电容器组对地绝缘子 50%闪络试验问题研究

赵彦军，华雪梅，贾伟英，宋萍萍

（无锡赛晶电力电容器有限公司，江苏无锡 214100）

摘要：为提高特高压直流输电工程电容器组的运行可靠性，需对电容器组对地绝缘子进行 50%闪络试验。本文对绝缘子雷电、操作 50%闪络放电电压值和干弧距离的计算方法进行探讨，提出绝缘子喷涂 RTV、用复合支柱绝缘子、优化伞形结构等措施可提高湿闪络电压值，设计四个试品进行对地 50%湿闪络试验，对试验数据进行分析，总结初步结论以指导工程实践。

关键词：特高压直流输电工程；电容器组；干弧距离；50%闪络放电；湿试验

0 引言

为落实国家的绿色发展理念，满足西部和北部能源基地清洁能源外送，华中和华东等对超特高压直流输电工程的可靠性要求越来越高[1]，交流滤波器作为换流站的重要设备之一，其运行状态直接影响到直流系统的安全运行[2]。

2017 年 5 月 27 日 11 时 13 分，国网某特高压直流输电工程送端换流站无功控制自动切除 BP11\BP13 交流滤波器时，断路器 C 相断口间发生间歇性重燃放电并在 300 ms 后发展成为永久性接地故障，引起交流滤波器保护先后动作，跳开断路器，导致该站绝对最小滤波器条件不满足，直流功率由 4035MW 回降至 1700MW，安控系统切除两台机组。事后对交流滤波器电容器塔绝缘子进行检查，发现电容器塔底部支柱绝缘子均存在闪络放电痕迹[3]。文献[3]分析电容器塔底部支柱绝缘子偏小是事故扩大的原因。

2018 年国网某特高压直流输电工程交流滤波电容器技术规范要求电容器塔底部支架（带下部支撑绝缘子）整体做 U50%放电试验（雷电及操作，湿试），而国内以往未开展过电容器塔的该项试验，因此，开展电容器组对地绝缘子进行 U50%闪络放电试验问题研究具有工程实际意义。

1 雷电、操作 50%闪络放电电压值计算

连通绝缘子两电极、沿绝缘体外部空气的放电称为闪络放电。表面洁净的绝缘子在淋雨时的闪络电压是户外绝缘子的主要性能。由于作用电压持续时间不同，雷电冲击电压下绝缘子的干、湿闪络电压基本相同，工频电压下两者相差较多，而操作冲击电压下两者有明显差别。

参考标准[4-5]可知的$U_{50\,雷电}$和$U_{50\,操作}$的计算公式如下：

$$U_{50\,雷电} = 1/\left(1 - k\sigma_{雷电}\right)U_{雷电} \text{——（1）}$$

$$U_{50\,操作} = 1/\left(1 - k\sigma_{操作}\right)U_{操作} \text{——（2）}$$

式中：

$U_{50\,雷电}$——50%雷电冲击闪络放电电压 kV；

$U_{雷电}$——雷电冲击耐受电压 kV；

$U_{50\,操作}$——50%操作冲击闪络放电电压 kV；

$U_{操作}$——操作冲击耐受电压 kV；

$\sigma_{雷电}$——雷电标准偏差假定值，$\sigma_{雷电} = 3\%$；

$\sigma_{操作}$——操作标准偏差假定值，$\sigma_{操作} = 6\%$；

标准[4-5]规定系数k=1.3；项目要求高压塔对地绝缘子k=2，低压塔对地绝缘子k=3。

以国网特高压直流输电工程某换流站交流场 HP3 滤波支路为例，对交流滤波电容器组的高压塔和低压塔对地绝缘子的雷电和操作进行计算，$U_{雷电}$和$U_{操作}$根据项目要求和电容器组的串并数计算得出，$U_{50\,雷电}$和$U_{50\,操作}$根据公式（1）和公式（2）计算得出，具体结果详见表 1。

