团体标准

发 布

中国电机工程学会

20XX—XX—XX实施

20XX—XX—XX发布

统一潮流控制器绝缘配合技术规范

Technical specifications for insulation co-ordination of unified power flow controller（UPFC）

（征求意见稿）

T/CSEE XXXX—YYYY

ICS 19.020

CCS K85

目 次

[前 言 3](#_Toc12119)

[1 范围 4](#_Toc22112)

[2 规范性引用文件 4](#_Toc14298)

[3 术语和定义 4](#_Toc21852)

[3.1 统一潮流控制器 unified power flow controller（UPFC） 4](#_Toc9719)

[3.2 并联变压器 shunt transformer 4](#_Toc11247)

[3.3 串联变压器 series transformer 4](#_Toc6433)

[3.4 晶闸管旁路开关 thyristor bypass switch（TBS） 5](#_Toc24808)

[4 符号和缩略语 5](#_Toc30059)

[4.1 符号 5](#_Toc26253)

[4.2 缩略语 5](#_Toc28820)

[5 典型UPFC避雷器布置 5](#_Toc15849)

[6 绝缘配合原则 7](#_Toc18592)

[6.1 绝缘配合步骤 7](#_Toc29064)

[6.2 避雷器的配置原则 7](#_Toc30746)

[6.3 设备可能承受的电压 7](#_Toc2866)

[7 过电压及避雷器参数选择 7](#_Toc7534)

[7.1 UPFC过电压分析 7](#_Toc1124)

[7.2 避雷器参数选择 10](#_Toc13815)

[7.3 避雷器配置 11](#_Toc28559)

[8 设备绝缘水平确定 13](#_Toc4799)

[8.1 绝缘配合流程 14](#_Toc18546)

[8.2 绝缘水平确定 14](#_Toc23557)

[9 空气间隙 15](#_Toc3068)

[9.1 UPFC交流设备空气间隙 15](#_Toc25076)

[9.2 UPFC直流设备空气间隙 15](#_Toc31908)

[10 爬电距离 15](#_Toc11328)

[10.1 爬电距离基准电压 15](#_Toc24085)

[10.2 UPFC交流设备爬电距离 15](#_Toc1924)

[10.3 UPFC直流设备爬电距离 15](#_Toc2975)

前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准化管理办法》、《中国电机工程学会标准化管理办法实施细则》的要求，依据GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会高压电标准专业委员会技术归口和解释。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条1 号，100761，网址：http：//www.csee.org.cn，邮箱：[cseebz@csee.org.cn](mailto:cseebz@csee.org.cn)）。

统一潮流控制器绝缘配合技术规范

1. 范围

本文件规定了220kV和500kV统一潮流控制器（以下简称UPFC）的绝缘配合原则、避雷器参数选择和设备绝缘水平。

本文件适用于电力系统中220kV和500kV UPFC的绝缘配合，其它电压等级可参照执行。

1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 311.1—2012 绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则

GB/T 311.2—2013 绝缘配合 第 2 部分：使用导则

GB/T 311.3—2017 绝缘配合 第 3 部分：高压直流换流站绝缘配合程序

GB/T 2900.8—2009 电工术语 绝缘子

GB 11032—2020 交流无间隙金属氧化物避雷器

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

GB/T 22389—2008 高压直流换流站无间隙金属氧化物避雷器导则

GB∕T 36498—2018 柔性直流换流站绝缘配合导则

GB/T 40867—2021 统一潮流控制器技术规范

GB/T 50064—2014 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范

GB/T 16434—1996 高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准

1. 术语和定义

GB/T 311.1—2012、GB/T 311.3—2017、GB 11032—2020、GB/T 2900.8—2009和GB/T 22389界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1  
 统一潮流控制器 **unified power flow controller（UPFC）**

将两个（或多个）共用直流母线的电压源换流器分别以并联和串联的方式接入输电系统中，通过调节线路等效阻抗、电压幅值和相角，实现潮流控制的装置。

3.2  
 并联变压器 **shunt transformer**

至少具有一个与交流系统并联的网侧绕组以及一个连接换流器的阀侧绕组的变压器。

[来源：GB/T 40867—2021，定义 3.5]

3.3  
 串联变压器 **series transformer**

至少具有一个与线路串联以改变线路电压值和（或）相位的串联绕组及一个励磁绕组的变压器。

[来源：GB/T 40867—2021，定义 3.6]

