. 12)$$

或对图 C. 4b) 的表示法为公式(C. 13):

$$U^+ + U^- = \frac{U_0^+}{1 - \alpha(1 - B)} \quad \dots\dots\dots (C. 13)$$

常数 B 的值为:

- 在范围 I, 对所有类型绝缘: $B=1$;
- 在范围 II, 对内绝缘: $B=1$; 对外绝缘: $B<1$ 。

图 C. 5 给出了角度 ϕ ($B = \tan\phi$) 与比值 D/H_1 的关系。

GB 311.1—2012 定义的相间代表性过电压由两个幅值相等, 极性相反的分量组成。该过电压位于

直线 $U^+ = U^-$, 即 $\alpha = 0.5$ 处。对绝缘结构最关键的作用电压取决于绝缘特性, 特别是公式(C. 12)中提到的斜度 B 。在描述过电压的简化法所建议的圆上, 其切线特性上的电压分量给出的就是最关键的作用电压。图 C. 2 表明, 如倾角 B 小于 1, 则最关键的作用电压与代表性过电压并不对应。这种情况下, 为在 $\alpha = 0.5$ 的条件下进行试验, 必须提高代表性过电压幅值。这就会产生一个新的代表性相间过电压值 U_{p2re} , 其值为:

$$U_{p2re} = 2(F_1 U_{p2} + F_2 U_{e2}) \quad \dots\dots\dots (C. 14)$$

偏差值 S_{pre} 和截断值 U_{ptre} 分别由公式(C. 15)和公式(C. 16):

$$S_{pre} = 2(F_1 S_p + F_2 S_e) \quad \dots\dots\dots (C. 15)$$

$$U_{ptre} = 2(F_1 U_{pt} + F_2 U_{et}) \quad \dots\dots\dots (C. 16)$$

式中, 如 $B = 1$, 即对范围 I 的内绝缘和外绝缘, 代表性相间过电压等于相间过电压的概率分布。

$$F_1 = \frac{1}{2 - \sqrt{2}} \left(1 - \frac{\sqrt{1+B^2}}{1+B} \right)$$

$$F_2 = \frac{1}{2 - \sqrt{2}} \left(2 \frac{\sqrt{1+B^2}}{1+B} - \sqrt{2} \right)$$

如 $B < 1$, 则代表相间过电压在 $B = 1$ 的相间过电压和在 $B = 0$ 的两倍相对地过电压间变化。

C. 5 数值算例⁵⁾

一个 $U_m = 550$ kV (1 p. u. = 450 kV_p) 系统的典型相-相-地绝缘结构, 相间绝缘强度用常数 $B = 0.6$ 表示。由此得到常数 $F_1 = 0.456$ 和 $F_2 = 0.085$ 。

相对地过电压参数(相峰值法)为:

$$U_{e2} = 2.0 \text{ p. u.} = 900 \text{ kV}$$

$$S_e = 0.25 \text{ p. u.} = 113 \text{ kV}$$

$$U_{et} = 2.25 \text{ p. u.} = 1\ 013 \text{ kV}$$

由此推导出的相间过电压参数为:

$$U_{p2} = 3.08 \text{ p. u.} = 1\ 386 \text{ kV}$$

$$S_p = 0.338 \text{ p. u.} = 152 \text{ kV}$$

$$U_{pt} = 3.42 \text{ p. u.} = 1\ 539 \text{ kV}$$

相对地代表性过电压幅值等于相对地过电压。用上面给出的常数, 由公式(C. 14)到公式(C. 16)可求得相间过电压幅值为:

$$U_{p2re} = 3.14 \text{ p. u.} = 1\ 413 \text{ kV}$$

$$S_{pre} = 0.35 \text{ p. u.} = 158 \text{ kV}$$

$$U_{ptre} = 3.58 \text{ p. u.} = 1\ 611 \text{ kV}$$

则对于 $K_{cs} = 1.15$, 所需的耐受电压值为:

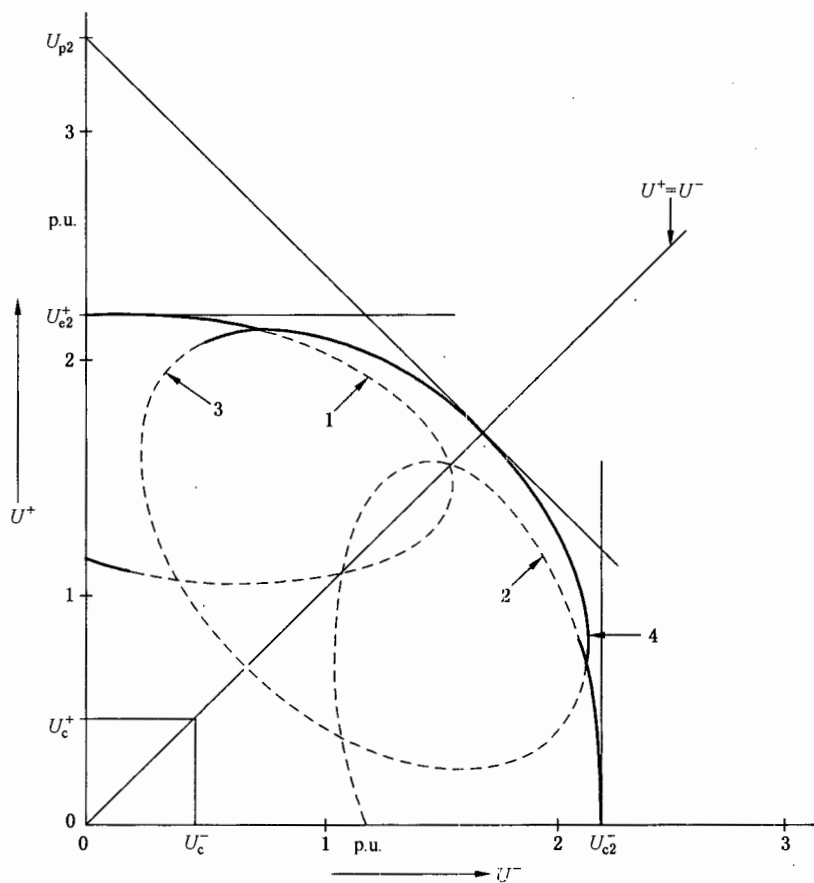
相对地: $U_w = U_{e2} \times 1.15 = 1\ 035$ kV;

相间(标称值): $U_w = U_{p2} \times 1.15 = 1\ 593$ kV;

相间(计算值): $U_w = U_{p2re} \times 1.15 = 1\ 624$ kV。

从 GB 311.1—2012 之 6.8 选取标准耐受电压为: 相对地 1 050 kV, 相间 1 675 kV。

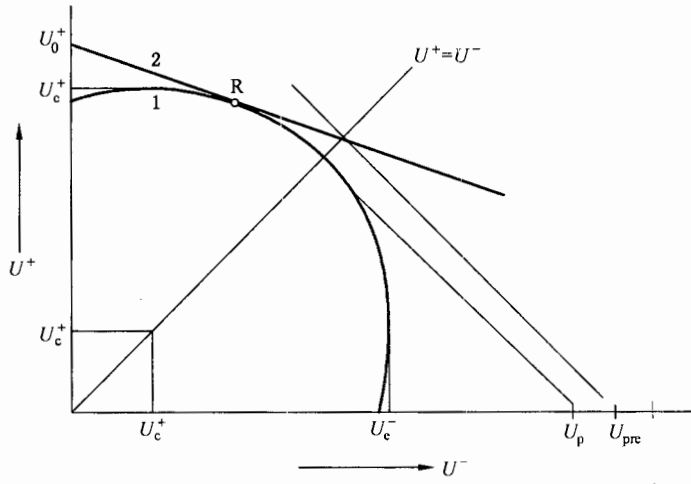
5) 采标说明: IEC 60071-2 算例为 $U_m = 765$ kV, 考虑到我国情况, 取 $U_m = 550$ kV 作为算例。



说明：

- 1——相对地过电压正极性峰值时刻的过电压；
- 2——相对地过电压负极性峰值时刻的过电压；
- 3——相间过电压峰值时刻的过电压；
- 4——覆盖所有时刻的建议简化曲线。

图 C.1 恒定概率密度的双变量相间过电压曲线及有关 2% 值的切线



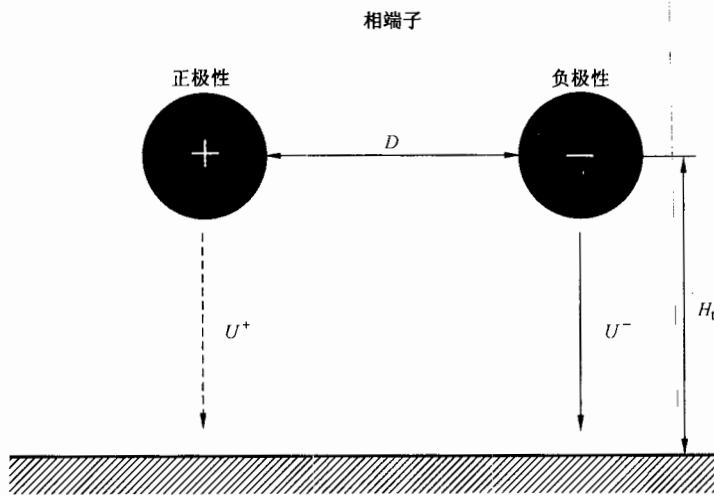
说明：

1——相对地过电压 $U_c^+ = U_c^-$ 情况下,对所考虑概率下的相间过电压给出的简化过电压圆；

2——绝缘的50%闪络特性；

R——最重要的作用过电压。

图 C.2 确定代表性相间过电压 U_{pre} 的原则

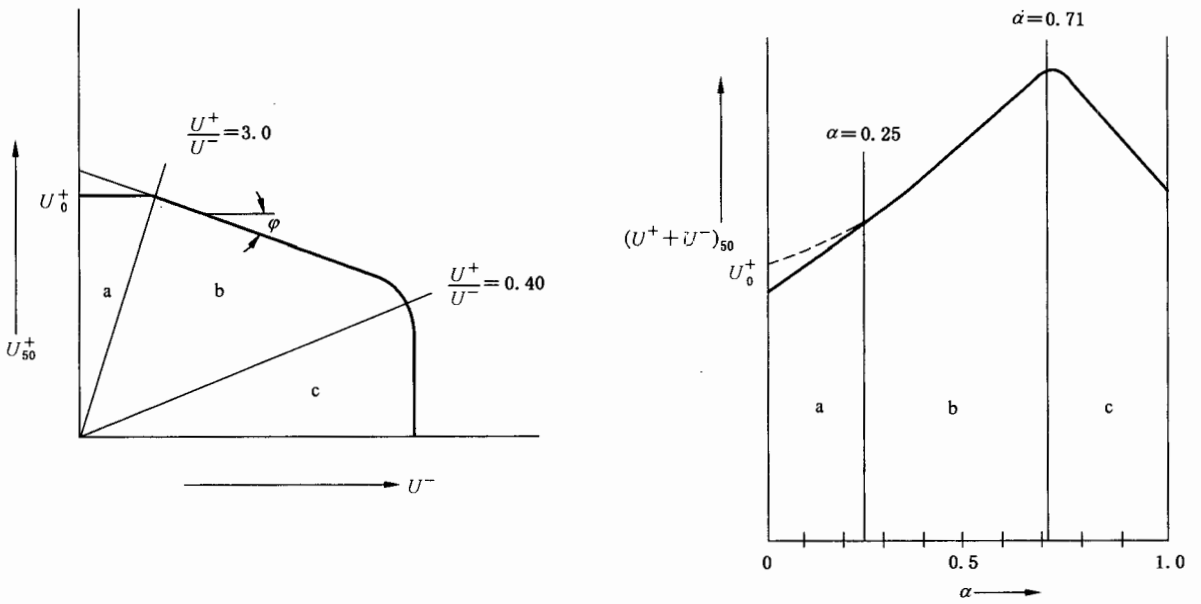


说明：

U^+ —— 正极性电压分量；

U^- —— 负极性电压分量。

图 C.3 相-相-地绝缘结构示意图



a) 50%正极性分量与负极性分量的关系

b) 50%总闪络电压与 α 的关系

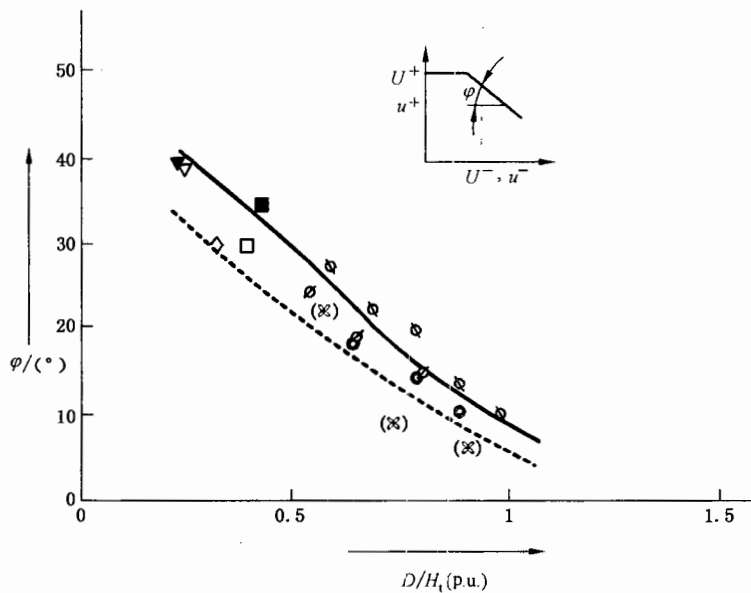
说明:

区域 a——从正极性相端子对地闪络;

区域 b——相端子间闪络;

区域 c——从负极性相端子对地闪络。

图 C.4 相-相-地绝缘 50%操作冲击闪络电压的说明



说明:

-----最小值;

——平均值。

图 C.5 区域 b 相间绝缘特性倾角和空气间隙距离 D 与地面高度 H_1 比值的关系

附 录 D

(资料性附录)

变压器的传递过电压

D.1 一般说明

某些情况下,设计变压器过电压保护时,通过变压器传递的电压和冲击波可能是决定性的因素。用普通断路器和保护装置与大容量发电机或电动机连接的变压器是这种情况的一个例子。特殊情况是一个绕组(例如因断路器操作)从电网永久或偶然切除的变压器。