表 1　国网某换流站 HP3-C1 交流滤波电容器组的雷电和操作

位置	$U_{雷电}$	按标准计算的$U_{50\ 雷电}$	按项目计算的$U_{50\ 雷电}$	按项目计算-按标准计算	$U_{操作}$	按标准计算的$U_{50\ 操作}$	按项目计算的$U_{50\ 操作}$	按项目计算-按标准计算
高压塔对地，kV	1441	1499	1533	33 增加 2.2%	1076	1167	1223	56 增加 4.8%
低压塔对地，kV	677	704	744	39 增加 5.6%	525	569	640	71 增加 12.4%

从表 1 可看出，高压塔对地$U_{50\ 雷电}$按项目要求计算的值比按标准[4-5]计算的值高 33kV（增加 2.2%）、低压塔对地高 39kV（增加 5.6%），高压塔对地$U_{50\ 操作}$按项目要求计算的值比按标准[4-5]计算的值高 56kV（增加 4.8%）、低压塔对地高 71kV（增加 12.4%），这是因为项目要求k值比标准取值大造成，从而电容器组的对地绝缘子变成非标准系列的绝缘子，非标准绝缘子的电气参数设计变成难题。

2 试品电气参数设计

因项目要求“电容器塔底部支架（带下部支撑绝缘子）整体做 U50%闪络放电试验，且操作和雷电均要求湿试”，绝缘子厂家以往只针对单个绝缘子做过雷电和操作干耐受试验。相比干耐受试验，这次的试验有以下特殊要求：a）要求 50%闪络试验，绝缘子厂家只有耐受试验报告，没有闪络报告；b）以往是单只绝缘子安装在高出地面至少 2.5m 的金属试验台上进行试验，而这次是支架带下部支撑绝缘子整体落地进行试验；c)已有的耐受试验报告都是干试，而这次的操作和雷电均是要求湿试；d）已有的耐受试验报告都是单只绝缘子，而这次是 4 只或 8 只绝缘子并列进行试验。所以以往可供参考的资料很少。

电容器高压塔高度已有约 15m，所以绝缘子高度不能太高，否则会大幅增加抗震难度。绝缘子厂家缺少经验，项目要求时间较短，绝缘子还不能太高，所以电容器厂家非常有必要和绝缘子厂家合作一起对绝缘子的电气参数进行试验验证。

2.1 绝缘子干弧距离设计

干弧距离是绝缘子最重要的参数之一，决定了绝缘子的干闪络电压，而伞的形状和布置则决定了湿闪络电压。干弧距离的要求初步决定绝缘子的高度。

查阅文献[6]得到如下干闪络经验估算公式：

$U_{50\ 雷电} = 7.8 l_d^{0.92}$，$20\text{cm} \le l_d \le 250\text{cm}$——（3）

$U_{50\ 操作} = 31.5 l_d^{0.92}$，$200\text{cm} \le l_d \le 700\text{cm}$——（4）

公式（3）和公式（4）可转换为公式（5）和公式（6）。

$l_d = \sqrt[0.92]{\frac{U_{50\ 雷电}}{7.8}}$，$20\text{cm} \le l_d \le 250\text{cm}$——（5）

$l_d = \sqrt[0.6]{\frac{U_{50\ 操作}}{31.5}}$，$200\text{cm} \le l_d \le 700\text{cm}$——（6）

式中：

l_d——绝缘子的干弧距离 cm；

表 2 国网某换流站 HP3-C1 电容器组对地绝缘子的干弧距离

HP3-C1 电容器组	按标准雷电计算/cm	按项目雷电计算/cm	按项目计算-按标准计算/cm		按标准操作计算/cm	按项目操作计算/cm	按项目计算-按标准计算/cm
高压塔对地l_d	304	311	7 增加 2.3%		412	445	33 增加 8%
低压塔对地l_d	134	142	8 增加 6%		125	151	27 增加 2.2%

从表 2 可看出，按$U_{50\ 操作}$计算的干弧距离比按$U_{50\ 雷电}$计算的大，所以在绝缘子设计时需要主要考虑的操作冲击要求，高压塔对地绝缘子的干弧距离$l_{d\ 高压} \geq 445cm$，低压塔对地绝缘子的干弧距离$l_{d\ 低压} \geq 151cm$。