3.4  
 晶闸管旁路开关 **thyristor bypass switch（TBS）**

一种采用晶闸管（含辅助设施）正反向并联构成的电力电子开关，与串联变压器励磁绕组绕组并接。

[来源：GB/T 40867—2021，定义 3.2]

1. 符号和缩略语
   1. 符号

下列符号适用于本文件。

*K*a：海拔修正因数

*K*c：配合因数

*K*cd：确定性配合因数

*K*s：安全因数

*U*c：避雷器持续运行电压

*U*rp：代表性过电压

*U*cw：配合耐受电压

*U*rw：要求耐受电压

*U*w：规定耐受电压

*U*ref：直流参考电压

* 1. 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CCOV：峰值持续运行电压

SIPL：操作冲击保护水平

LIPL：雷电冲击保护水平

STIPL：陡波前冲击保护水平

SIWV：操作冲击耐受电压

LIWV：雷电冲击耐受电压

STIWV：陡波前冲击耐受电压

RSIWV：要求操作冲击耐受电压

RLIWV：要求雷电冲击耐受电压

RSTIWV：要求陡波前冲击耐受电压

1. 典型UPFC避雷器布置

UPFC避雷器布置可根据具体工程实际需求确定，典型含有一台并联变压器和2台串联变压器的220kV和500kV UPFC避雷器布置如图1。图1中涉及的符号说明见表1。



其中：

A：并联变压器交流侧避雷器；

AF1：并联变压器阀侧避雷器；

AF2：串联变压器阀侧避雷器；

AFL1：并联换流器桥臂电抗器交流侧避雷器；

AFL2：串联换流器桥臂电抗器交流侧避雷器；

AP：串联变压器平衡绕组避雷器；

AO：串联变压器中性点避雷器；

AT：TBS端间避雷器；

VL1：并联换流器阀底避雷器；

VL2：串联换流器阀底避雷器；

AK：串联变压器网侧一相端子间避雷器；

AL：串联变压器网侧线路避雷器；

DL：直流极线避雷器。

图1 典型220kV和500kV UPFC避雷器布置

表1 典型220kV和500kV UPFC避雷器布置符号说明

| **符号** | **说明** |
| --- | --- |
|  | MMC换流阀组 |
|  | 避雷器 |
|  | 电抗器 |
|  | 晶闸管旁路开关 |
|  | 串联变压器 |
|  | 接地 |

1. 绝缘配合原则
   1. 绝缘配合步骤

UPFC绝缘配合方法一般有以下步骤：

1. 根据系统拓补结构，开展预期过电压仿真计算和分析；
2. 初步确定避雷器的配置方案，包括避雷器的类型、性能参数和安装位置等；
3. 计算分析直流侧和交流侧各种故障和典型操作在UPFC产生的过电压，确定各设备可能承受的代表性过电压，并校核避雷器的额定电压、配合电流、保护水平和能量要求；
4. 通过对设备的绝缘水平与避雷器的参数反复调整，优化绝缘配合设计。
   1. 避雷器的配置原则

UPFC的避雷器配置如下：

1. 交流侧产生的过电压应由交流侧避雷器加以限制，直流侧产生的过电压应由直流侧避雷器加以限制，关键设备应由与该部件紧密相连的避雷器直接保护；
2. 桥臂电抗器不配置并联避雷器，仅需在两侧配置一端对地的避雷器，串联变压器网侧绕组端子间配置跨接（并联）的避雷器AK，主要保护串变网侧绕组，是否配置端对地避雷器需通过仿真计算确定。
3. 串联变压器网侧端间跨接避雷器AK主要保护串变网侧绕组；极线区域由极线避雷器DL保护；AT避雷器主要是限制TBS端间过电压，直接保护TBS；AF避雷器保护串、并联变压器阀侧设备。（主语统一）。
   1. 设备可能承受的电压

根据作用电压的幅值、波形及持续时间，可将设备在运行中可能受到的电压分为：

1. 持续运行电压（其值不超过设备最高运行电压*U*r，持续时间等于设备设计运行寿命）；
2. 暂时过电压（主要包括工频过电压）；
3. 缓波前（操作）过电压；
4. 快波前（雷电）过电压；
5. 陡波前过电压。
6. 过电压及避雷器参数选择
   1. UPFC过电压分析
      1. UPFC关键区域划分