冲击波可通过变压器从一个绕组系统传递到另一绕组系统。某些情况下,冲击也可在相间传递,这可增加已受到直接冲击作用的相邻相上的作用电压。例如,用真空断路器投切电动机和在隔离开关操作产生的冲击电压的 GIS 中,都发生过问题。

通过变压器传递的电压主要是快波前和缓波前过电压,传递模式取决于有关的变化率。原则上应考虑下述传递方式:

——静电或容性传递;

——通过变压器一次/或二次回路的自然振荡传递(绕组对地电容和自电感组成振荡回路);

——正常电磁传递,它主要取决于变压器的匝数比、漏感和负载阻抗。

振荡分量是衰减的,它叠加在电磁传递分量上。如不因谐振效应而放大,则振荡分量通常很小,且不是很重要。因此,对这种传递机制这里不做进一步考虑。

传递冲击波通常既有容性传递分量,也有感性传递分量,它们叠加于工频电压之上。因接地故障而产生的最终电压升高包含在工频电压中。容性传递分量通常在兆赫级范围,在传递冲击中最先出现,感性传递分量出现在容性分量之后。其波形和幅值随时间变化,因为电压沿一次绕组的分布与时间有关。

冲击波传递的特殊情况是容性传递的中性点电位升高。当变压器高低压绕组变比很高(如发电机变压器或有第三绕组的变压器)且低压侧电容很小时,出现接地故障和其他变压器不对称事件时就会发生这种情况。

传递电压幅值取决于变压器结构(特别是绕组结构——饼式、纠集式绕组等,绕组在铁芯柱上的排列方式以及漏感)、绕组阻尼、变压器电容、线圈的矢量组别与电网的连接方式等。此外,入射波的波形也有重要作用。

影响传递冲击波幅值的某些结构因素很难计算。因此,定量估计这些冲击波幅值最适用的方法是对它们进行测量,例如进行冲击波的反复测量。

下面将说明过电压通过变压器传递的最重要特点,给出的公式仅适用于对冲击波幅值进行粗略估算。术语一次和二次在使用上与绕组号数无关,仅表示正常的功率传输方向,即冲击波从一次绕组进入,再传递到二次绕组。

D.2 传递暂时过电压

如二次绕组中性点绝缘,且与一次绕组相比额定电压相当低的话,则一次相对地电压的不对称可导致二次侧的相对地过电压。电压不对称最常见的原因是接地故障。传递暂时过电压幅值取决于接地故

障期间的一次电压和变压器的电容比,以及与二次侧连接的可能的附加电容。

最大相对地过电压可估算为公式(D.1):

$$U_{2e} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} U_{1e} + \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

U_{2e} ——一次侧接地故障产生的二次侧过电压;

U_{1e} ——接地故障期间一次绕组中性点电压;

$U_{2N}/\sqrt{3}$ ——二次侧额定相对地电压;

C_{12} ——一次和二次绕组间的电容;

C_2 ——二次绕组和与它相连接设备的相对地电容。

所需电容值可从变压器例行试验记录中获得。

严格说,电压应按矢量相加,但按上述的算术相加会得到更保守的结果。

如二次绕组相对地电容太小,则会产生极高的过电压。例如若 110 kV 变压器的额定二次电压为 10 kV 或更低,则该过电压有可能超过额定工频耐受电压。

导致容性传递过电压过高的另一种情况是一次侧发生接地故障期间,中性点绝缘的二次绕组从电网完全脱离。

在二次侧所有各相增加相对地间电容可降低这些过电压的幅值。通常一台 0.1 μ F 的电容器就足够了。

D.3 容性传递冲击波

通常,仅当冲击波从高压侧向低压侧传递时,容性传递才是危险的。

容性传递冲击波可起源于一次侧因快波前或缓波前过电压侵入而产生的电位升高。与一次电压不平衡时的情况一样,过电压通过绕组间电容传递到二次侧,但在一次电压快速变化时,仅靠近端子的部分绕组参与冲击波传递,从而引起重要差别。因此,一般情况下,应考虑电容的分布特性,可用公式(D.2)从串联和对地分布电容(分别为 C_s 和 C_e)来计算变压器绕组的冲击电容:

$$C_{1in} = \sqrt{C_s C_e} \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

C_e 值可从测量得到,但 C_s 值必须根据绕组结构估算,因此,只有制造厂才能给出电容 C_s 值。

注:上述 C_{1in} 计算的有效性的基础是假定绕组的初始分布常数很高^[9]。当使用串联电容很大的高压绕组时(即分布常数很低),则这种近似准确度较低。

冲击电容组成一个电容分压器(参见图 D.1),可用它来粗略估算容性传递冲击的幅值。当存在工频电压影响时,在二次侧产生的初始电压尖峰由公式(D.3)计算:

$$U_{T2} = ghU_{T1} \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

$g = C_{1in}/(C_{1in} + C_{3in})$ ——分压器的分压比;

h ——工频电压因数。

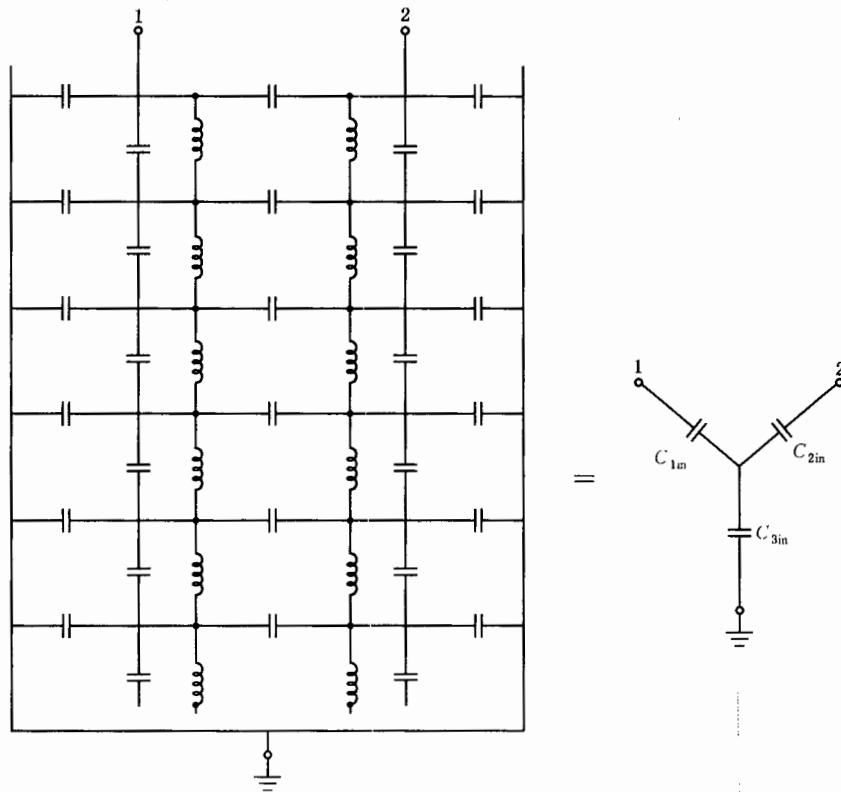


图 D.1 变压器绕组分布电容和表示绕组的等值回路

分压比 g 的范围从 0.0 到至少 0.4。它可从变压器制造厂的已有数据估算或用低压脉冲试验测量。低压绕组为 Δ 连接而高压绕组为 Y 连接时将进一步降低参数 g 的值。

因数 h 的值取决于作用电压类型和变压器绕组连接方式：

- 对缓波前过电压, 假定 $h=1$ 是正确的(与绕组连接方式无关);
- 对快波前过电压, $h>1$:

- 对 Y/ Δ 或 Δ /Y 连接, $h=1.15$ (粗略估计);
- 对 Y/Y 或 Δ / Δ 连接, $h=1.07$ (粗略估计)。

对快波前过电压情况, U_{T1} 值可为接在一次侧避雷器的保护水平, 对缓波前过电压的情况, U_{T1} 值可为相对地作用电压峰值(假定避雷器不动作)。

容性传递冲击波幅值因绕组损耗而衰减, 这一影响, 以及变压器所接负荷, 都可有效降低容性尖峰幅值。通常, 只有在变压器降压比很大且低压侧连接电容很小时, 这些过电压尖峰才是危险的。如侵入波陡度很高或被截断, 则可能出现严重情况。接在二次侧的避雷器可有效限制容性传递过电压的幅值, 特别是当设备不容许波前快速上升的电压作用(如发电机和电动机)的情况, 或变压器电容比不利时, 加装电容器可进一步改善保护, 否则二次侧避雷器动作会过于频繁。

D.4 感性传递冲击波

冲击波的感性传递通常是最重要的传递模式, 而且在中等电压变化率时就会发生。通常, 当初始分布以振荡方式向电压和电流最终分布变化时, 感性冲击波传递与一次绕组的冲击电压和电流的瞬态特性有关, 这意味着传递冲击波是由以不同频率振荡的几个分量组成的。

这种传递模式下,变压器基本以正常模式运行,惯用的工频方法可用于冲击幅值和波形的分析。因而,电压分量的等值回路和公式的推导都相当容易,但另一方面,所须变压器参数值的确定却很复杂。因此,确定冲击幅值时,通常只使用简单的近似公式,因而直接测量可给出感性传递冲击波幅值更准确可靠的数据。

感性传递冲击波的幅值取决于:

- 一次电压幅值(包括避雷器动作);
- 侵入波持续时间;
- 变压器特性(绕组数量、匝数比、短路阻抗和矢量组);
- 二次侧连接线路的波阻抗;
- 负荷特性。

变压器二次侧感应的冲击波可借助公式(D.4)估算:

$$U_{T2} = hq_r J W U_{T1} \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

- h ——由公式(D.3)定义的因数;
- q_r ——二次回路对传递冲击波的响应因数;
- J ——取决于绕组连接方式的因数;
- W ——变压器二次侧相间电压与一次侧相间电压之比。

响应因数 q_r 可基本上确定了振荡的幅值, q_r 值大小取决于二次绕组漏感、与它相连的负荷以及侵入波上升率。绕组在铁心柱上的排列方式也对 q_r 值有影响(甚至其他绕组的负荷也会降低 q_r 值),因此,很难预先确定 q_r 值。

下面将给出饼式绕组变压器的某些值,以说明这种情况,如变压器绕组为其他类型,则应与制造厂联系。

某些典型 q_r 值可规定如下:

如变压器接到负荷很小的架空线,对快波前冲击,当二次绕组额定电压从 245 kV 变到 36 kV 时, q_r 值变化从 0.3~1.3。

对负荷很小的类似系统的操作冲击,通常 $q_r < 1.8$ 。

如变压器与电缆连接,对快波前冲击和缓波前冲击,通常都可取 $q_r < 1.0$ 。

显然,三绕组变压器的情况会导致较高 q_r 值。对这种变压器, q_r 值甚至会超过 1.7~2.0。

仅一相有冲击波和在两相有幅值相等极性相反冲击波时的 J 值如图 D.2 所示。它列出了变压器 8 种不同连接组的情况。该图假定系统电压比为 1。

从高压绕组向低压绕组感性传递的冲击波在下述情况下可能是危险的:

- 二次电压绕组不与电网连接;
- 二次绕组额定电压低,但额定功率大(如发电机变压器);
- 绕组为三绕组变压器的第三绕组。

即使变压器所有端子都配备有相对地避雷器,感性传递冲击波对 Δ 连接二次绕组相间绝缘也可能是危险的。因此,可能还必须安装相间避雷器。当冲击从低压绕组向高压绕组传递,特别是如产生了谐振电压升高时,可能产生很高的过电压。

宜对每种情况进行相对地保护和相间保护的研究。要求制造厂提供必要的信息。在所有相对地和相间(必要时,例如 Y/ Δ 连接的变压器)都安装避雷器通常可提供可靠保护。加装电容器通常并不能降低感性传递过电压。

项目	变压器连接方式			仅一相上有冲击波 $U_A=1, U_B=U_C=0$		在二相上有相反极性的冲击波 $U_A=1, U_B=-1, U_C=0$	
	高压绕组	低压绕组	第三绕组	高压绕组	低压绕组	高压绕组	低压绕组
1	$Y(e)$	$y(e)$	$(-, y)$				
2	$Y(e)$	$y(i)$	$(-, y)$				
3	$Y(e)$	d	$(-, y, d)$				
4	$Y(i)$	$y(e, i)$	$(-, y, d)$				
5	$Y(i)$	d	$(-, y, d)$				
6	$Y(i)$	$Z(e, i)$	$(-, y, d)$				
7	D	$y(e, i)$	$(-, y, d)$				
8	D	d	$(-, y, d)$				

说明:

Y, y ——星形(Y)连接绕组;

D, d ——三角形(Δ)连接绕组;

Z ——Z连接绕组;

U_A, U_B, U_C ——高压端子 A、B、C 上的过电压幅值。

图 D.2 表示绕组连接方式对感性冲击波传递影响的因数 J 值

附录 E
(资料性附录)
雷电过电压

E.1 一般说明

变电站的过电压取决于从架空线侵入变电站的过电压的幅值和波形,以及变电站本身的行波特性。这种侵入波过电压的发生频率由与变电站相连的架空线路的雷电性能决定。对没有安装避雷器的变电站或变电站的一部分,最重要的参数是侵入波冲击的幅值;对避雷器保护的变电站,最重要参数是侵入波陡度和避雷器与所考虑设备间的距离。

侵入波过电压的陡度主要因架空线的电晕衰减效应而降低^[9]。这意味着,只有雷电在距变电站一定距离内击中架空线,则侵入波冲击的陡度才可以足够产生某一定幅值的过电压(见 E.2 的详细解释)。更远的雷电,无论冲击波幅值如何,其陡度都过低。

了解这一临界距离相当重要。在使用瞬态程序进行过电压的详细数值计算时,宜仔细模拟这一距离内的架空线。文献[9]给出了应包含在这类计算中的必要参数的推荐值。此外,计及过电压幅值发生频率而进行的所有简化也基于类似考虑。

E.2 确定临界距离(X_p)