公式（5）和公式（6）有一定局限性，而按国家标准系列设计绝缘子各厂家已有丰富经验，可考虑用差值法设计项目所需的非标准系列绝缘子。从表 2 可计算出增加的差值，按项目要求计算的干弧距离值比按标准[4-5]计算的值高压塔对地大 27cm（增大 2.2%）、低压塔对地大 33cm（增大 8%），从而可考虑在国家标准绝缘子的基础上增高 27cm 和 33cm，以满足项目的要求，从而把抽象电气参数的改变，转化为具体物理参数的改变，这点比较有工程实用意义。

2.2 提高湿闪络电压值的方法

因项目要求雷电和操作均是湿试，公式（3）和公式（4）计算的是干闪络电压，所以还需考虑湿试的影响。湿试对雷电冲击闪络值的影响很小，对操作冲击闪络值的影响较明显。沿潮湿绝缘子表面的闪络放电比纯空气的击穿电压低得多，所以我们首先来重点看看沿绝缘子表面发生闪络放电的路径，然后再针对性采取措施减少湿试对闪络电压的影响。

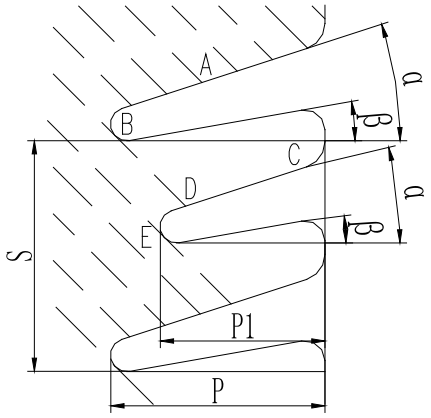

图 1 绝缘子的伞形

交流滤波电容器组用的瓷绝缘子伞形如图 1 所示。标准[5]规定湿试喷射角度使水滴在试品垂直和水平分量大致相等，这样在绝缘子伞的上表面 A-B 和 D-E 区域有水膜，阻抗较小，伞的下部 B-C-D 区域没有直接被喷水，湿润程度小，表面的阻抗较大，试验时，绝大部分施压由 B-C-D 承受，当电压升高到一定值时，空气间隙 B-D 击穿或沿瓷表面 B-C-D 闪络，全部施压由 A-B 和 D-E 承受，由于湿表面闪络电压低，若电源容量足够大，放电通道沿 A-B-D 绝缘子水膜面和空气发展成电弧放电，形成完全闪络。

从上述闪络放电路径分析，可以考虑通过以下措施提高绝缘子湿闪络电压值：

a) 提高伞裙表面的憎水性，增大淋雨表面的阻抗。瓷绝缘子的釉面是亲水性表面，吸附水分能力较大，喷水时将完全润湿而形成电解液膜覆盖在绝缘子伞，会明显降低湿闪络值。可以对绝缘子表面喷涂 RTV 或用复合支柱绝缘子，这样伞裙表面憎水性能不低于标准[7]中 HC2 级的要求，使得水珠以分离的形式凝结在绝缘子表面[8]。文献[9]通过试验和仿真验证得出破坏伞裙表面的憎水性

会大幅降低闪络值的结论。

b) 高度确定的前提下，除表面喷涂 RTV 或做成复合伞裙外，还可通过绝缘子伞形结构优化提高闪络电压值。文献[10]通过试验分析得出大小交替伞形，大伞对小伞起保护作用，伞间气隙距较大，有较好的淋雨状态下的电气性能。文献[11]通过试验分析得出大小伞形δ_{CF}系数为 3.55 的复合绝缘子在海拔不超过 2500m 时爬电距离利用率较高，当海拔升高到 4000m 时δ_{CF}系数为 3.27，爬距利用率较高，$\delta_{CF}=\frac{爬距}{干弧距离}$。在伞形结构设计中，重点考虑伞伸出系数 S/P、大小伞伸出差$P-P_1$等参数，最佳的参数配合可使伞间电弧桥接的概率降到最低，保护爬电距离越大，抑制电弧发展的能力越强，建议$\frac{S}{P}\geq 0.9$，$S\geq 65mm$，$P-P_1\geq 20mm$，α>10°，β>3°[10-15]。