根据UPFC的系统结构和运行特点，可将其分为7个关键区域，区域a—并联变压器网侧、b—并联变压器阀侧、c—并联换流器阀底、d—换流器直流侧、e—串联换流器阀底、f—串联变压器阀侧、g—串联变压器网侧，如图2所示。



图2 UPFC关键区域划分

* + 1. UPFC设备最高运行电压

UPFC的最高运行电压是过电压计算、确定避雷器性能参数的基础数据，典型220kV和500kV UPFC各关键区域最高运行电压如表2所示。下表中除换流器直流侧电压为直流外，其他均为交流相对地电压有效值。

表2 典型220kV和500kV UPFC系统最高运行电压

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **编号** | **a** | **b** | **c** | **d** | **e** | **f** | **g** |
| 关键位置 | 并联变压器网侧 | 并联变压器阀侧 | 并联换流器阀底 | 换流器直流侧 | 串联换流器阀底 | 串联变压器阀侧 | 串联变压器网侧 |
| 500kV UPFC  最高电压(kV) | 317.6 | 62.5 | 63.6 | 95 | 60.4 | 66.9 | 317.6 |
| 220kV UPFC  最高电压(kV) | 23.4 | 13.8 | 14.9 | 21 | 14.9 | 13.8 | 145.5 |

1. 南京铁北220kV UPFC工程的并联变压器网侧接入35kV母线。
   * 1. UPFC过电压分析
2. 操作（缓波前）过电压；

引起UPFC操作过电压的故障工况包括：a、b、c、e、f、g共6个区域的单相接地故障、两相接地故障、三相接地故障和两相短路故障。三相短路故障发生概率极低，因此不以该故障作为UPFC绝缘设计的依据。

1. 雷电（快波前）过电压分析

UPFC无直流出线，因此UPFC只需考虑串、并联变压器交流侧母线/线路的雷电侵入波过电压的作用。来自串、并联变压器交流侧的雷电侵入波，经过变压器传入阀侧后，陡度与幅值均大幅度减小，变成幅值并不大的缓波前过电压。因此可以作为缓波前过电压进行绝缘配合。因此在并联变压器以及串联变压器阀侧配置相应的避雷器即可，避雷器参数的选择可参考GB/T 50064—2014中相关规定执行，并且变压器阀侧和阀厅设备绝缘水平与避雷器雷电冲击保护水平之间配合即可。

1. 各关键区域过电压分析

1）串、并联变压器网侧的过电压

串、并联变压器网侧的过电压主要来自于所联结的交流系统雷击过电压、开关操作和短路故障，其幅值、规律和防护措施与常规交流系统基本相同。对于雷击过电压，可在线路侧安装避雷器加以防护；对于线路开关操作过电压，则可以通过控制策略避免，如采用线路开关闭合后再投入UPFC、UPFC退出后才拉开线路开关的策略，可以有效防止线路开关操作对UPFC产生不利影响。

其中需要注意的是串联变压器网侧的短路故障过电压，由于其接线、运行方式不同于常规交流系统的变压器，正常运行过程中变压器网侧绕组两端电压远低于线路电压，如苏州南部电网500kV变电站UPFC工程中，线路额定电压为550kV，而串联变压器网侧绕组额定电压仅为25.1kV，当线路中出现短路故障时，变压器上承受的过电压会远高于正常工作电压。

假设某UPFC工程串联变压器网侧交流系统母线电压为*U*i，串联变压器网侧某相套管出口处发生金属性接地短路故障。此时，网侧该相绕组故障端电压降为0，而健全端依然为母线相电压，导致C相绕组承受较高的过电压。

对于串联变压器上的短路故障过电压，一般在变压器结构设计时即予以考虑，如根据网侧电压等级采用全绝缘设计提高绝缘强度。

2）串、并联变压器阀侧的过电压

串、并联变压器阀侧过电压根据来源区域可分为网侧传入过电压和阀侧故障过电压。

①网侧传入过电压。当串、并联变压器网侧出现雷击或操作过电压时，会通过变压器耦合传入阀侧。由于网侧会根据其电压等级安装相应的变电站用避雷器进行保护，限制雷击过电压和操作过电压，因而传到串、并联变压器阀侧后幅值已显著降低。