E.2.1 变电站有避雷器保护

本条款包含 4.3.4.5 中讨论的避雷器保护的更详细的资料。

当不止一条架空线与变电站相连时,侵入波冲击的初始陡度(S)可除以线路数(n)。然而需要强调,线路数应是考虑了雷暴期间线路可能停止运行的最少数量。

考虑到侵入波冲击的陡度与在架空线上的传播距离成反比降低,式(1)中使用的侵入波冲击陡度 S 近似等于公式(E.1):

$$S = 1/(nK_{co}X) \dots\dots\dots(E.1)$$

式中:

n ——与变电站连接的架空线路条数;如涉及多回路杆塔,则必须考虑双回路系统之间的反击,建议将线路数除以 2;

K_{co} ——表 E.1 中的电晕衰减常数 $[\mu s/(kV \cdot m)]$;

X ——雷击点和变电站的距离,单位为米(m)。

注:推导该公式时假定被保护对象和架空线连接点间距离上的传播时间小于侵入波波前时间的一半。在近似估算时,被保护对象与连接点间的引线因此可以忽略。这一方法在确定式(E.1)的临界距离时是合理的,因为这里涉及的侵入波陡度较低。但用假定侵入波计算产生的实际过电压时,这样简化有可能偏于乐观。

计算设备上的过电压时,使用公式(1)的这一陡度值得到的结果不够准确。然而,用公式(E.2)估算临界距离 X_p 是足够(保守)的:

$$X_p = 2T/[nK_{co}(U - U_{pl})] \dots\dots\dots(E.2)$$

式中:

U ——所考虑的最低过电压幅值;

T ——变电站中任意被保护点与最近避雷器间的最长传播时间,单位为微秒(μs);

U_{pl} ——避雷器雷电冲击保护水平。

距离大于 X_p 时, 陡度将会降低, 因而设备上的过电压一般会低于假定值 U 。

E. 2.2 变电站的自保护

从架空线侵入变电站的雷击过电压, 由于在变电站内的折、反射, 无须避雷器动作即可降至 U_{pl} 以下, 这就是变电站的自保护。其基本要求是与变电站相连的线路数必须足够多。

表 E.1 电晕衰减常数 K_{co}

导线结构	$K_{co}/[\mu s/(kV \cdot m)]$
单导线	1.5×10^{-6}
双分裂导线	1.0×10^{-6}
3 或 4 分裂导线	0.6×10^{-6}
6 或 8 分裂导线	0.4×10^{-6}

必需的线路数可估算为公式(E. 3):

$$n \geq 4(U_{50}^-/U) - 1 \quad \dots\dots\dots (E. 3)$$

式中:

n —— 架空线路数;

U_{50}^- —— 线路绝缘的负极性 50% 雷电冲击闪络电压;

U —— 所考虑的过电压幅值。

此外, 在其他线路的折反射使侵入波冲击降低前, 侵入波必须不产生过高的过电压。如侵入波陡度因线路电晕衰减效应变得很低, 以致变电站可看成集中参数元件, 则这一要求是可以满足的。当雷击点超过临界距离时, 即可认为适用这种情况公式(E. 4):

$$X_p \geq 4(T/K_{co}U) \quad \dots\dots\dots (E. 4)$$

式中:

T —— 距变电站母线最远点的传播时间, 单位为微秒(μs)。

对 GIS 或电缆连接的变电站, 如其线路入口处的折反射已经使过电压降低至允许值以下, 则它们会表现出良好的自保护效应。如满足公式(E. 5)条件, 则可认为自保护是有效的:

$$U > \frac{6Z_s}{Z_s + Z_L} U_{50}^- \quad \dots\dots\dots (E. 5)$$

式中:

Z_s —— 变电站的波阻抗;

Z_L —— 架空线的波阻抗。

然而, 雷击点到变电站入口的距离可能不会太短以致使变电站的反射与雷电冲击波相干扰。因此应采用下列最短临界距离:

—— 对绕击, $X_p = 1$ 个档距;

—— 对反击, $X_p = 2$ 基杆塔。

E. 3 代表性雷电过电压幅值的估算

E. 3.1 概述

鉴于包括架空线性能模拟的行波计算过程比较复杂, 参考文献[9]提出了一种简化法。这种方法包括用要求的预设故障率计算雷电流以及用包括短线段等值回路的变电站的行波计算来计算过电压。

E.3.2 绕击

决定侵入波的雷电流由临界距离内的绕击率确定,超过它的概率为公式(E.6):

$$F(I) = F(I_m) + (R_l/R_p) \quad \dots\dots\dots (E.6)$$

式中:

$F(I_m)$ ——与最大绕击电流对应的雷电流概率;

R_l ——所考虑的变电站的预设故障率;

R_p ——临界距离内的绕击率。

注:绕击率可从绕击闪络率公式(E.7)求得:

$$R_p = \frac{R_{sf}}{F(I_{cr}) - F(I_m)} \quad \dots\dots\dots (E.7)$$

式中:

R_{sf} ——绕击闪络率;

$F(I_{cr})$ ——导致绝缘负极性闪络的雷电流所对应的概率。

相应于此概率的电流可由绕击范围内的雷击电流概率分布中求得,它可在出版物中查到。

侵入波过电压的幅值用式(E.8)确定,其陡度可假定由式(E.9)求取:

$$U_1 = Z_l I/2 \quad \dots\dots\dots (E.8)$$

$$S = 1/(K_{co} X_T) \quad \dots\dots\dots (E.9)$$

式中:

$$X_T = X_p/4$$

其半峰值时间应为 $140 \mu s$,如该峰值高于线路绝缘负极性闪络电压的 1.6 倍,则采用该值为侵入波峰值。

可使用侵入波进行变电站内的行波计算,并得到这一预设故障率下不同位置的代表性过电压。

注:对某些分裂导线,其电晕起始电压可以很高,假定波前线性上升可导致过电压估算值偏低。这种情况下,建议使用更适当的侵入波波前的表达式。

E.3.3 反击

决定设计用侵入波的雷电流是由临界距离内对架空线杆塔和屏蔽地线的雷击次数确定的。超过该雷电流的概率为公式(E.10):

$$F(I) = R_l/R_r \quad \dots\dots\dots (E.10)$$

式中:

R_l ——所考虑变电站的预设故障率;

注:此故障率指变电站的故障率。

R_r ——临界距离内对架空线杆塔和屏蔽地线的雷击率。

该电流在塔基阻抗上产生的电压由它的时间响应和电流的关系确定。当塔基阻抗的延伸半径小于 30 m 时,其时间响应可以忽略,塔基阻抗由公式(E.11)求得:

$$R_{lc} = \frac{R_{lc}}{\sqrt{1 + \frac{l}{I_g}}} \quad \dots\dots\dots (E.11)$$

式中:

R_{lc} ——小电流低频率时的电阻;

I_g ——临界电流,单位为千安(kA)。

临界电流 I_g 表示土壤电离,可由公式(E.12)估算:

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \frac{E_0 \rho}{R_{lc}^2} \quad \dots\dots\dots (E.12)$$

式中：

ρ ——土壤电阻率，单位为欧姆米($\Omega \cdot m$)；

E_0 ——土壤电离场强(推荐值：400 kV/m)。

于是设计用侵入波幅值为公式(E. 13)：

$$U_1 = \frac{(1 - c_f)R_{lc}I}{\sqrt{1 + I/I_g}} \dots\dots\dots (E. 13)$$

式中：

c_f ——地线与相导线间的耦合因数，其典型值为：对单地线， $c_f = 0.15$ ；对双地线， $c_f = 0.35$ 。

如该幅值高于线路绝缘负极性闪络电压的 1.6 倍，则应采用该侵入波幅值。

设计用侵入波的波尾呈指数下降，其时间常数 τ 由公式(E. 14)给出，其波前呈线性上升，波前陡度 S 由公式(E. 15)给出：

$$\tau = \frac{Z_e L_{sp}}{R_{lc} c} \dots\dots\dots (E. 14)$$

式中：

Z_e ——地线波阻抗。其典型值为：单地线 500 Ω ，双地线 270 Ω ；

L_{sp} ——档距，单位为米(m)；

c ——光速(推荐值：300 m/ μs)。

$$S = 1/(K_{co} X_T) \dots\dots\dots (E. 15)$$

式中：

K_{co} ——由表 E. 1 给出；

X_T ——由式(E. 9)给出。

计算变电站的行波时，与变电站相连的单导线长度取为 X_T ，其波阻抗与相导线相同。如果侵入波冲击幅值高于正极性 50% 雷电冲击闪络电压的 1.6 倍，则该简化不再适用，建议进行更详细的研究。塔基延伸半径大于 30 m 时也应这样做。

可得到代表性过电压幅值与预设故障率的两个依存关系，一个是绕击，一个反击。将确定的过电压幅值的两个预设故障率相加即可得到总体关系。

注：对某些分裂导线，其电晕起始电压很高，波前线性上升的假定可导致过电压估算值偏低。这种情况下，建议使用更适当的侵入波波前的表达式。

E. 4 简化法

对 E. 2 和 E. 3 所述的方法可用给出的基本原则进一步简化，但采用以下假定：

——距变电站一定距离内发生的雷击事件在被保护设备上产生的过电压高于设定值，而在此距离外的所有事件产生的过电压均低于设定值；

——设备上的过电压可按公式(1)和公式(E. 1)计算。

如前所述，这两个假定都不是严格适用的。首先，在某距离内发生的事件严重程度并不相同。它取决于雷电流或侵入波过电压的幅值。其次，过电压可能高于按公式(1)和公式(E. 1)的计算值。然而，现行的避雷器对设备保护的实践已经表明，这两个不准确性足以相互抵消。

将距离 X 代入公式(E. 1)的结果表明，由于变电站的接地影响，临近变电站的杆塔不会发生反击。 X 的最小值是架空线的一个档距，因此，公式(1)中采用的有代表性陡度为：

$$S_{rp} = 1/[K_{co}(L_{sp} + L_1)] \dots\dots\dots (E. 16)$$

式中：

$L_1 = R_1/R_{km}$ ——雷电闪络率等于要求的预设故障率的线路段长度^[8]。

R_1 ——采用的过电压预设故障率(1/a)；

R_{km} ——对应于变电站前 1 km 架空线的设计年跳闸率[通常使用单位:1/(100 km·a);推荐单位:1/(m·a)]。

注:该公式的推导依据是,人们发现,由于变电站的良好接地,靠近变电站的杆塔不发生反击闪络,架空线的第一个档距也不发生绕击。因此,存在一个产生侵入波冲击最大可能陡度的最短传播距离。公式(E.16)的解析表达式是对这一现象的近似。也可以用较大档距值或长度 L 代替两者之和。

于是,将 S_{rp} 代入公式(1),且对于输电线路令 $A = 2/(K_{co}c)$,则代表性的雷电过电压与预设故障率的关系为公式(E.17):

$$U_{rp} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_1} \dots\dots\dots (E.17)$$

式中:

- U_{rp} ——代表性雷电过电压的幅值,单位为千伏(kV);
- A ——表 E.2 给出的因数,它表示与变电站相连架空线的雷电性能;
- U_{pl} ——避雷器雷电保护水平,单位为千伏(kV);
- n ——与变电站相连线路的最低数量($n=1$ 或 $n=2$);
- L ——图 3 所示的距离,单位为米(m), $L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$;
- L_{sp} ——档距,单位为米(m);
- L_1 ——其跳闸率等于预设故障率的架空线长度,单位为米(m)。

用其跳闸率等于可接受故障率 R_a 的线路长度 L_a 取代 L_1 可得到作用在设备上的雷电过电压:

$$L_a = R_a / R_{km} \dots\dots\dots (E.18)$$

设备上的雷电冲击电压等于:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_a} \dots\dots\dots (E.19)$$

式中:

- U_{cw} ——雷电冲击配合耐受电压;
- L_a ——跳闸率等于可接受故障率的架空线段长度;
- R_a ——设备可接受故障率。

对输电线路,因数 A 可从表 E.2 得到,电晕衰减常数 K_{co} 可从表 E.1 得到。对配电系统,雷电过电压通常是多相的,必须考虑相导线的分流作用。对线路杆塔,雷击时不止一个杆塔发生闪络可进一步降低雷电过电压。对这类线路,因数 A 已按运行实践修正。

GIS 的波阻抗远低于架空线路波阻抗,因此它的保护一般优于敞开式变电站。与敞开式变电站相比,如何估计 GIS 的保护改进还无法给出一般性的有效建议。然而,用适用于敞开式变电站的公式(E.19)估算设备上的雷电冲击电压以及保护范围都是偏于保守的,将比值 A/n 降到户外变电站使用值的一半仍然适用。

E.5 代表性雷电过电压的设定最大值

如现有变电站的雷电绝缘性能已知,则对新变电站,代表性雷电过电压的设定最大值可估算为公式(E.20):

$$\frac{U_{rp2}}{U_{pl2}} = 1 + \frac{n_1}{n_2} \frac{L_2}{L_1} \frac{U_{pl1}}{U_{rp1}} \left(\frac{U_{rp1}}{U_{pl1}} - 1 \right) \dots\dots\dots (E.20)$$

式中:

- U_{rp} ——设定最大代表性过电压;
- U_{pl} ——避雷器雷电冲击保护水平;
- n ——与变电站相连的处于运行的架空线最低数量;
- 下标 1 ——有满意运行经验的情况;

下标 2——新变电站的情况；

$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$ (见图 3)。

也可令公式(E. 16)中的预设故障率为零,因而 $L_i = 0$,由此求出设定最大值,即[见公式(E. 17)]:

$$U_{rp} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp}} \dots\dots\dots (E. 21)$$

E.6 代表性雷电过电压的 EMTP 行波法计算值

如上所述,雷电过电压的简化计算方法的一些假定是不严格的。简化计算结果和实际情况可能有较大的差异。在电压等级较高的变电站,采用更细致的方法进行雷电侵入波的计算,使计算结果更合理已经是普遍的工程要求。而计算技术的发展,也使对包括线路和变电站的全面的行波分析不再是一件困难的事。一般使用 EMTP 程序进行雷电侵入波过电压计算。

雷电过电压计算时采用的线路和变电站各元件的模型可参考 GB/T 311.4。

雷击电源采用电流源,而不采用电压源。雷电流的波形为 2.6/50 μ s。

雷击点的位置宜包括近区(2 km 进线段内)和远区(进线段外)。一般情况下,雷击点离变电站近,其侵入波过电压较高。因此可以主要考虑近区雷击。

表 E.2 各种架空线的因数 A [适用于式(E. 17)和式(E. 19)]