c) 改善绝缘子法兰处的电场畸变。法兰边缘的电场极强，放电首先都是在这里开始，法兰边沿露砂处的水珠会加剧电场的畸变[16]。可在喷涂 RTV 时覆盖脖子处的露砂，330kV 及以上的绝缘子进一步可在法兰处安装防电晕环。另外需对电容器框架锋角等进行倒圆角处理；

d) 对框架的尖角、缝边等倒圆角，并对框架进行热浸镀锌或喷涂防腐漆，这样可去除框架表面的毛刺等，可改善框架表面的电场畸变。

3 雷电及操作 U50%放电试验（湿试）

3.1 试品及试验方法

本次试验共有 4 个试品：a）试品Ⅰ对地安装 8 只 ZSW-180/20-4 绝缘子；b）试品Ⅱ对地安装 4 只 ZSW-180/30-4 绝缘子；c）试品Ⅲ对地安装 4 只 ZSW-330/30-4 绝缘子；d）试品Ⅳ对地安装 8 只 ZSW-550/20-4 绝缘子，并安装防晕环。4 个试品采用瓷绝缘子表面喷涂 RTV。试品Ⅳ安装如图 2 所示，试品结构与换流站现场的产品一致，试品模拟在换流站现场的实际情况安装。

图 2 试品Ⅳ的安装图

试验在国家电器产品质量监督检验中心进行，试验方法采用标准[5]的升降法得到 50%闪络电压$U_{50\ 雷电}$和$U_{50\ 操作}$试验值，湿试验按标准[5]的要求进行。

3.2 试验结果及分析

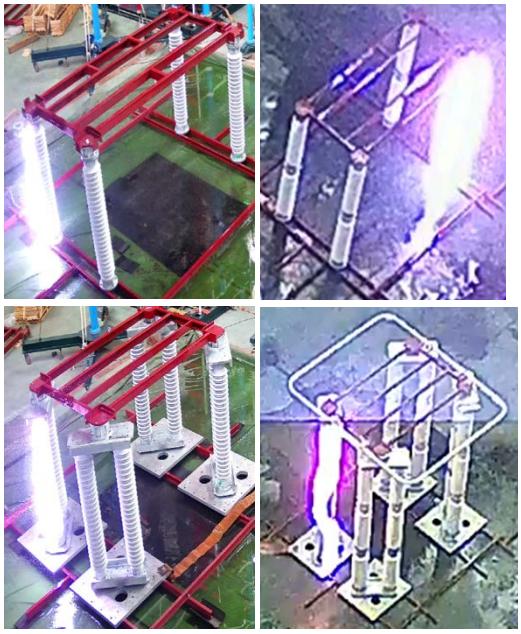

图 3 试品闪络放电图

试验过程中，透过观察窗观察四个试品的闪络过程。通过实际观察，闪络过程的电弧都是沿绝缘子表面发展，电弧基本没有飘离绝缘子表面，也只有偶尔一两次发生空气击穿，说明试品的整体设计和绝缘子的伞形设计还是比较成功，绝缘子爬电距离基本得到有效利用。试验后绝缘子均没有损坏，RTV 表面没有损伤痕迹、水泥等胶合材料无

破损。

3.2 试验结果及分析

采用标准[5]的数据处理方式得到$U_{50\ 雷电}$和$U_{50\ 操作}$及标准偏差 S。

$$U_{50} = \sum_{i=1}^{n} U_i / n \text{——（5）}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(U_i - U_{50})^2} \text{——（6）}$$