②串、并联变压器阀侧和桥臂电抗器阀侧发生单相接地、三相接地、相间短路等故障均会在并联变压器阀侧交流设备上产生过电压，其中较为典型的是单相接地故障。

串、并联变压器阀侧发生单相接地故障后，故障相电压立即降为0，中性点电压升高为相电压，非故障相的对地电压将升高为线电压。

桥臂电抗器阀侧发生单相接地故障时也会在串、并联变压器阀侧交流设备上产生过电压，过电压机理与串、并联变压器阀侧单相接地故障相同。

3）换流器阀底及阀两端的过电压

换流器阀底及阀两端的过电压主要来源于其他桥臂故障、阀顶故障以及串、并联变压器网侧和阀侧故障。由于串联变压器网侧电压往往远高于阀侧电压，因而网侧传入的过电压一般高于阀侧故障产生的过电压。

4）换流器直流侧的过电压

换流器直流侧过电压产生的主要原因有直流极线接地和直流极间短路故障，这两种故障会在换流器直流母线及相关设备上产生较大过电压，且过电压水平与直流系统的运行方式以及故障发生位置有关。

对于直流极线接地故障，故障发生后，故障极电压迅速降为0，由于换流器正负极之间模块电容的存在，直流正负极间电压将保持大致不变，从而在健全极直流母线上会产生较大对地过电压，其过电压幅值与直流系统的运行方式密切相关。

对于直流极间短路故障，故障发生后直流极线电压迅速降为0，在换流器直流侧不会产生严重过电压，但是由于故障后直流电流迅速增大，直流电流通过换流器桥臂电抗器，从而在桥臂电抗器端间产生过电压。

* 1. 避雷器参数选择

在确定UPFC避雷器参数时，需要综合考虑系统运行电压、避雷器保护水平和能量要求等因素，使站内设备在故障下的过电压水平尽可能低，同时避雷器的数量又不致过多，即综合考虑设备过电压和经济成本。避雷器参数选择一般原则如下所述：

为了保证避雷器的可靠运行，必须保证避雷器既能长期承受住可能出现在它两端的峰值持续运行电压（CCOV），避免避雷器在系统正常运行时吸收不必要的能量，又能在过电压情况下准确动作

交流避雷器的额定电压*U*r和直流避雷器的参考电压*U*ref的选择需综合考虑荷电率、CCOV、暂时过电压、雷电冲击和操作冲击保护水平以及避雷器的能量等因素优化选择。

配合电流和能量的选取需要考虑各种故障情况下的避雷器电流和能量的仿真结果。

* + 1. 持续运行电压*U*c

避雷器持续运行电压由其安装位置的最大运行电压决定，对于交流避雷器取安装位置最高运行电压有效值，对于直流避雷器可取为峰值持续运行电压，典型500kV UPFC工程各关键区域设备最高运行电压如7.1.2中所述。

* + 1. 荷电率*k*c

避雷器荷电率是指避雷器持续运行电压峰值和避雷器参考电压的比值，表征避雷器单位电阻片上的电压负荷。荷电率的大小直接决定了避雷器的参考电压，荷电率取的较低，则避雷器的参考电压较高，使得正常运行时避雷器中流过泄漏电流较小，不易老化；荷电率取得较高，则避雷器的参考电压较低，从而可以降低避雷器的保护水平，进而可以降低所保护设备的绝缘水平。避雷器荷电率的选取通常需要综合考虑避雷器持续运行电压、电压谐波含量大小、避雷器安装位置的环境条件等因素。对于交流避雷器，荷电率一般可取0.75~0.8；对于直流避雷器，根据避雷器承受电压波形和安装位置的不同，可取0.8~1.0。

* + 1. 避雷器的参考电压（*U*ref）的选择

直流避雷器的荷电率是表征避雷器的电压负荷程度的一个参数，定义为CCOV的电压峰值与直流参考电压*U*ref的比值。荷电率高，电阻片数量少，残压降低，保护水平低；但泄漏电流增大，有功损耗增加，易老化，缩短了避雷器的使用寿。反之，荷电率低，残压高，保护水平高，损耗小，寿命长。根据参考电压与持续运行电压及荷电率的关系，可根据下式计算参考电压*U*ref：