线路类型	A/kV
配电线路(相间闪络)	
——带接地横担(低电压下对地闪络)	900
——木杆线路(高电压下对地闪络)	2 700
输电线路(单相对地闪络)	
——单导线	4 500
——双分裂导线	7 000
——4 分裂导线	11 000
——6 或 8 分裂导线	17 000

计算雷电绕击侵入波过电压时,最大绕击雷电流由电气几何模型确定。它随地线保护角、地线和导线的高度、和沿线地面倾斜角而变化;计算雷电反击侵入波过电压时,最大反击雷电流推荐值见表 E. 3。

变电站接线方式应结合具体工程运行情况确定。出线多,其侵入波过电压一般较低。一线一变(一回线路一台变压器)的接线方式是一般运行方式中最严苛的接线方式。有的变电站还需要考虑特殊运行方式,即变电站线路断路器处于开路状态的运行方式,其过电压更严重,但出现的概率较小。

确定代表性雷电过电压时,宜结合变电站的典型接线方式进行计算。

在进行变电站雷电侵入波过电压绝缘配合时,一般运行方式下的内绝缘安全裕度要求不低于 15%,特殊方式下内绝缘安全裕度要求不低于 10%,外绝缘安全裕度要求不低于 5%。

表 E.3 计算反击侵入波过电压时的最大雷电流推荐值

系统标称电压/kV	330	500	750	1 000
最大雷电流/kA	185	216	200	250/230
注 1: 1 000 kV 变电站的雷电流:斜线上方数值相对于变电站正常运行方式;斜线下方数值相对于变电站特殊运行方式。 注 2: 750 kV 电网在我国西北地区,其雷电流幅值相对较低,因此最大雷电流计算值相应减小。 注 3: 具体工程在计算雷电侵入波过电压时,可根据当地的雷电活动强度选取最大雷电流值。				

附录 F (资料性附录)

由实验数据计算空气间隙击穿强度

F.1 一般说明

本附录的意图不是给设备委员会提供一种计算空气间隙的方法。确切地说,其目的是帮助使用者估算设备尺寸和空气间隙电气强度,并计及大气修正因数。

须注意,这里给出的公式是以实验数据为基础的并是为了绝缘配合的目的。对间隙距离大于 1 m,可假定给出符合这些实验结果的近似值。

打算用这些公式来校验 GB 311.1—2012 附录 A 中给出的最小间隙距离,或者评价对附录中给出的那些数值的偏差的使用者在这样做时应注意,GB 311.1—2012 附录 A 中给出的数值并不是对应于 U_{50} ,而是对应于耐受条件,以及对一些附加考虑的具体化,包括可行性、经济、经验和环境条件(污秽、雨、昆虫等)。

对小于 1 m 的间隙误差特别大,此时公式给出的准确度值得怀疑。

F.2 对工频电压的绝缘响应特性

工频电压下空气间隙的击穿,可由棒板间隙结构求得最低耐受电压,棒-板间隙的 50% 击穿电压可由式(F.1)近似求得。此公式适用于空气间隙距离 $d \leq 3$ m。

$$U_{50RP} = 750\sqrt{2}\ln(1 + 0.55d^{1.2}) \text{ (kV 峰值, m)} \quad \text{.....(F.1)}$$

工频电压下 U_{50RP} 的峰值比具有临界波前时间的正极性操作冲击高约 20%~30%。若设定的标准偏差为 U_{50} 的 3%,则可在 U_{50} 的 90% 下耐受。

在工频电压下间隙结构对电气强度的影响一般比操作冲击下的要小:

- 对约 1 m 以内的间隙,影响很小;
- 对大于 2 m 的间隙,电气强度可用式(F.2)计算(适用于干状态):

$$U_{50} = U_{50RP}(1.35K - 0.35K^2) \quad \text{.....(F.2)}$$

式中:

K——间隙系数(由操作冲击试验确定),如表 F.2 中所示。

对间隙距离在 1 m~2 m 之间,公式(F.2)可以采用,但结果趋于保守。

当存在绝缘子时,闪络电压与相对于基准情况(无绝缘子时的相同空气间隙)相比会显著降低,尤其是湿度较大时。

一般,在工频电压及正常运行条件下和暂时过电压下的放电是由于恶劣的环境条件或由于设备绝缘特性的老化使得绝缘耐受强度的极度下降引起的。

雨对空气间隙的影响可忽略,尤其是对那些呈现最低电气强度的结构,但是,雨会降低绝缘子的绝缘强度,特别是对裙间距离小的支柱绝缘子。降低的程度取决于雨量、绝缘子结构和雨水的电导率。

雨水加污秽会极大地降低绝缘强度,最严重的情况通常是由雾或小雨加上脏污的绝缘子引起的(见 5.3.2.2)。实际上这些情况可在外绝缘设计中予以说明。相应的绝缘污秽水平可由每平方米中 NaCl 的克数表示的等值附盐密度(DSDD)来模拟,DSDD 表示熔融污秽的稳态电导率与熔融 NaCl 的等值含量之间的关系,DSDD 的确定要求对运行地区已有绝缘性能或者对从现场研究获得的统计数据进行分析。

尽管更希望对已有性能的分析,但若已有绝缘从未发生过污秽闪络,则这种分析不可能提供足够的信息。

统计数据的要求要求进行几年的现场监测,因为要用对外露绝缘子冲刷进行的 DSDD 的直接测量或其他方法,如泄漏电流测量、化学分析或电阻率测量来收集数据。

注: DSDD 概念对非瓷绝缘的适用性不太清楚。现在研究表明表面亲水现象可能更重要,建议使用者在使用时注意。

环境条件的统计描述通常要求大量数据。老化的统计描述更加困难。所以本部分中不推荐用统计方法来估算工频电压下的绝缘响应。

F.3 对缓波前过电压的绝缘响应

在缓波前冲击波作用下,一给定的自恢复绝缘的耐受电压明显低于同极性的快波前冲击波下之值。根据大量操作冲击试验结果,空气间隙可由标准波前时间下观察到的最低绝缘强度来表征,它是空气间隙几何特性的函数,主要是间隙距离 d 及电极结构。在不同间隙距离 d 中,正极性的棒-板间隙的绝缘强度最低,并以此作为基准。对长度达 25 m 以内的棒板间隙正极性标准波前时间下的强度的实验数据可合理地由公式(F.3)^[11]近似表示:

$$U_{50RP} = 1\ 080 \ln(0.46d + 1) \text{ (kV 峰值, m)} \dots\dots\dots \text{(F. 3)}$$

对标准操作冲击,公式(F.4)给出了较好的近似:

$$U_{50RP} = 500d^{0.6} \text{ (kV 峰值, m)} \dots\dots\dots \text{(F. 4)}$$

公式(F.3)和公式(F.4)适用于海平面($H=0$),因此,在采用绝缘配合程序时,要求进行海拔修正(见 GB 311.1—2012 附录 B)。

空气间隙中的绝缘子通常降低正极性缓波前冲击击穿强度。对于干燥的悬式绝缘子,影响较小,但对支柱绝缘子则影响可能是重要的。

对于其他的间隙结构,可采用表 F.2 中给出的间隙因数[见公式(F.5)]:

$$U_{50} = KU_{50RP} \dots\dots\dots \text{(F. 5)}$$

注意,当 $K \geq 1.45$ 时,负极性下的击穿电压可能变的比正极性的要低。

对相间结构,可采用类似的间隙因数。但此时间隙因数不仅受间隙结构的影响而且还会受到以负极性分量峰值除以负极性和正极性分量峰值之和得到的比率 α 的影响(见附录 C)。

表 F.1 给出了 $\alpha=0.5$ 及 $\alpha=0.33$ 时常见的相间间隙几何布置下,间隙因数的典型值。

注:对任一给定的间隙结构,实际间隙因数只能由试验才能准确确定。

F.4 快波前过电压的绝缘响应

在快波前冲击作用下,棒板间隙结构的负极性击穿强度大大高于正极性下的值。另外,负极性下间隙强度与间隙距离的关系是非线性的,而在正极性下则是线性的。对 1 m~10 m 的棒板间隙施加标准雷电冲击,正极性下绝缘强度的实验数据可近似为公式(F.6):

$$U_{50RP} = 530d \text{ (kV 峰值, m)} \dots\dots\dots \text{(F. 6)}$$

一般,适用于操作冲击的间隙因数不能直接用于雷电冲击强度,但是,实验结果表明,对一般的空气间隙的正极性击穿梯度的标幺值(基准值为棒板间隙的击穿梯度)随着正极性操作冲击间隙因数的增加而线性增加。对快波前雷电冲击,间隙因数 K_{EE}^+ 可根据操作冲击间隙因数作如下近似表示[见公式(F.7)]:

$$K_{EE}^+ = 0.74 + 0.26K \dots\dots\dots \text{(F. 7)}$$

为了估算架空线绝缘子串负极性下的击穿强度,确定袭入到变电站的冲击波的幅值,可采用公

式(F.8):

$$U_{50} = 700d \quad (\text{kV 峰值, m}) \quad \dots\dots\dots (\text{F.8})$$

公式(F.6)和公式(F.8)适用于海平面($H=0$),所以在采用绝缘配合时要求进行海拔校正(见GB 311.1—2012 附录B)。

对如导线-顶架及导线-横担结构,绝缘子对强度的影响可忽略,因此,这些结构的绝缘强度接近于空气间隙的强度。

对别的一些不常见的结构,尤其是包含长间隙的结构(如范围II中),建议进行特定的试验以获得准确的结果。对这些结构,电极之间存在绝缘子对放电过程起重要作用,而且严重影响 U_{50} 值,影响程度取决于绝缘子类型(单元之间的电容、金具之间沿安装的绝缘子的距离)。对几乎没有金具的绝缘子(例如支柱绝缘子、长棒、复合绝缘)其影响较小。当间隙中包括悬式绝缘子时,很难把结果推广到类似于没有绝缘子的结构的情况。然而应指出,使用屏蔽环可使绝缘子两端处的第一个绝缘子上的作用电压降低,此时,悬式绝缘子的影响可降低。对带有绝缘子的更实用结构,若其两端的作用电压低于棒板间隙的情况则还可降低这种影响。

对空气间隙,正极性冲击下标准偏差约为 U_{50} 的3%,负极性时约为 U_{50} 的5%。当存在绝缘子时,标准偏差有所增大,最大值可达5%~9%,与出现 U_{50} 的最大降低值的情况有关。在其他情况下,可采用接近空气间隙的值。

雨水对闪络电压的影响无论对空气间隙还是绝缘串通常是次要的。

对快波前过电压,击穿时间明显受到以击穿电压为基准的所加冲击幅值的影响,对接近 U_{50} 值的冲击,闪络出现在标准冲击的波尾,闪络时间缩短,形成众所周知的伏秒曲线上翘。

表 F.1 典型相间几何形状间隙因数

结 构	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.33$
环-环或大的光滑电极	1.80	1.70
交叉导线	1.65	1.53
棒-棒或导线-导线(沿跨距方向)	1.62	1.52
支持母线(附件)	1.50	1.40
非对称几何布置	1.45	1.36

注:按照参考文献[1]和[4]。

表 F.2 相对地操作冲击击穿的典型间隙因数 K

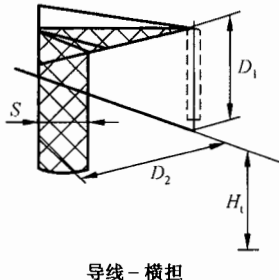
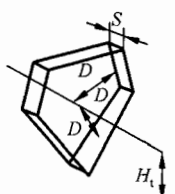
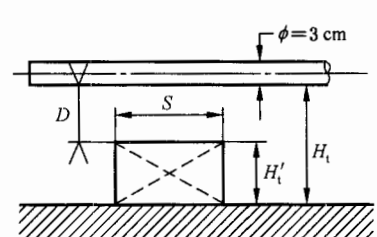
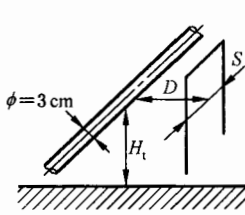
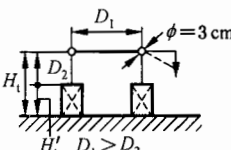
间隙形式	参数	典型范围	参考值
	K	1.36~1.58	1.45
	D_2/D_1	1~2	1.5
	H_1/D_1	3.34~10	6
	S/D_1	0.167~0.2	0.2

表 F.2 (续)

间隙形式	参数	典型范围	参考值
 <p>导线-窗</p>	K	1.22~1.32	1.25
	H_1'/D	8~6.7	6
	S/D	0.4~0.1	0.2
 <p>导线-较低的结构</p>	K	1.18~1.35	1.15 1.47 导线-板 导线-棒
	H_1'/H_1	0.75~0.75	0 0.909
	H_1'/D	3~3	0 10
	S/D	1.4~0.05	— 0
 <p>导线-横向结构</p>	K	1.28~1.63	1.45
	H_1'/D	2~10	6
	S/D	1~0.1	0.2
 <p>纵向 (棒-棒结构)</p>	K	1.03~1.66	1.35
	H_1'/H_1	0.2~0.9	0
	D_1/H_1	0.1~0.8	0.5

附 录 G
(资料性附录)
绝缘配合程序的示例⁶⁾

G.1 一般说明

绝缘配合程序包括确定作用在设备上的各类电压以及根据可接受的保护裕度或可接受的性能指标以选取相应的标准(或额定)耐受电压。这些裕度或指标主要是经验数据。

GB 311.1—2012 中所述的绝缘配合程序包括四个主要步骤:

- 步骤 1: 确定代表性过电压, U_{rp} ;
- 步骤 2: 确定配合耐受电压, U_{cw} ;
- 步骤 3: 确定要求耐受电压, U_{rw} ;
- 步骤 4: 确定标准耐受电压, U_w 。

这些主要步骤及其关系将在本附录中的示例说明。为了便于应用,不但给出了如何确定要求耐受电压,而且还给出了有关相对地及相间间隙距离的计算。关于 K_{cd} 的选取在以下计算示例中,分别按 IEC 和我国惯例进行计算。