式中：

U_i——第 i 次试验电压 kV；

试品Ⅰ~试品Ⅳ的试验结果详见表 3，通过表 3 数据分析可得表 4、表 5、图 4 和图 5。

表 3 四个试品的U_{50}闪络放电电压值

编号	雷电正极性/kV	雷电负极性/kV	操作正极性/kV	操作负极性/kV
试品Ⅰ	980	1178	804	998
试品Ⅱ	963	1184	763	779
试品Ⅲ	1797	2006	1114	1232
试品Ⅳ	2494	2686	1330	1742

表 4 四个试品的U_{50}闪络放电平均击穿场强值

编号	雷电正极性 kV/mm	雷电负极性 kV/mm	操作正极性 kV/mm	操作负极性 kV/mm
试品Ⅰ	0.583	0.701	0.479	0.594
试品Ⅱ	0.570	0.701	0.451	0.461
试品Ⅲ	0.615	0.687	0.382	0.422
试品Ⅳ	0.644	0.694	0.344	0.450

表 5 操作/雷电的系数

编号	操作/雷电正极性	操作/雷电负极性
试品Ⅰ	0.82	0.847
试品Ⅱ	0.792	0.658
试品Ⅲ	0.62	0.614
试品Ⅳ	0.533	0.649

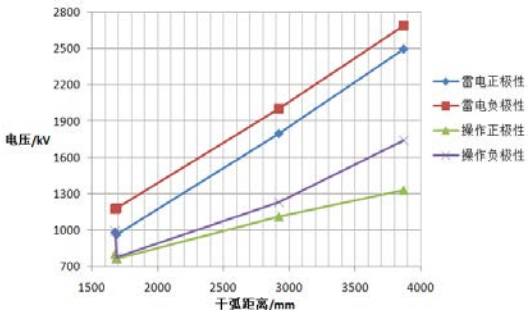

图 4 干弧距离与U_{50}闪络放电电压值

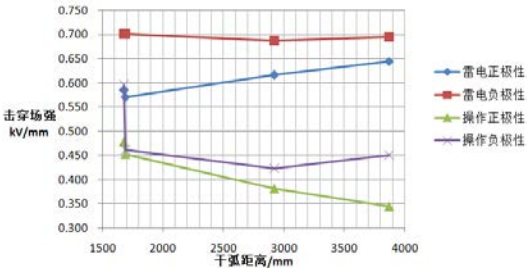

图 5 干弧距离与U_{50}平均击穿场强值的曲线

从表 3、表 4、表 5 及图 4、图 5 来看：

a) 四个试品雷电和操作正极性试验值均小于对应的负极性试验值；

b) 操作正极性最难达到要求，试品Ⅳ的操作正极性只有雷电正极性的约 53%，这个比值远小于标准[17]中相近电压等级绝缘水平的比值，且随着电压等级升高，这个比值有降低的趋势，330kV 及以上的绝缘子设计时需重点关注$U_{50\ 操作}$正极性要求值；

c) 相同电压等级的绝缘子，并列 8 柱和 4 柱的试验结果相近，并列 8 柱击穿电压和场强稍大于 4 柱，这点可能是跟并列 8 柱绝缘子上下法兰有调整板有关，电弧都是从法兰

处开始，调整板改善了法兰处的电场畸变；

d) 操作正极性随着干弧距离增加，平均击穿场强明显减小。操作负极性随着干弧距离增加，平均击穿场强也趋于变小；

e) 雷电击穿场强随干弧距离增加变化的规律不明显；

4 电容器组框架带绝缘子试验与单支绝缘子试验结果的对比

电容器组框架带绝缘子试验结果是否会比单支绝缘子的试验结果下降，这点也非常重要，没有相同单支绝缘子的试验数据，所以找相同绝缘子厂家相近规格的绝缘子进行近似分析。因绝缘子只是相近规格、单支绝缘子非直接落地放置、试验单位不同，以下分析仅做参考。

根据绝缘子生产厂家提供的雷电及操作 U50%放电试验报告，计算得到相近规格单支绝缘子的U_{50}闪络放电平均击穿场强值详见表 6，$U_{50\ 操作}$正极性平均击穿场强值对比详见图 6。