 （4）

式中，对于交流避雷器；对于直流避雷器。

在确定了各类型避雷器的*U*ref后，可基本确定其相应的保护水平。

* + 1. 避雷器的保护水平（残压）

避雷器的保护水平是指避雷器流过配合电流时两端的残压。避雷器的保护水平越低越有利于降低设备绝缘水平，从而降低设备制造难度和制造成本。但避雷器保护水平过低，会使避雷器在过电压应力下吸收能量过大，即所需的避雷器数量或体积非常大，这增加了避雷器的制造难度与成本，同时也增加了换流器避雷器及其他设备布置的难度。因此在确定避雷器保护水平时，一般需要综合考虑避雷器所保护设备的过电压水平和避雷器的数量，结合电磁暂态仿真计算结果进行优化选择，使得设备上的过电压尽可能低，但又不使避雷器数量过多。一般避雷器的残压可从生产厂家型式试验时被试的比例单元的相应的残压乘以比例系数算出。比例系数可由*U*ref决定的串联避雷器阀片数算出。

* + 1. 避雷器的配合电流

配合电流值由系统过电压研究确定。研究需考虑各类型避雷器吸收的能量、单台避雷器内部需并联柱数和单台避雷器放电电流峰值，该值与其外部并联的避雷器数量相关。配合电流对应的残压确定了受该避雷器直接（紧靠的）保护设备上的代表性过电压。该研究过程是在避雷器布置和参数选择与受其直接保护设备的要求耐受电压之间反复计算调整，寻找最优平衡点。最终结果是优选出配合电流。

UPFC配合电流的选择可参考GB/T 311.3。

* + 1. 避雷器的能量参数

避雷器的能量与UPFC故障类型及持续时间、控制和保护的响应速度及延迟时间密切相关。不同的过电压事件下避雷器放电电流的持续时间会有所变化。在规定避雷器的能量时，应考虑放电电流的幅值及其持续时间，包括因相关故障、操作或保护动作顺序而导致避雷器重复动作。连续几个基波周期的重复冲击放电电流可视为单次放电，该单次放电的能量和持续时间等于实际重复放电电流和时间的累积。从热稳定观点看，重复的冲击电流应该按照较长的电流持续时间来考虑，当确定等效能量时，还应考虑持续时间小于200μs的电流脉冲会降低避雷器能量耐受能力。

可选择特性相匹配的金属氧化物避雷器并联，满足避雷器单次允许能量要求和降低避雷器残压。并联方式可采用一个避雷器瓷套内部多柱电阻片并联或外部多只避雷器并联。应考虑多柱式避雷器或多只避雷器并联之间放电电流分配的不均匀性，尤其是动态均流特性以及单柱电阻片沿面耐受电压变化梯度的能力。

提高避雷器的参考电压（*U*ref）可以降低避雷器的比能量（kJ/kV）要求。

在规定避雷器吸收能量时，应对系统研究计算出的能量值考虑一个合理的安全因数。这个安全因数的取值范围为0%～20%，该因数取决于计算输入数据的容差、所用模型及高于已研究的决定避雷器能量事件出现的概率。