严格地说,代表性过电压并非系统中出现的过电压,但代表了实际过电压在设备上的相同的电气作用。这样,若假定的实际过电压和试验电压的波形不同,则须对代表性过电压进行修正,以使该试验真实地验证绝缘强度。

在考虑作用电压和电气强度的配合时,必须考虑各种类型的作用电压和相应的绝缘特性,从而要区分自恢复绝缘(外绝缘)和非自恢复绝缘(内绝缘)。对非自恢复绝缘,可采用确定性法来确定电气强度的配合;而对自恢复绝缘,可能方便地用统计法。下面的示例试图说明这些考虑。

G.2 范围 I 内系统(标称电压 220 kV)的数值示例

所分析的系统示于图 10,将绝缘配合程序用于 1 号变电站。

对范围 I 的设备,GB 311.1—2012 中规定了短时工频和雷电冲击耐受电压。

对要求的缓波前(操作)耐受电压计算可换算到短时工频耐受电压;也可换算到快波前(雷电)冲击耐受电压。本示例包含了这种换算。

对范围 I 内的正常系统,绝缘配合的结果是规定一组同时适用于相对地和相间的标准绝缘水平(即一组标准耐受电压)。

本示例的第一部分未考虑非正常运行工况。但在第二部分,强调了应考虑各种起因产生的作用电压以及它们的影响的重要性,这种特殊运行工况考虑了在 2 号变电站内的电容器开合。

本例所取基本数据为:

系统标称电压: $U_n = 220$ kV; 设备最高电压: $U_m = 252$ kV; 污秽等级: 严重; 海拔: $H = 1\ 000$ m。

G.2.1 第一部分: 正常运行工况

G.2.1.1 第一步: 确定代表性过电压 U_{rp} 值

G.2.1.1.1 工频电压

在绝缘配合程序中,最重要的参考电压是设备最高电压 U_m , $U_m \geq U_s$ (U_s 为最高系统电压,即相间

6) 采标说明: 这里给出我国四个典型电压等级即设备最高电压; 12 kV、252 kV、550 kV 和 1 100 kV 的计算示例。

电压有效值)。包括补偿在内的系统应设计运行在或低于该电压 U_s 。

1 号变电站处严重污秽区,绝缘子的最小爬距推荐为 25 mm/kV。

G.2.1.1.2 暂时过电压

暂时过电压与系统结构、容量、参数、运行方式以及各种安全自动装置的特性有关。暂时过电压升高除要求增大绝缘强度外,还对选择过电压保护装置的参数有重要影响。

暂时过电压一般由接地故障和甩负荷,发电机超速等引起。

相对地代表性过电压为 1.3 p. u.。

可以得到代表性暂时过电压的最大值:

——相对地: $U_{rp} = 189 \text{ kV}$;

——相间: $U_{rp} = 328 \text{ kV}$ 。

G.2.1.1.3 缓波前过电压

系统研究确认由远处雷击产生地缓波前过电压对绝缘配合并不重要,并通常被忽略(见 4.3.3.6)。另外,由于本示例中,中性点是直接接地的,因此不必考虑因接地故障引起的缓波前过电压。

确定代表性过电压时,需要区别在远端合闸和重合闸过程中可能处于开路条件下的线路入口处的设备(1 号变电站)和本地(2 号变电站)电源侧的设备,它们将以不同方式受到不同电压的作用。

a) 影响线路入口设备的特殊过电压(1 号变电站)

用相峰值法(参见附录 C),若从 2 号变电站对线路重合闸可引起 1 号变电站入口处 2% 过电压为: $U_{e2} = 3.0 \text{ p. u.}$; $U_{p2} = 4.5 \text{ p. u.}$ 。在无避雷器时,线路入口处设备上的代表性过电压为这些过电压分布的截断值。如附录 C 所述:

$$U_{et} = 1.25U_{e2} - 0.25 = 721 \text{ kV};$$

$$U_{pt} = 1.25U_{p2} - 0.43 = 1\ 070 \text{ kV}。$$

b) 影响所有设备的过电压(1 号变电站)

位于 1 号变电站内的所有设备会受到由于本端线路合闸、重合闸产生的缓波前过电压。但是,送端的冲击电压远低于受端之值。考虑到在实际电网中无恒定的受端和送端,故仍取 $U_{e2} = 3.0 \text{ p. u.}$ (617 kV); $U_{p2} = 4.5 \text{ p. u.}$ (926 kV),因此 $U_{et} = 721 \text{ kV}$; $U_{pt} = 1\ 070 \text{ kV}$ 。

c) 线路入口处的避雷器(1 号变电站)

为了控制远端重合闸可能的严重过电压,在线路入口处安装与计划用于变压器保护相同的金属氧化物避雷器(参见 4.3.3.8),其额定值为它们能承受最严重的暂时过电压循环(幅值和持续时间)。额定电压为 200 kV 时,避雷器的保护特性是:

操作冲击保护水平: $U_{ps} = 442 \text{ kV}$;

雷电冲击保护水平: $U_{pl} = 520 \text{ kV}$ 。

如 4.3.3.8 所述,采用避雷器后,代表性缓波前过电压可由 U_{ps} (相对地)或由 $1.7U_{ps}$ (相间)直接给出,但这些保护值应低于相应的最大缓波前过电压(U_{et} 和 U_{pt})。这一情况适用于任何作用电压,所以,代表性缓波前过电压为:

——相对地: $U_{rp} = 442 \text{ kV}$ (对任何设备);

——相间: $U_{rp} = 751 \text{ kV}$ (包括线路入口处的设备)。

G.2.1.1.4 快波前过电压

在本例中,仅考虑由于雷电产生的快波前过电压。用简化统计法可直接求得配合耐受电压(见 G.2.1.2.3),而不必计算代表性快波前过电压。

G.2.1.2 第二步:确定配合耐受电压 U_{cw} 值

根据本部分第5条款,需要将上一步确定的代表性过电压乘以不同的因数,这些因数可能因电压波形的不同而不同,同时考虑采用的性能指标(经济和运行上可接受的故障率),还考虑了输入数据的误差(如避雷器数据)。

G.2.1.2.1 暂时过电压

对这类过电压,配合耐受电压等于代表性暂时过电压(参见5.3.1),换句话说,配合因数 $K_c = 1.0$ 。因此:

- 相对地: $U_{rp} = 189 \text{ kV}$;
- 相间: $U_{rp} = 328 \text{ kV}$ 。

G.2.1.2.2 缓波前过电压

采用确定性法。用这一方法时,必须考虑由避雷器限制过电压畸变了过电压的统计分布。约在避雷器的保护水平处,过电压的概率分布有一明显的凸出(参见5.3.2.1)。因此,有关避雷器保护特性或设备绝缘强度的小的不确定度可能引起故障率的异常增加。由鉴于此,图6给出了为求得 U_{cw} 值而与避雷器保护水平相乘的确定性配合因数 K_{cd} 值。

对所有设备:

- 相对地: $U_{ps}/U_{e2} = 442/617 = 0.716, K_{cd} = 1.095(/1.0)$;
- 相间: $1.7U_{ps}/U_{p2} = 751/926 = 0.811, K_{cd} = 1.02$ 。

因此,配合耐受电压 $U_{cw} = K_{cd} \times U_{rp}$, 对所有设备:

- 相对地: $U_{cw} = 1.095 \times 442 = 484 \text{ kV} (/1.0 \times 442 = 442 \text{ kV})$;
- 相间: $U_{cw} = 1.02 \times 751 = 766 \text{ kV}$ 。

G.2.1.2.3 快波前过电压

采用统计法(参见5.3.3.2),更确切地说,采用简化统计法(参见E.4)。这里,乘以 U_{rp} 的因数是根

据特定线路结构以及因避雷器与被保护设备之间的距离导致的影响(计算值)来确定的。首先确定跳闸率等于可接受的变电站设备故障率 R_a 的架空线路长度 L_a ; 然后,考虑距离 L 、进入变电站的线路数 n 和档距 L_{sp} ; 最后计算得到避雷器的有效保护水平,这就是期望的 U_{cw} 值。

本示例中,采用了下列数据:在不同地点(线路入口处以及临近变压器处)安装了雷电保护水平为 $U_{pl} = 520 \text{ kV}$ 的多台避雷器,对内绝缘的最大距离为 $L = 30 \text{ m}$, 对外绝缘, $L = 50 \text{ m}$; 二条铁塔线路 ($n = 2$) 的特性用 $A = 7\,000$ 表示(见表E.2); 档距为 $L_{sp} = 400 \text{ m}$; 该线路的雷电性能为 $R_{km} = 1/(100 \text{ km. 年})$; 对安装在1号变电站的设备,可接受的故障率为 $R_a = 1/(400 \text{ 年})$ 。

因此,由公式(E.18)可求得 $L_a = R_a / R_{km} = 250 \text{ m}$; 用公式(E.9)可求得配合耐受电压:

- 外绝缘: $U_{cw} = 520 + [(7\,000/2) \times 50 / (400 + 250)] = 789 \text{ kV}$;
- 内绝缘: $U_{cw} = 520 + [(7\,000/2) \times 30 / (400 + 250)] = 681 \text{ kV}$ 。

快波前过电压对相对地以及相间的影响是一样的。

G.2.1.3 第三步:确定要求耐受电压 U_{rw} 值

要求耐受电压可以将配合耐受电压乘以两个修正因数来求得。因数 K_a 是设备安装地点的海拔修正因数; 因数 K_s 是安全因数。

G.2.1.3.1 安全因数

推荐的安全因数如6.3.5, 因数 K_s 适用于任何类型电压波形(暂时、缓波前、快波前), 同时既适用

于相对地绝缘,也适用于相间绝缘。

——外绝缘: $K_s=1.05$;

——内绝缘: $K_s=1.15$ 。

G.2.1.3.2 海拔修正因数

参见 GB 311.1—2012 附录 B,海拔修正因数 K_a 仅适用于外绝缘,其数值取决于过电压波形(主要是参数 q)。

——污秽绝缘子要求进行短时工频耐受试验,此时, $q=0.5$;

——操作冲击耐受, q 值是配合耐受电压的函数,见 GB 311.1—2012 附录 B;

● 相对地: $U_{cw}=484\text{ kV},q=0.92$;

● 相间: $U_{cw}=751\text{ kV},q=1.00$;

——雷电冲击耐受: $q=1.00$ 。

本例中,设备处在海拔 $H=1\ 000\text{ m}$,相应的 K_a 值为:

——工频耐受: $K_a=1.063$ (相对地及相间);

——操作冲击耐受: $K_a=1.120$ (相对地); $K_a=1.130$ (相间);

——雷电冲击耐受: $K_a=1.130$ (相对地及相间)。

G.2.1.3.3 要求耐受电压

要求耐受电压 $U_{rw}=U_{cw}\times K_s\times K_a$ 。

——暂时过电压(有效值)

● 相对地外绝缘: $U_{rw}=189\times 1.05\times 1.063=211\text{ kV}$;

● 相间外绝缘: $U_{rw}=328\times 1.05\times 1.063=366\text{ kV}$ 。

● 相对地内绝缘: $U_{rw}=189\times 1.15=217\text{ kV}$;

● 相间内绝缘: $U_{rw}=328\times 1.15=377\text{ kV}$ 。

——缓波前过电压(峰值)

● 相对地外绝缘: $U_{rw}=484\times 1.05\times 1.120=569\text{ kV}$;

● 相对地内绝缘: $U_{rw}=484\times 1.15=557\text{ kV}(/442\times 1.15=508\text{ kV})$;

● 相间外绝缘: $U_{rw}=766\times 1.05\times 1.130=909\text{ kV}$;

● 相间内绝缘: $U_{rw}=766\times 1.15=881\text{ kV}$ 。

——对快波前过电压(峰值)

● (相间及相对地)外绝缘: $U_{rw}=789\times 1.05\times 1.130=936\text{ kV}$;

● (相间及相对地)内绝缘: $U_{rw}=681\times 1.15=783\text{ kV}$ 。

G.2.1.4 第四步:将缓波前要求耐受电压换算至短时工频和雷电冲击电压

在范围 I,绝缘水平用标准短时工频耐受电压和雷电冲击耐受电压表征。使用表 1 给出的试验换算因数可将要求的缓波前耐受电压(峰值)换算得到短时工频耐受电压(有效值)。

G.2.1.4.1 换算到短时工频耐受电压(SDW)

——相对地外绝缘

$$SDW=569(0.6+569/8\ 500)=380\text{ kV}$$

干燥状态;

$$SDW=569\times 0.6=341\text{ kV}$$

清洁的绝缘子、湿状态;

——相间外绝缘

$$SDW=909(0.6+909/12\ 700)=611\text{ kV}$$

干燥状态;

——相对地内绝缘

$$SDW = 557 \times 0.5 = 279 \text{ kV} (/508 \times 0.5 = 254 \text{ kV})$$

液体浸渍绝缘；

$$SDW = 557 \times 0.7 = 390 \text{ kV} (/508 \times 0.7 = 356 \text{ kV})$$

GIS 的绝缘。

——相间内绝缘

$$SDW = 881 \times 0.5 = 441 \text{ kV}$$

液体浸渍绝缘；

$$SDW = 881 \times 0.7 = 617 \text{ kV}$$

GIS 的绝缘。

G.2.1.4.2 换算到雷电冲击耐受电压(LIW)

——相对地外绝缘

$$LIW = 569(1.05 + 569/6\ 000) = 651 \text{ kV}$$

干燥状态；

$$LIW = 569 \times 1.3 = 740 \text{ kV}$$

清洁的绝缘子、湿状态；

——相间外绝缘

$$LIW = 909(1.05 + 909/9\ 000) = 1\ 046 \text{ kV}$$

干燥状态；

——相对地内绝缘

$$LIW = 557 \times 1.1 = 613 \text{ kV} (/508 \times 1.1 = 559 \text{ kV})$$

液体浸渍绝缘；

$$LIW = 557 \times 1.25 = 696 \text{ kV} (/508 \times 1.25 = 635 \text{ kV})$$

GIS 的绝缘。

——相间内绝缘

$$LIW = 881 \times 1.1 = 969 \text{ kV}。$$

G.2.1.5 第五步：标准耐受电压值 U_w 的选取

表 G.1 汇总了上述计算结果。这些数值是检验设备能否耐受的最小要求耐受电压。在范围 I，要求的操作冲击耐受电压通常用标准短时工频试验或标准雷电冲击试验来替代。表 G.1 中 $U_{rw(c)}$ 就是经换算后得到的相应值，在本例中，仅考虑换到到雷电冲击试验的换算值，不必考虑换算到短时工频试验的换算值。