表 6 相近规格单个绝缘子的U_{50}闪络放电平均击穿场强值

编号	雷电正极性 kV/mm	雷电负极性 kV/mm	操作正极性 kV/mm	操作负极性 kV/mm
167kV/30	0.647	0.683	0.495	0.642
252kV/20	0.653	0.735	0.508	0.599
550kV/20	0.667	0.708	0.411	0.452

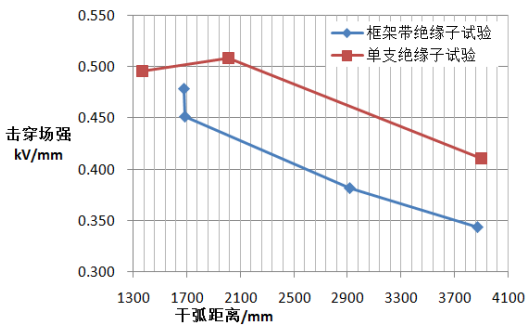

图 6 $U_{50\ 操作}$正极性平均击穿场强值对比

从表 6 及图 6 来看：

a) $U_{50\ 操作}$正极性平均击穿场强随干弧距离增加，击穿场强下降的幅度大约一致；

b) 相近规格的绝缘子框架带绝缘子试验的平均击穿场强约比单支绝缘子试验下降约 20%。

5 结束语

1) 按国网某换流站规范的方法计算$U_{50\ 雷电}$值比按标准计算的值大约 2.2%~5.6%，$U_{50\ 操作}$值比按标准计算的值大约 4.8%~12.4%，从而需要设计非标准系列的绝缘子；

2) 可用经验公式计算出该项目电容器组对地绝缘子高压塔对地大 27cm（大 2.2%）、低压塔对地大 33cm（大 8%），从而用差值法在国家标准绝缘子的基础上增高 27cm 和 33cm，以满足项目的要求；

3) 对绝缘子表面喷涂 RTV 或用复合支柱绝缘子、优化绝缘子伞形结构、改善绝缘子法兰处的电场畸变等措施可提高绝缘子湿闪络电压值；

4) 对试品雷电及操作 U50%放电试验结果进行分析发现绝缘子操作正极性最难满足，试品Ⅳ的操作正极性只有雷电正极性的约 53%，这个比值远小于国家标准中相近电压等级绝缘水平的比值，330kV 及以上的绝缘子设计时需重点关注U_{50}操作正极性要求值；

5) 相近规格的绝缘子框架带绝缘子试验的平均击穿场强值约比单支绝缘子试验下降约 20%。

参考文献：

[1] 关于加快推进一批输变电重点工程规划建设工作的通知[S].

[2] 周登洪. 直流输电用并联及交流滤波电容器装置综合述[J].电力电容器，2006，27（1）：5-10.

ZHOU Denghong.Research of shuntcapactiors and AC filter capacitorsfor HVDC transmission

systems[J].Power Capacitor，2006，27（1）：5-10.

[3] 史磊，蒋超伟，等. 灵州换流站交流滤波器跳闸导致直流功率回降原因分析[J].电力电容器与无功补偿，2019，40（3）：34-39.

SHI Lei，JIANG Chaowei，et al.Cause Analysis of DC Power Drop Caused by Tripping of AC Filter at Lingzhou Convertor Station[J].Power Capacitor& Reactive Power Compensation，2019，40（3）：34-39.

[4] GB/T 8287.1-2008 标称电压高于 1000V 系统用户内和户外支柱绝缘子第 1 部分：瓷或玻璃绝缘子的试验[S].

GB/T 8287.1-2008Indoor and outdoor post insulators for systems with nominal voltage greater than 1000 V - Part 1: Test on insulators of ceramic material or glass[S].

[5] GB/T 16927.1-2011 高电压试验技术第 1 部分：一般定义及试验要求[S].

GB/T 16927.1-2011High-voltage test techniques—Part 1:General definitions and test requirements[S].