* 1. 避雷器配置

典型220k和500kV UPFC的7个区域内避雷器配置如图3。各个位置避雷器的名称、代号、所属范围及保护对象如表3。



图3 典型UPFC不同区域避雷器配置及代号

表3 典型UPFC避雷器保护范围及特点

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **位置** | **代号** | **所属范围** | **保护范围及特点** |
| 并联变压器网侧 | A | 交流侧 | 并联变压器网侧避雷器保护并变交流侧。避雷器的安装紧靠并变。按照交流避雷器配置原则配置。UPFC工程无交流滤波器组，因此无需考虑常规直流滤波器组上所装交流母线避雷器。 |
| 并联变压器阀侧 | AF1、AFL1 | 交流侧 | AF1避雷器保护并联变压器阀侧绕组和阀侧开关场设备，AFL1避雷器保护并联换流器桥臂电抗器。AF1、AFL1避雷器的能量要求和操作冲击保护水平(SIPL)需要综合考虑交流系统故障以及直流侧故障引起的操作冲击。 |
| 并联换流器阀底 | VL1 | 交流侧 | 该避雷器主要保护并联换流阀与桥臂电抗器之间的电气联结点。主要考虑操作冲击，需要考虑的故障包括并变阀侧故障、并变阀底故障以及直流故障对该点的冲击。 |
| 换流器阀顶（直流母线） | DL1、DL2 | 直流侧 | 该避雷器主要保护直流母线上所有设备。UPFC工程无直流滤波器组，因此无需考虑常规直流滤波器组上所装避雷器。换流器阀顶过电压最严重的工况是由直流极线接地、直流极间短路引起。 | |
| 串联换流器阀底 | VL2 | 交流侧 | 该避雷器主要保护串联换流阀与桥臂电抗器之间的电气联结点。主要考虑操作冲击，需要考虑的故障包括串变阀侧故障、串变阀底故障以及直流故障对该点的冲击。 | |
| 串联变压器阀侧 | AF2、AFL2 | 交流侧 | AF2避雷器保护串联变压器阀侧绕组和阀侧TBS设备，AFL2避雷器保护串联换流器桥臂电抗器。AF2、AFL2避雷器的能量要求和操作冲击保护水平(SIPL)需要综合考虑交流系统故障以及直流侧故障引起的操作冲击。 | |
| TBS两端并联避雷器 | AT | 关键设备 | AT避雷器主要保护TBS设备和串联变压器阀侧绕组。 | |
| 串联变压器中性点避雷器 | AO | 关键设备 | AO避雷器主要保护串联变压器中性点、中性点电阻，正常情况下电压为零，系统故障时出现偏置电压。 | |
| 串联变压器网侧 | AK、AL | 交流侧 | AL为线路避雷器，主要保护串联变压器网侧主绝缘，按照交流避雷器配置原则配置。AK为串联变压器网侧绕组两端子间的跨接避雷器，主要保护串联变压器绕组匝间绝缘；串联变压器网侧绕组过电压最严重的工况是由网侧接地故障和雷电侵入波引起的冲击。 | |
| 串联变压器平衡绕组避雷器 | AP | 关键设备 | AP避雷器主要保护串联变压器平衡绕组。 | |

1. 并联变压器交流侧避雷器(A)

UPFC站并联变压器交流侧是由网侧A型避雷器以及与UPFC布置有关的其它位置的A避雷器提供保护。GB/T 50064—2014规定220~750kV交流系统在满足线路断路器变电站侧和线路侧工频过电压不超过1.3 p.u和1.4 p.u（持续时间不大于0.5s）时，变电站侧和线路侧A避雷器的额定电压宜按0.75*U*s选取。为降低串、并联变压器阀侧绝缘水平，基于避雷器具有良好的工频电压时间耐受特性，UPFC站控系统有控制工频过电压的策略，UPFC站A避雷器的额定电压可以选择比0.75*U*s低。

应注意A避雷器与UPFC或其附近变电站已有的交流避雷器之间的配合。需根据雷电侵入波过电压计算确定交流母线是否装避雷器。

避雷器参数的选择应考虑接地故障清除后交流电压恢复等最苛刻工况，包括变压器饱和过电压和甩负荷过电压，以及断路器分闸时断口重击穿的过电压。

若存在高幅值和长持续时间的饱和过电压时，应选择大能量的避雷器。对于交直流紧密耦合系统应考虑各UPFC交流避雷器额定电压、保护水平和相应配合电流相互配合，使它们各自适当地分担过电压下的能量。

1. 串、并联变压器阀侧避雷器(AF、AFL)

串、并联变压器阀侧，对应于图中区域2和6。在串、并联变压器阀侧交流母线安装避雷器AF与AFL，限制串、并联变压器阀侧过电压，保护串、并联变压器阀侧绕组和桥臂电抗器。避雷器AF和AFL参数完全相同，如并联变压器与桥臂电抗器间的电气距离较短，也可以合并为一个避雷器。这是因为雷电、操作或故障产生的冲击电流在避雷器和被保护设备间的连接线上的波过程使设备出现了高于避雷器残压的振荡电压，减小了避雷器的保护裕度。被保护设备上的最高过电压*U*t与避雷器的残压*U*res差值Δ*U*的表达式为：

 （5）

式中：*α*代表了波的陡度，与变电站的接线方式及进线段保护相关；*l*为连接线的长度；*v*为波传播的速度，其值与光速相同，为3×108m/s。

由式5可知，避雷器和被保护设备间的连接线越长，Δ*U*就越大，当多台设备间的连接线较短时，可考虑采用同一支避雷器进行保护。

AF、AFL避雷器承受的操作过电压需要综合考虑其它桥臂（包括对极）和变压器阀侧引线单相接地、两相接地、两相短路，同时需要考虑对极直流极线站内接地等工况。

1. 串、并联变压器阀底避雷器(VL)