标准电压应从表 G.1 中短时工频和雷电冲击试验对应的黑体数字，且应从 GB 311.1—2012 的 6.7 和 6.8 条中选取。通常，规定的试验电压从 GB 311.1—2012 表 2 中所列的标准绝缘水中选取。

对 $U_m = 252 \text{ kV}$ 设备，相应的标准绝缘水平为 395 kV(短时工频)和 950 kV(雷电冲击)。这组数值可以满足变电站所有设备的相对地和相间内绝缘的要求；对于外绝缘相间，要求 1 046 kV(缓波前过电压换算值)，一方面可以用最小相间空气间隙距离来保证，根据 GB 311.1—2012 附录 A，此时相应的最小距离为 2.5 m；另一方面，在 GB 311.1—2012 表 2 中增列了 1 050 kV 的雷电冲击耐受电压。

基于有关分析、更全面的 EMTP 计算和国内外长期的经验，GB 311.1—2012 表 2 中给出了 $U_m = 252 \text{ kV}$ 设备的标准绝缘水平，推荐采用 850 kV_p，360 kV_{r.m.s} 和 950 kV_p，395 kV_{r.m.s} 的两个标准耐受电压的组合。

需要指出的是，以上计算是依照 IEC 60071-2 的方法进行的，计算所得的耐受电压值相对较高。该方法偏严，计算结果偏保守。本示例仅仅介绍此方法。

G.2.2 第二部分：2 号变电站内电容器开合的影响

本部分主要讨论由于 2 号变电站(远端)内开合电容器可能产生的缓波前过电压。所有其他情况如同第一部分。

表 G.1 $U_m = 252 \text{ kV}$ 设备耐受电压的计算结果

U_{rw} 值 短时工频:kV(有效值) 操作或雷电:kV(峰值)		外绝缘		内绝缘	
		$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$	$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$
短时工频	相对地	211	380/341	217	279/390
	相间	366	611	377	617/441
操作冲击	相对地	569	—	557/(508)	—
	相间	909	—	881	—
雷电冲击	相对地	936	740/651	783	613/696
	相间	936	1 046	783	969

系统分析表明 1 号变电站中的设备会受到 2 号变电站内开合电容器组产生的过电压的作用。其过电压典型数值如下：

——相对地： $U_{e2} = 2.5 \text{ p. u.}$ ； $U_{er} = 3.0 \text{ p. u.}$ ；

——相间： $U_{p2} = 3.75 \text{ p. u.}$ ； $U_{pr} = 4.5 \text{ p. u.}$ 。

根据 1 号变电站实际结构，此时缓波前代表性过电压由避雷器的保护水平决定，即：

——相对地： $U_{rp} = 442 \text{ kV}$ ；

——相间： $U_{rp} = 751 \text{ kV}$ 。

根据第一部分的计算可以得到与表 G.1 中一样的最小要求耐受电压。

G.3 范围 II 设备的数值计算例

基本数据：

系统标称电压： $U_n = 500 \text{ kV}$ ；

设备最高电压： $U_m = 550 \text{ kV}$ ；

海拔： $H = 1\ 000 \text{ m}$ ；

污秽等级为轻到中等。

G.3.1 第一步：确定代表性过电压 U_{rp} 值

有代表性的暂时过电压和缓波前过电压由系统研究(数字模拟、或两者结合)和现场实测结果确定。

G.3.1.1 暂时过电压

——线路断路器的线路侧： $U_{rp} = 1.4 \text{ p. u.} = 445 \text{ kV(r. m. s)}$ ；

——线路断路器的变电站侧： $U_{rp} = 1.3 \text{ p. u.} = 413 \text{ kV(r. m. s)}$ 。

G.3.1.2 缓波前过电压

考虑空载线路合闸、单相重合闸和成功的三相重合闸，线路上产生的相对地统计过电压不大于 2.0 p. u. 。为简化，均取：

$U_{e2} = 2.0 \text{ p. u.} = 900 \text{ kV(峰值)}$ 。

在变电站内和线路端可装金属氧化物避雷器 MOA 以限制此种过电压。MOA 的操作冲击保护水平 U_{ps} 为:

- MOA 的额定电压为 420 kV 时(用于母线侧): $U_{ps}=852$ kV;
- MOA 的额定电压为 444 kV 时(用于线路侧): $U_{ps}=900$ kV。

G.3.1.3 快波前过电压

a) 简化统计法

该方法可直接求得配合耐受电压,在确定代表性过电压时,仅考虑相对地。

取为 MOA 的雷电冲击保护水平 U_{pl} , 即其 10 kA(8/20 μ s)(20 kA) 时的残压, 当 MOA 的额定电压为 420 kV 和 444 kV 时, U_{pl} 分别为 960 kV(1 046 kV) 和 1 050 kV(1 106 kV)[本部分以 10 kA 为例计算]。

b) EMTP 计算法

该方法计算所得的设备上的雷电侵入波过电压作为代表性雷电过电压。

变电站运行方式包括一般运行方式中最苛刻的接线方式, 即一线一变(一回线路一台变压器)方式。考虑变电站典型接线, 避雷器和被保护设备之间的距离如表 G.2 所示。

设备上雷电侵入波过电压计算结果如表 G.3 所列, 以此作为代表性雷电过电压。

表 G.2 500 kV 变电站避雷器和被保护设备之间的典型距离

单位为米

变压器离 MOA 距离	电抗器离 MOA 距离	断路器离 MOA 距离
50	50	100

表 G.3 500 kV 变电站设备上典型雷电侵入波过电压水平和代表性雷电过电压 U_{rp} 单位为千伏

变压器	电抗器	断路器
1 345	1 327	1 260

G.3.2 第二步: 确定配合耐受电压 U_{cw} 值

配合耐受电压 U_{cw} 是将配合因数 K_c 乘以代表性过电压 U_{rp} 求得的。对确定性法, $K_c = K_{cd}$; 对统计法, $K_c = K_{cs}$ 。应分别求取内绝缘和外绝缘的配合耐受电压。

G.3.2.1 内绝缘的 U_{cw}

分别确定内绝缘的工频、缓波前以及快波前的 U_{cw} 。

G.3.2.1.1 暂时过电压

对该类过电压, 配合耐受电压等于代表性暂时过电压, 换言之, 配合因数 $K_c = 1$ 。于是相对地的 $U_{cw} = 445$ kV。

G.3.2.1.2 缓波前过电压

对受避雷器保护的设备, 最大缓波前过电压等于避雷器的操作冲击保护水平, 即: 852 kV 或 900 kV。考虑到缓波前过电压统计分布的非对称, 根据图 6 求取 K_{cd} :

- $U_{ps} = 852$ kV 时, $U_{ps}/U_{e2} = 0.946$, $K_{cd} = 1.05(1/1.0)$;

—— $U_{ps}=900$ kV 时, $U_{ps}/U_{e2}=1.0$, $K_{cd}=1.04(1.0)$ 。

受避雷器保护的设备上配合耐受电压分别为:

——线路端之设备: $U_{cw}=900 \times 1.04=936$ kV ($/900 \times 1.0=900$ kV);

——变电站内设备: $U_{cw}=852 \times 1.05=895$ kV ($/852 \times 1.0=852$ kV)。

G.3.2.1.3 快波前过电压

a) 简化统计法

对受避雷器保护的的设备,最大快波前过电压等于避雷器的雷电冲击保护水平,即 $U_{cw}=960$ kV 和 $U_{cw}=1\ 050$ kV。

考虑到避雷器和被保护设备之间的距离 L ,应按公式(E.19)计算求取该距离影响产生的附加电压。相关参数分别为:

A ——由表 E.2 选取,考虑导线为 4 分裂时 $A=11\ 000$;

n ——与变电站相连的最少架空线路,本例中取 $n=2$;

L ——根据图 3,为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 之和,本例中取 $L=60$ m;

L_{sp} ——线路档距,本例中取 $L_{sp}=400$ m;

L_a ——雷电闪络率等于可接受故障率时的架空线长度,假定可接受故障率为 0.002/年,线路雷电闪络率为 0.15/(100 km·年);计算得 $L_a=1.3$ km。附加电压 $AL/[n(L_{sp}+L_a)]=194$ kV。于是,对两种避雷器:

$U_{pi}=960$ kV 时, $U_{cw}=960+194=1\ 154$ kV;

$U_{pi}=1\ 050$ kV 时, $U_{cw}=1\ 050+194=1\ 244$ kV。

b) EMTP 计算法

配合系数取为 1,代表性雷电过电压也就是配合耐受电压。

变压器 $U_{cw}=1\ 345$ kV;断路器 $U_{cw}=1\ 260$ kV;电抗器 $U_{cw}=1\ 327$ kV。

G.3.2.2 外绝缘的 U_{cw}

根据绝缘特性,采用统计法来确定外绝缘的缓波前过电压的配合耐受电压。

G.3.2.2.1 暂时过电压

与内绝缘的 U_{cw} 相同。

G.3.2.2.2 缓波前过电压

统计配合因数 K_{cs} 值由经验已经证明的可接受的绝缘故障风险来确定。图 8 给出了故障风险率 R 和 K_{cs} 的关系。通常 R 的可接受值为 10^{-3} ,于是 $K_{cs}=1.06$ 。配合耐受电压 $U_{cw}=900 \times 1.06=954$ kV。

G.3.2.2.3 快波前过电压

a) 不必确定快波前过电压的配合耐受电压,因为由操作冲击耐受电压确定的最小外绝缘或空气间隙足以满足雷电冲击耐受电压所要求的。

b) 与内绝缘相同。

G.3.3 第三步:确定要求耐受电压 U_{rw} 值

要求耐受电压是将配合耐受电压乘以安全因数 K_s 来求取。 K_s 值如下:

——内绝缘: $K_s=1.15$;

——外绝缘: $K_s=1.05$ 。

对外绝缘,还应考虑大气修正因数 K_a 。

G.3.3.1 内绝缘的 U_{rw}

——暂时过电压

- 1) 线路侧: $U_{rw} = 445 \times 1.15 = 512 \text{ kV(r. m. s)}$;
- 2) 变电站母线设备: $U_{rw} = 413 \times 1.15 = 475 \text{ kV(r. m. s)}$ 。

——缓波前过电压

- 1) 线路端设备: $U_{rw} = 936 \times 1.15 = 1\ 076 \text{ kV}(/900 \times 1.15 = 1\ 035 \text{ kV})$;
- 2) 变电站侧设备: $U_{rw} = 895 \times 1.15 = 1\ 029 \text{ kV}(/852 \times 1.15 = 980 \text{ kV})$ 。

——快波前过电压

- 1) 母线侧: $U_{rw} = 1\ 154 \times 1.15 = 1\ 370 \text{ kV}$;
线路侧: $U_{rw} = 1\ 244 \times 1.15 = 1\ 431 \text{ kV}$ 。
- 2) 变压器: $U_{rw} = 1\ 345 \times 1.15 = 1\ 547 \text{ kV}$;
断路器: $U_{rw} = 1\ 260 \times 1.15 = 1\ 449 \text{ kV}$;
电抗器: $U_{rw} = 1\ 327 \times 1.15 = 1\ 526 \text{ kV}$ 。

G.3.3.2 外绝缘的 U_{rw}

——暂时过电压

因考虑污秽绝缘子的短时工频试验的大气修正因数,参见 GB 311.1—2012 附录 B, $q=0.5$, 考虑海拔 $H=1\ 000 \text{ m}$ 时,可求得 $K_a=1.063$ 。于是:

- 1) 线路侧: $U_{rw} = 445 \times 1.05 \times 1.063 = 497 \text{ kV(r. m. s)}$
- 2) 变电站母线设备: $U_{rw} = 413 \times 1.05 \times 1.063 = 461 \text{ kV(r. m. s)}$ 。

——缓波前过电压

缓波前过电压的大气修正因数,考虑海拔高度 $1\ 000 \text{ m}$,相对地绝缘,可由 GB 311.1—2012 附录 B 图 B.1 查得指数 q 。 $U_{cw} = 954 \text{ kV}$, $q=0.71$, $K_a=1.09$;安全裕度系数 $K_s=1.05$ 。于是:
 $U_{rw} = 954 \times 1.05 \times 1.09 = 1\ 092 \text{ kV}$ 。

——快波前过电压

$q=1$, $K_a=1.131$, 于是:

- 1) 母线侧: $U_{cw} = 1\ 154 \times 1.05 \times 1.131 = 1\ 370 \text{ kV}$;
线路侧: $U_{cw} = 1\ 244 \times 1.05 \times 1.131 = 1\ 477 \text{ kV}$ 。
- 2) 变压器: $U_{cw} = 1\ 345 \times 1.05 \times 1.131 = 1\ 597 \text{ kV}$;
断路器: $U_{cw} = 1\ 260 \times 1.05 \times 1.131 = 1\ 496 \text{ kV}$;
电抗器: $U_{cw} = 1\ 327 \times 1.05 \times 1.131 = 1\ 576 \text{ kV}$ 。

G.3.4 第四步:短时工频耐受电压换算至操作冲击耐受电压

应将要求短时工频耐受电压换算到等效的操作冲击耐受电压(SIW),见表 2。

——内绝缘:

- 线路侧: $SIW = 512 \text{ kV} \times 2.3 = 1\ 178 \text{ kV}$;
- 变电站母线设备: $SIW = 475 \text{ kV} \times 2.3 = 1\ 093 \text{ kV}$ 。

——外绝缘:

- 线路侧: $SIW = 497 \times 1.7 = 845 \text{ kV}$;
- 变电站母线设备: $SIW = 461 \times 1.7 = 784 \text{ kV}$ 。

G.3.5 第五步:标准绝缘水平 U_w 的确定

设备相对地绝缘的标准耐受电压根据要求耐受电压数值在 GB 311.1—2012 给出的标准化电压系列数中选取,选取的原则是最接近但大于要求耐受电压数值的标准电压值。