[6] 严璋，朱德恒.高电压绝缘技术[M].北京：中国电力出版社,2002.

[7] DL/T 376-2010 复合绝缘子用硅橡胶绝缘材料通用技术条件[S].

DL/T 376-2010 General technical requirements of silicone rubber insulation materials for composite insulators[S].

[8] 隆晨海，雾霾中绝缘子积污特性及其交流放电特性研究[D].重庆：重庆大学,2015.

[9] 高磊，蔡志远，等. 复合绝缘子表面雾滴对其闪络路径的影响[J].东北电力技术，2017，38（3）：1-5.

GAO Lei，CAI Zhiyuan，et al.Effect of Droplet on Composite Insulators for Flashover Path[J].Northeast Electric Power Technology，2017，38（3）：1-5.

[10] 俞宜任，杨雪峰. 绝缘子耐污伞形设计原则与选用要求[J].电瓷避雷器，2001，182：16-20.

YU Yi-ren，YANG Xuefeng.Design Aspects and Application of Plllution-proof Insulator Sheds[J].Insulators and Surge Arresters，2001，182：16-20.

[11] 舒立春，袁前飞，等.不同伞形结构符合绝缘子的交流污闪有效爬电距离[J].电网技术，2011，35（3）：146-151.

SHU Lichun，YUAN Qianfei，et al.Utilization Coefficient of Creepage Distance of Composite Insulators With Different Umbrella Shape Configurations in AC Pollution Flashover Process[J].Insulators and Surge Arresters，2011，35（3）：146-151.

[12] 范建斌，宿志一，等.高压直流支柱绝缘子和套管伞形结构研究[J].中国电机工程学报，2007，27（21）：1-6.

FAN Jianbin，SU Zhiyi，et al.Research on Profiles of HVDC Post Insulator and Bsuhing[J].Proceedings of the CSEE，2007，27（21）：1-6.

[13] 吴光亚，蔡炜，等. 500kV 线路长串绝缘子爬电距离有效系数的试验研究[J].中国电机工程学会高压专委会 2007 年学术年会论文集，2007.

[14] 王黎明，张楚岩，等. 特高压交流复合绝缘子伞裙结构的优化设计[J].高电压技术，2009，35（10）：2335-2336.

WANG Liming，ZHANG Chuyan，et al.Optimization of Composite Insulators Sheds for 1000kV UHV AC Transmission Lines[J].High Voltage Engineering，2009，35（10）：2335-2336.

[15] 刘毓，蒋兴良，等. 复合绝缘子伞裙结构特征参数对齐冰闪特性的影响[J].电工技术学报，2014，29（8）：321-326.

Liu Yu，Jiang Xingliang，et al.Influence of Characterizing Shed Configuration

Parameters of Composite Insulators on Icing Flashover Performance[J].Transactions of China Electro-technical Society，2009，35（10）：2335-2336.

[16] 吕玉坤，王佳文，等. 水珠对复合绝缘子表面电场畸变特性的影响[J].电网技术，2021，45（3）：1202-1207.

LVYukun，WANG Jiawen，et al.Effect of Water Drop on Electric Field Distortion of CompositeInsulators[J]. Power System Technology，2021，45（3）：1202-1207.

[17] GB 311.1-2012 绝缘配合第 1 部分：定义、原则和规则[S].

GB 311.1-2012 Insulation co-ordination - Part 1：Definitions, principles and rules[S].

作者简介：

赵彦军（1981—），男（汉族），高级工程师，长期从事电力电容器装置的技术工作

华雪梅（1977-），女（汉族），助理工程师，长期从事电力电容器装置的管理工作

贾伟英（1980—），女（汉族），工程师，长期从事电力电容器装置的技术工作

宋萍萍（1982—），女（汉族），工程师，长期从事电力电容器装置的技术工作

联系方式：

赵彦军

15261582599@163.com

无锡赛晶电力电容器有限公司

地址：无锡市惠山经济开发区春惠路 18 号

电话：0510-83767375

传真：0510-82735305

手机：15261582599