串、并联变压器阀侧，对应于图中区域3和5。在串、并联换流器阀底安装避雷器VL。VL的作用是限制换流阀底过电压，直接保护阀底设备，并与AFL避雷器共同保护桥臂电抗器的匝间绝缘。VL2除了VL1避雷器所有功能之外，VL2避雷器还具备限制串联换流器端间过电压的功能。

1. 串联变压器网侧避雷器(AK、AL)

串联变压器网侧，对应于图中区域8。在串联变压器网侧绕组两端安装跨接避雷器AK以及在两侧端子安装对地避雷器AL。AK避雷器的作用是限制串联变压器网侧绕组的端间过电压，保护串联变压器绕组匝间绝缘，同时还可以限制从交流系统通过串联变压器传递到低压侧绕组以及阀侧的过电压；AL避雷器的作用是限制串联变压器网侧对地过电压，保护串联变压器绕组主绝缘。

1. 换流器直流侧避雷器(DL)

换流器直流侧，对应于图中的区域4。在换流器直流侧安装避雷器DL，主要用于限制直流侧过电压，直接保护直流母线上的所有设备，其中DL1靠近并联换流器布置，DL2靠近串联换流器布置。

1. AO、AT避雷器

AT为晶闸管快速旁路开关TBS并联避雷器，AO为串联变压器中性点避雷器换流器直流侧，对应于图中的区域7。AT不仅可以限制TBS以及串联变压器阀侧绕组端间的过电压，直接保护TBS以及串联变压器阀侧绕组，还可以限制从交流系统通过串联变压器传递到阀侧的过电压，保护串联换流器。

AO的作用是保护串联变压器中性点对地绝缘以及中性点电阻。由于变压器中性点配置了比较大的电阻，在接地故障下为了控制变压器中性点的绝缘水平，故配置AO避雷器。AO避雷器在稳态运行工况下运行电压很低，一般不对其CCOV做具体要求。其具体的操作保护水平，一般在综合考虑变压器、中性点接地电阻、避雷器等设备的经济性的条件下，通过过电压仿真优化配置。

1. AP避雷器

AT为串联变压器平衡绕组避雷器，在串联变压器平衡绕组安装对地避雷器AP，作用是限制串联变压器平衡绕组的过电压，直接保护平衡绕组。

1. 设备绝缘水平确定
   1. 绝缘配合流程

电力系统绝缘配合方法主要包括确定性法（惯用法）、统计法和简化统计法三种。UPFC采用确定性法进行绝缘配合，即设备安装点处的预期最大过电压与耐受电压之间，按设备制造和电力系统的运行经验选取适宜的配合系数。主要步骤包括：

1. 确定设备上可能出现的最危险的过电压和设备绝缘最低耐受强度；
2. 根据运行经验，选择一个配合系数作为这两种电压的比值，以补偿在估计最大过电压和绝缘最低耐受强度时的误差及增加一定的安全裕度；
3. 确定设备绝缘应能耐受的电压水平。
   1. 绝缘水平确定

根据经验对于海拔低于1000m的高压直流换流站，由避雷器保护水平乘以一个配合因数获得设备的要求耐受电压。UPFC各区域设备要求耐受电压与避雷器保护水平的比值不小于表4中的值。

表4 UPFC设备要求耐受电压与冲击保护水平的比值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **设备类型** | **RSIWV/SIPL** | **RLIWV/LIPL** | **RSTIWV/STIPL** |
| 交流开关场-包括母线，户外绝缘和其他通常设备 | 1.2 | 1.25 | 1.25 |
| 变压器（油绝缘设备） | 1.20 | 1.25 | 1.25 |
| 变压器线路侧 | 1.20 | 1.25 | 1.25 |
| 变压器阀侧 | 1.15 | 1.20 | 1.25 |
| 换流阀 | 1.15 | 1.15 | 1.20 |
| 直流阀厅设备 | 1.15 | 1.15 | 1.25 |
| TBS阀 | 1.15 | 1.15 | 1.20 |

UPFC设备绝缘水平要等于或高于要求耐受电压。交流设备的绝缘水平在GB311.1中有相应的标准值。对于直流设备，其绝缘水平等于要求耐受电压向上调整到方便的可行值。表5和表6是220kV和500kV UPFC设备典型绝缘水平值。