表 G.4 $U_m=550$ kV 设备要求耐受电压的计算结果

U_{rw} 值 短时工频:kV(有效值) 操作或雷电:kV(峰值)		外绝缘	内绝缘
		U_{rw}	U_{rw}
短时工频	相对地	497/461	512/475
操作冲击	相对地	1 092	1 178/1 093
雷电冲击 1)	相对地	1 477/1 370	1 431/1 327
雷电冲击 2)	变压器	1 597	1 547
	断路器	1 496	1 449
	电抗器	1 576	1 526

注:斜线上下数值分别对应于线路侧和母线侧。

G.3.5.1 内绝缘的 U_w

——暂时过电压:

按照第四步要求 1 178 kV 的操作冲击电压,考虑到这一要求,可有多种选择。首先,1 178 kV 在 GB 311.1—2012 中不是绝缘水平的标准系列值,可选取 1 175 kV 进行试验;另一选择是用工频电压进行试验。

在 GB 311.1—2012 中,规定了工频短时耐受电压(680 kV 和 740 kV),除了考虑暂时过电压的要求之外,还考虑对绝缘在持续工作电压下的老化性能的考核。

——缓波前过电压:取 1 175 kV 和 1 300 kV。

——快波前过电压:取 1 550 kV。

G.3.5.2 外绝缘的 U_w

——对持续工作电压下的老化性能的考核,工频短时耐受电压取 680 kV 和 740 kV。

——对缓波前过电压:取 1 175 kV 和 1 300 kV。

——对快波前过电压:取 1 550 kV 和 1 675 kV。

变压器、电抗器和断路器的外绝缘即套管外绝缘。

G.3.6 相间绝缘配合考虑

三相设备相间绝缘强度通常用正、负极性相等幅值的冲击进行试验,实际试验值用认为是最严酷的正负极性的缓波前过电压来确定。对 500 kV 变电站, $H_t=12$ m, $D=6$ m,由图 C5 可得 $=30^\circ$ 。于是 $B=\text{tg}\Phi=0.6$,由 C.4 中公式可求得 $F_1=0.463$, $F_2=0.074$ 。相对地缓波前过电压 2% 值 $U_{e2}=2.0$ p. u. = 900 kV,由图 2 查得 $U_{p2}/U_{e2}=1.53$,于是相间缓波前过电压 2% 值 $U_{p2}=900 \times 1.53=1 377$ kV。由公式(C.14)可求得相间代表性过电压: $U_{p2-re}=2(F_1U_{p2}+F_2U_{e2})=1 408$ kV。

配合相间耐受电压: $U_{p-cw}=K_{cs} \times U_{p2-re}=1.15 \times 1 408=1 619$ kV。

根据 GB 311.1—2012 附录 B 可查得海拔修正公式中指数 $q=0.78$, 当 $H=1\ 000\text{ m}$ 时, $K_a=1.1$; 要求相间耐受电压: $U_{p-rw}=K_a \times K_s \times U_{p-cw}=1.1 \times 1.05 \times 1\ 619=1\ 870\text{ kV}$ 。

该电压不在标准系列值中, 而由于在 550 kV 变电站本身没有三相设备, 因此相间试验也不是标准试验。

——暂时过电压:

相对地代表性过电压为(见第一步) 445 kV , 相间代表性过电压为 757 kV 。于是:

- 内绝缘: $U_{rw}=K_c \times K_s \times 757=1.0 \times 1.15 \times 757=871\text{ kV}$;
- 外绝缘: $U_{rw}=K_c \times K_s \times K_a \times 757=1.0 \times 1.15 \times 1.063 \times 757=845\text{ kV}$ 。

——将上述数值换算到相间操作冲击耐受电压(SIW):

- 内绝缘: $SIW=871 \times 2.3=2\ 003\text{ kV}$;
- 外绝缘: $SIW=845 \times 1.7=1\ 437\text{ kV}$ 。

前面确定的相间操作冲击耐受电压 $1\ 870\text{ kV}$ 足以满足外绝缘的工频耐受电压的要求, 但不满足内绝缘的要求, 因此, 需要考虑 G. 2. 5. 1 中提及的特殊措施。

G. 4 1100 kV 设备的数值计算例

基本数据:

系统标称电压: $U_s=1\ 000\text{ kV}$;

设备最高电压: $U_m=1\ 100\text{ kV}$;

海拔: $H=1\ 000\text{ m}$;

污秽等级为轻到中等。

G. 4. 1 第一步: 确定代表性过电压 U_{rp} 值

有代表性的暂时过电压和缓波前过电压由系统研究(瞬态网络分析, 数字模拟、或两者结合)和现场实测结果确定。

G. 4. 1. 1 暂时过电压

——线路断路器的线路侧: $U_{rp}=1.4\text{ p. u. }=889\text{ kV(r. m. s)}$;

——线路断路器的变电站侧: $U_{rp}=1.3\text{ p. u. }=826\text{ kV(r. m. s)}$ 。

G. 4. 1. 2 缓波前过电压

考虑空载线路合闸、单相重合闸、接地故障及其切除等, 在变电站产生的相对地统计过电压不大于 1.6 p. u. 。

$U_{e2}=1.6\text{ p. u. }=1\ 437\text{ kV(peak)}$ 。

在变电站内和线路端可装金属氧化物避雷器 MOA 以限制此种过电压。MOA 的额定电压为 828 kV 时的操作冲击保护水平 U_{ps} 为:

$U_{ps}=1\ 460\text{ kV}$ 。

G. 4. 1. 3 快波前过电压

——其代表性过电压取为 MOA 的雷电冲击保护水平 U_{pl} , 即其 $20\text{ kA}(8/20\ \mu\text{s})$ 时的残压, 当 MOA 的额定电压为 828 kV 时的雷电冲击保护水平 U_{pl} 为:

$U_{pl}=1\ 620\text{ kV}$ 。

——EMTP 程序计算设备上的雷电侵入波过电压作为代表性雷电过电压。

变电站运行方式包括一般运行方式中最苛刻的接线方式,即一线一变(一回线路一台变压器)方式和特殊运行方式(线路断路器断开方式)。考虑变电站典型接线,避雷器和被保护设备之间的距离如表 G.5 所示。

设备上雷电侵入波过电压计算结果如表 G.6 所列。

表 G.5 1 000 kV 变电站避雷器和被保护设备之间的典型距离

单位为米

变压器离 MOA 距离	电抗器离 MOA 距离	断路器离 MOA 距离
20	20	90

表 G.6 1 000 kV 变电站设备上典型雷电侵入波过电压水平 U_{rp}

单位为千伏

变压器	电抗器	断路器
1 714	1 986	1 832

G.4.2 第二步:确定配合耐受电压 U_{cw} 值

配合耐受电压 U_{cw} 是将配合因数 K_c 乘以代表性过电压 U_{rp} 求得的。对确定性法, $K_c = K_{cd}$; 对统计法, $K_c = K_{cs}$ 。应分别求取内绝缘和外绝缘的配合耐受电压。

G.4.2.1 内绝缘的 U_{cw}

分别确定内绝缘的工频、缓波前以及快波前的 U_{cw} 。

G.4.2.1.1 暂时过电压

对该类过电压,配合耐受电压等于代表性暂时过电压,换言之,配合因数 $K_c = 1$ 。于是相对地的 $U_{cw} = 889$ kV。

G.4.2.1.2 缓波前过电压

对受避雷器保护的设备,最大缓波前过电压等于避雷器的操作冲击保护水平,即 1 460 kV。考虑到缓波前过电压统计分布的非对称,根据图 4 求取 K_{cd} :

$$U_{ps}/U_{c2} = 1.016, K_{cd} = 1.03(1.0)。$$

受避雷器保护的设备上配合耐受电压为:

$$U_{cw} = 1\,460 \times 1.03 = 1\,504 \text{ kV} (1\,460 \times 1.0 = 1\,460 \text{ kV})。$$

G.4.2.1.3 快波前过电压

a) 对受避雷器保护的设备,最大快波前过电压等于避雷器的雷电冲击保护水平,即 $U_{rp} = 1\,620$ kV。

考虑到避雷器和被保护设备之间的距离 L ,应按公式(E.19)计算求取该距离影响产生的附加电压。相关参数分别为:

A ——由表 E.2 选取,考虑导线为 8 分裂时 $A = 17\,000$;

n ——与变电站相连的最少架空线路,本例中取 $n = 1$;

L ——根据图 3,为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 之和,本例中取 $L = 30$ m;

L_{sp} ——线路档距,本例中取 $L_{sp} = 400$ m;

L_a ——雷电闪络率等于可接受故障率时的架空线长度,假定可接受故障率(R_a)为0.001/年,线路雷电闪络率(R_m)为0.1/(100 km·年);计算得 $L_a=1.0$ km。附加电压 $AL/[n(L_{sp}+L_a)]=364$ kV。于是:

$$U_{cw}=1\ 620+364=1\ 984\ \text{kV}。$$

b) 配合系数取为1.0,代表性雷电过电压也就是配合耐受电压。

变压器: $U_{cw}=1\ 714$ kV;

断路器: $U_{cw}=1\ 832$ kV;

电抗器: $U_{cw}=1\ 986$ kV。

G.4.2.2 外绝缘的 U_{cw}

根据绝缘特性,采用统计法来确定外绝缘的缓波前过电压的配合耐受电压;当然,统计法也适用于快波前过电压,但在范围Ⅱ通常没必要这样做。

G.4.2.2.1 暂时过电压的 U_{cw}

与内绝缘的 U_{cw} 相同。

G.4.2.2.2 缓波前过电压的 U_{cw}

统计配合因数 K_{cs} 值由经验已经证明的可接受的绝缘故障风险来确定。图8给出了故障风险率 R 和 K_{cs} 的关系。通常 R 的可接受值为 10^{-3} , 于是 $K_{cs}=1.06$ 。配合耐受电压 $U_{cw}=1\ 460 \times 1.06=1\ 548$ kV。

G.4.2.2.3 快波前过电压

a) 不必确定快波前过电压的配合耐受电压,因为由操作冲击耐受电压确定的最小外绝缘或空气间隙足以满足雷电冲击耐受电压所要求的。

b) 与内绝缘相同。

变压器: $U_{cw}=1\ 714$ kV;

断路器: $U_{cw}=1\ 832$ kV;

电抗器: $U_{cw}=1\ 986$ kV。

G.4.3 第三步:确定要求耐受电压 U_{rw} 值

要求耐受电压是将配合耐受电压乘以安全因数 K_s 来求取。 K_s 值如下:

——内绝缘: $K_s=1.15$ (一般运行方式)和1.1(特殊运行方式);

——外绝缘: $K_s=1.05$ 。

对外绝缘,还应考虑大气修正因数(包括海拔) K_a 。

计算结果见表G.7。

G.4.3.1 内绝缘的 U_{rw}

——暂时过电压

1) 线路侧: $U_{rw}=889 \times 1.15=1\ 022$ kV(r. m. s);

2) 变电站母线设备: $U_{rw}=826 \times 1.15=950$ kV(r. m. s)。

——缓波前过电压

$U_{rw}=1\ 504 \times 1.15=1\ 730$ kV/($1\ 460 \times 1.15=1\ 679$ kV)。

——快波前过电压

- 1) $U_{rw} = 1\,984 \times 1.15 = 2\,282$ kV。
- 2) 变压器: $U_{rw} = 1\,714 \times 1.15 = 1\,971$ kV;
 断路器: $U_{rw} = 1\,832 \times 1.15 = 2\,107$ kV;
 电抗器: $U_{rw} = 1\,986 \times 1.1 = 2\,185$ kV。

G.4.3.2 外绝缘的 U_{rw}

——暂时过电压

因考虑污秽绝缘子的短时工频试验的大气修正因数,参见 GB 311.1—2012 附录 B, $q=0.5$, 考虑海拔 $H=1\,000$ m 时,可求得 $K_a=1.063$ 。于是:

- 线路侧: $U_{rw} = 889 \times 1.05 \times 1.063 = 992$ kV(r. m. s)
- 变电站母线设备: $U_{rw} = 826 \times 1.05 \times 1.063 = 922$ kV(r. m. s)。

——缓波前过电压

缓波前过电压的大气修正因数,主要是考虑海拔,对 1 000 m 相对地绝缘,可由 GB 311.1—2012 附录 B 查得指数 q 。 $U_{cw} = 1\,548$ kV,查得 $q=0.51, K_a=1.064$ 。于是: $U_{rw} = 1\,548 \times 1.05 \times 1.064 = 1\,730$ kV。

纵绝缘的缓波前过电压, $K_a=1.089$ 。于是: $U_{rw} = 1\,548 \times 1.05 \times 1.089 = 1\,770$ kV。

——快波前过电压, $q=1, K_a=1.131$, 于是:

- 1) $U_{rw} = 1\,984 \times 1.05 \times 1.131 = 2\,356$ kV;
- 2) 变压器: $U_{rw} = 1\,714 \times 1.05 \times 1.131 = 2\,035$ kV;
 断路器: $U_{rw} = 1\,832 \times 1.05 \times 1.131 = 2\,176$ kV;
 电抗器: $U_{rw} = 1\,986 \times 1.05 \times 1.131 = 2\,358$ kV。

表 G.7 $U_m = 1\,100$ kV 设备要求耐受电压的计算结果表

U_{rw} 值		外绝缘	内绝缘
短时工频:kV(有效值)		U_{rw}	U_{rw}
操作或雷电:kV(峰值)			
短时工频	相对地	992/922	1 022/950
操作冲击	相对地	1 730/1 770(纵绝缘)	1 730(/1 679)
雷电冲击 ^a	相对地	2 356	2 282
雷电冲击 ^b	变压器	2 035	1 971
	断路器	2 176	2 107
	电抗器	2 358	2 185
^a 按照 E.4 方法计算得到的结果; ^b 按照 E.6 方法计算得到的结果。			

G.4.4 第四步:短时工频耐受电压换算至操作冲击耐受电压

应将要求短时工频耐受电压换算到等效的操作冲击耐受电压(SIW),参见表 2。

——内绝缘

- 线路侧: $SIW = 1\,022$ kV $\times 2.0 = 2\,044$ kV;
- 变电站母线设备: $SIW = 950$ kV $\times 2.3 = 2\,185$ kV。

——外绝缘

- 线路侧: $SIW = 992 \times 1.7 = 1\,686$ kV;

- 变电站母线设备: $SIW=922 \times 1.7=1\ 567\ \text{kV}$ 。

G.4.5 第五步:标准绝缘水平 U_w 的确定

设备相对地绝缘的标准耐受电压根据要求耐受电压数值在 GB 311.1—2012 给出的标准化电压系列数中选取,选取的原则是最接近但大于要求耐受电压数值的标准电压值。

G.4.5.1 内绝缘的 U_w

——对暂时过电压:取 $1\ 100\ \text{kV(r. m. s)}$ 可满足要求。

——对缓波前过电压:

按照第四步要求 $2\ 185\ \text{kV}$ 的操作冲击电压,考虑到这一要求,由于该值在 GB 311.1—2012 中不是绝缘水平的标准系列值,可用工频电压进行试验,取 $1\ 100\ \text{kV(r. m. s)}$ 。

鉴于以上情况,因此内绝缘的操作冲击标准绝缘水平取 $1\ 800\ \text{kV}$ 。

——对快波前过电压(相对地):

- 1) 取 $2\ 400\ \text{kV}$ 可满足所有内绝缘的要求;
- 2) 变压器、电抗器取 $2\ 250\ \text{kV}$;断路器取 $2\ 400\ \text{kV}$ 。

G.4.5.2 外绝缘的 U_w

——对暂时过电压:取 $1\ 100\ \text{kV(r. m. s)}$ 可满足要求。

——对缓波前过电压:取 $1\ 800\ \text{kV}$ 可满足要求。

——对快波前过电压:

- 1) 取 $2\ 400\ \text{kV}$ 可满足要求;
- 2) 变压器(套管)、电抗器和断路器取 $2\ 400\ \text{kV}$ 。

对开关设备的纵绝缘,缓波前过电压为:一端施加 $1\ 675\ \text{kV}$ 操作冲击电压,另一端施加 $900\ \text{kV}$ (峰值)的工频电压可满足要求;快波前过电压为:一端施加 $2\ 400\ \text{kV}$ 雷电冲击电压,另一端施加 $900\ \text{kV}$ (峰值)的工频电压可满足要求。

G.5 范围 I 内 $U_m=12\ \text{kV}$ 配电系统中变电站设备的数值计算

对 $U_m=12\ \text{kV}$ 的设备,GB 311.1—2012 中规定了标准雷电冲击耐受电压和短时工频耐受电压。

基本数据:

系统标称电压: $U_n=10\ \text{kV}$;

设备最高电压: $U_m=12\ \text{kV}(=U_s)$;

海拔: $H=1\ 000\ \text{m}$;

污秽等级:轻。

G.5.1 第一步:代确定表性过电压 U_{op} 值

G.5.1.1 暂时过电压

考虑为中性点绝缘系统,接地故障会使相对地暂时过电压达到 U_m 即 $12\ \text{kV}$ 。

相间过电压来自甩负荷。配电系统甩负荷时本身不会产生很高的过电压,但是,应当考虑与配电系统相连的输电系统甩负荷时,则可能引起暂时过电压达到 $1.15 U_s$,即由代表性的过电压为:

$$U_{op}=1.15 U_s=12 \times 1.15=13.8\ \text{kV}, \text{取 } 14\ \text{kV}.$$

G.5.1.2 缓波前过电压

在 $10\ \text{kV}$ 系统中,过电压可能是由于接地故障或线路合闸或重合闸产生。因为配电变压器通常在

线路重合闸时仍与系统连接,而且重合闸不够快速,不可能出现残余电荷,所以合闸过电压和重合闸过电压具有相同的概率分布。过电压 2% 值可按附录 C 在考虑正常运行条件、无合闸电阻、复杂的馈电网以及并联补偿等条件下用相峰值法选取。

$$U_{e2} = 3.4 \text{ p. u.} = 33 \text{ kV(peak)};$$

$$U_{p2} = 5.1 \text{ p. u.} = 50 \text{ kV(peak)}。$$

由于确定性绝缘配合程序对配电系统已足够,且避雷器通常不限制缓波前过电压,可认为代表性缓波前过电压 U_{rp} 是相应过电压分布的截断值 U_{et} 和 U_{pt} ,依据附录 C 公式,可以得出:

$$U_{et} = 4.0 \text{ p. u.} = 39 \text{ kV(相对地)}; U_{pt} = 5.95 \text{ p. u.} = 58 \text{ kV(相间)}。$$

G.5.1.3 快波前过电压

除某些类型的断路器开合电动机外,由开合操作产生的快波前过电压可忽略。

快波前雷电过电压沿线路上传输到所连的变电站,可用 E.4 中所述的简化法来估算代表性雷电过电压幅值。对于避雷器保护的输配电系统代表性快波前过电压等于避雷器的雷电冲击保护水平 U_{pl} 。在 10 kV 配电系统中用的避雷器的种类较多,性能各异,但若取其标称电流为 5 kA 的雷电冲击保护水平 $U_{pl} = 50 \text{ kV}$,即可涵概所有情况,故 $U_{rp} = 50 \text{ kV}$ 。

G.5.2 第二步:配合耐受电压 U_{cw} 的确定

G.5.2.1 暂时过电压

如前面定义的代表性暂时过电压相当于假定最大作用电压,采用确定性绝缘配合程序(见第 5 章)。确定性配合因数 $K_c = 1$ 。则工频配合耐受电压 U_{cw} 与代表性过电压 U_{rp} 一致:

$$U_{cw} = U_{rp} = 14 \text{ kV}。$$

G.5.2.2 缓波前过电压

配合耐受电压 U_{cw} 可由 $U_{cw} = K_{cd} \times U_{rp}$ 求得。确定性配合因数 $K_{cd} = 1$,因为绝缘配合程序所采用的是过电压分布截断值(如 5.3.2.1 讨论的无偏差影响)。所以在本例中配合耐受电压值与代表性过电压一致:

$$U_{cw} = U_{rp} = 39 \text{ kV(相对地)}, \text{和 } U_{cw} = U_{rp} = 58 \text{ kV(相间)}。$$

G.5.2.3 快波前过电压

为了确定配合雷电冲击耐受电压,假定了下列数值:

考虑到避雷器和被保护设备之间的距离 L ,应按公式(E.19)计算求取该距离影响产生的附加电压。相关参数分别为:

A ——由表 E.2 选取,木质杆塔线路 $A = 2700$;

n ——与变电站相连的最少架空线路,本例中取 $n = 4$;

L_{sp} ——线路档距,本例中取 $L_{sp} = 200 \text{ m}$;

R_a ——可接受故障率,1/400 年;

R_{km} ——6/(100 km·年)。

正如常见的实际做法,将避雷器安装在靠近电力变压器处,对内绝缘(3 m)和外绝缘(4 m)的 L 距离可能不同,因此,其配合耐受电压 U_{cw} 也可能不同。

利用以上取值, L_a :雷电闪络率等于可接受故障率时的架空线长度[满足公式(E.18)],计算得 $L_a = 42 \text{ m}$ 。这意味着,要求对架空线的第一个档距内的雷击采取保护。

配合雷电冲击耐受电压可按公式(E.19)求得: $U_{cw} = 50 + 8 = 58 \text{ kV(内绝缘)}; U_{cw} = 50 + 11 =$

61 kV(外绝缘)。

G.5.3 第三步:确定要求耐受电压 U_{rw} 值

利用推荐的安全因数(见 6.3.5)及海拔修正(见 6.2.2)可求得要求的耐受电压。对本例,假定相同设计的变电站将用于海拔为 1 000 m 的地区。

计算结果见表 G.8。

G.5.3.1 安全因数

- 内绝缘: $K_s=1.15$;
- 外绝缘: $K_s=1.05$ 。

G.5.3.2 海拔修正因数

海拔修正因数见 GB 311.1—2012 附录 B。它仅适用于外绝缘,其值取决于过电压波形(指数 q)。

- 工频(清洁绝缘子): $q=1.0$;
- 缓波前过电压: q 取决于 U_{cw} 值,对 $U_{cw}<300$ kV(相对地)或 $U_{cw}<1\ 200$ kV(相间) $q=1.0$;
- 雷电冲击耐受: $q=1.0$; $K_a=1.13$ 。

G.5.3.3 暂时过电压

- 相对地
 - 内绝缘: $U_{rw}=12\times 1.15=13.8$ kV
 - 外绝缘: $U_{rw}=12\times 1.05\times 1.13=14.3$ kV
- 相间
 - 内绝缘: $U_{rw}=14\times 1.15=14$ kV
 - 外绝缘: $U_{rw}=14\times 1.05\times 1.13=17$ kV

G.5.3.4 缓波前过电压

- 相对地
 - 内绝缘: $U_{rw}=39\times 1.15=45$ kV
 - 外绝缘: $U_{rw}=39\times 1.05\times 1.13=46$ kV
- 相间
 - 内绝缘: $U_{rw}=58\times 1.15=67$ kV
 - 外绝缘: $U_{rw}=58\times 1.05\times 1.13=69$ kV

G.5.3.5 快波前过电压

- 内绝缘: $U_{rw}=58\times 1.15=67$ kV
- 外绝缘: $U_{rw}=61\times 1.05\times 1.13=72$ kV

G.5.4 第四步:短时工频耐受电压和雷电冲击耐受电压的换算

对 GB 311.1—2012 表 2 中标准耐受电压的选取,利用表 1 的试验换算因数将要求的操作冲击耐受电压换算到短时工频耐受电压和雷电冲击耐受电压(对内绝缘,选取与油浸绝缘换算一致的因数)。

G.5.4.1 换算到短时工频耐受电压(SDW)

- 相对地

- 内绝缘: $SDW=45 \times 0.5=22.5 \text{ kV}$;
- 外绝缘: $SDW=46 \times 0.6=28 \text{ kV}$ 。

——相间

- 内绝缘: $SDW=67 \times 0.5=34 \text{ kV}$;
- 外绝缘: $SDW=69 \times 0.6=41 \text{ kV}$ 。

G.5.4.2 换算到雷电冲击耐受电压(LIW)

——相对地

- 内绝缘: $LIW=45 \times 1.10=49.5 \text{ kV}$;
- 外绝缘: $LIW=46 \times 1.06=49 \text{ kV}$ 。

——相间

- 内绝缘: $LIW=67 \times 1.10=74 \text{ kV}$;
- 外绝缘: $LIW=69 \times 0.6=73 \text{ kV}$ 。

表 G.8 $U_m=12 \text{ kV}$ 设备耐受电压的计算结果

U_{rw} 值 短时工频: kV(有效值) 操作或雷电: kV(峰值)		外绝缘		内绝缘	
		$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$	$U_{rw(s)}$	$U_{rw(c)}$
短时工频	相对地	14.3	28	13.8	22.5
	相间	17	41	14	34
操作冲击	相对地	46	—	45	—
	相间	69	—	67	—
雷电冲击	相对地	72	49	67	49.5
	相间	—	73	—	74

G.5.5 第五步: 标准绝缘水平 U_w 的确定

对 $U_m=12 \text{ kV}$, 据计算结果, 若兼顾设备的内、外绝缘和相对地、相间绝缘, 短时工频耐受电压需在 22.5 kV 至 41 kV 之间选取。若取标准值, 则可为 28 kV, 38 kV, 42 kV。GB 311.1—2012 根据我国惯用值, 分别取为: 湿耐压: 30 kV; 液体浸渍内绝缘: 35 kV; 外绝缘干耐压(干净、干燥状态): 42 kV。

GB 311.1—2012 表 2 给出的标准雷电冲击耐受电压三个可能值。相对地和相间以及内、外绝缘的干、湿状态耐受电压均可为 75 kV 既满足了雷电冲击的要求又满足了外部相间绝缘的操作冲击耐受电压。同时, 考虑到在配电系统中设备上的雷电过电压水平可能有相当大的差异, 如设备装置的系统结构和地点不同、过电压保护措施不同、系统的接地方式不同(中性点绝缘或经低值电阻接地等, 因而在 GB 311.1—2012 中给出另外两个标准的耐受电压: 60 kV(系列 I) 和 90 kV。

参 考 文 献

- [1] CIGRE WG 33.02. Phase-to-phase Insulation Co-ordination: Part 1: Switching overvoltages in three-phase systems, ELECTRA 64 (1979) pp. 138-158.
- [2] CIGRE WG 13-02. Switching overvoltages in EHV and UHV systems with special reference to closing and reclosing transmission lines. ELECTRA 30 (1973) pp. 70-122.
- [3] A. R. Hileman, J. Roguin, K. H. Weck. Metaloxide surge arresters in AC systems—Part V: Protection performance of metal oxide surge arresters, ELECTRA 133 1990, pp. 132-144.
- [4] CIGRE WG 33-07. Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation, CIGRE technical brochure No. 72.
- [5] CIGRE WG 33.03. Phase-to-phase Insulation Co-ordination: Part 2: Switching impulse strength of phase-to-phase external insulation, ELECTRA 64 1979, pp. 158-181.
- [6] CIGRE WG 33.06. Phase-to-phase Insulation Co-ordination: Part 3: Design and testing of phase-to-phase insulation, ELECTRA 64 1979, pp. 182-210.
- [7] CIGRE TE 33-03.03. Phase-to-phase Insulation Co-ordination: Part 4: The influence of non-standard conditions on the switching impulse strength of phase-to-phase insulation, ELECTRA 64 1979, pp. 211-230.
- [8] CIGRE WG 33.01. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRE technical brochure No. 63, 1991.
- [9] A. J. Driksson, K. -H. Weck. Simplified procedures for determining representative substation impinging lightning overvoltages, CIGRE report 33-16, 1998
- [10] I. Kishizima, K. Matsumoto, Y. Watanabe. New facilities for phase switching impulse tests and some test results, IEEE PAS TO3 No. 6, June 1984, pp1211-1216.
- [11] L. Paris, R. Cortina. Switching and lightning impulse discharge characteristics of large air gaps and long insulation strings, IEEE Trans on PAS, vol87, No. 4, April 1968, pp. 947-9.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
绝 缘 配 合 第 2 部 分 : 使 用 导 则
GB/T 311.2—2013

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100013)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

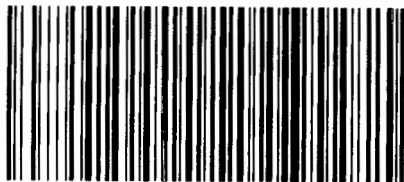
*

开本 880×1230 1/16 印张 5.75 字数 170 千字
2013年7月第一版 2013年7月第一次印刷

*

书号: 155066·1-47294 定价 75.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 311.2-2013