表5 220kV UPFC设备典型绝缘水平

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **位置** | **LIPL(kV)** | **LIWV(kV)** | **LIWV/LIPL** | **SIPL(kV)** | **SIWV(kV)** | **SIWV/SIPL** |
| 并联变压器交流侧 | 134 | 185 | 1.38 | 114 | 150 | 1.32 |
| 并联变压器阀侧 | 63 | 185 | 2.94 | 56 | 150 | 2.68 |
| 换流器阀底 | 61 | 125 | 2.05 | 61 | 95 | 1.56 |
| 换流器阀顶  （直流母线） | 75 | 125 | 1.67 | 67 | 95 | 1.42 |
| 串联变压器阀侧 | 88 | 185 | 2.10 | 80 | 150 | 1.88 |
| 串联变压器交流侧 | 532 | 1050 | 1.97 | 452 | 750 | 1.66 |
| TBS端间 | 35 | 45 | 1.29 | 38.4 | 45 | 1.17 |
| 桥臂电抗器 | 63 | 185 | 2.94 | 56 | 150 | 2.68 |

表6 500kV UPFC设备典型绝缘水平

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **位置** | **LIPL(kV)** | **LIWV(kV)** | **LIWV/ LIPL** | **SIPL(kV)** | **SIWV(kV)** | **SIWV/ SIPL** |
| 并联变压器交流侧 | 1046 | 1550 | 1.48 | 858 | 1175 | 1.37 |
| 并联变压器阀侧 | 190 | 238 | 1.25 | 190 | 228 | 1.20 |
| 并联换流器阀底 | 190 | 238 | 1.25 | 190 | 228 | 1.20 |
| 换流器阀顶  （直流母线） | 190 | 238 | 1.25 | 190 | 228 | 1.20 |
| 串联换流器阀底 | 220 | 275 | 1.25 | 220 | 264 | 1.20 |
| 串联变压器阀侧 | 190 | 237.5 | 1.25 | 190 | 228 | 1.20 |
| 串联变压器交流侧 | 1046 | 1550 | 1.48 | 858 | 1175 | 1.37 |
| TBS端间 | 155 | 193.5 | 1.25 | 155 | 186 | 1.20 |
| 桥臂电抗器 | 226 | 283 | 1.25 | 226 | 271.2 | 1.20 |

1. 空气间隙
   1. UPFC交流设备空气间隙

GB/T 311.1-2012中详细地给出了如何选择交流系统要求的空气间隙，以满足标准的冲击耐受电压，UPFC站交流设备空气间隙可按照执行。

* 1. UPFC直流设备空气间隙

选择直流要求的最小空气间隙时要考虑交流、直流、雷电和操作冲击的联合作用情况。UPFC直流设备空气间隙的影响因素中，操作比雷电重要。对于一个标准的空气间隙，正的雷电冲击击穿电压至少要比正的操作冲击击穿电压高30%。选择合适的电极形状可提高操作冲击耐受电压，减小要求的最小空气间隙。

直流设备的空气间隙选择是基于设备规定的冲击耐受电压，该电压为避雷器保护水平乘以合适的裕度系数得到，而无需向上靠一个标准绝缘水平。

直流系统的空气间隙选择是基于设备规定的冲击耐受电压，该电压为避雷器保护水平乘以合适的裕度系数得到，而无需向上靠一个标准绝缘水平。UPFC设备最小空气间隙从设备操作和雷电冲击耐受电压下确定的最小空气间隙中取较大者。

详细的空气间隙计算方法可参考GB/T 311.3。

1. 爬电距离
   1. 爬电距离基准电压

配置外绝缘统一爬电比距所用的基准电压为：

1. UPFC交流侧（交流设备）相对地绝缘：相对地最高持续运行电压的有效值；
2. UPFC交流侧（交流设备）相间绝缘：相间最高运行电压的有效值；
3. 承受纯直流电压的直流设备的绝缘：设备承受的最高持续直流电压；
4. 承受直流、基频和谐波叠加电压波形的绝缘：电压的最高值（按照直流爬电比距要求选取）；
5. 交流基频和谐波叠加电压波形的绝缘：电压的最高有效值（按照交流爬电比距选取）。
   1. UPFC交流设备爬电距离

UPFC交流设备外绝缘最小爬电距离按照GB/T 16434-1996的4.7条最小爬电距离标准。典型220kV和500kV UPFC站按Ⅳ级污秽考虑，交流设备爬电比距不低于31mm/kV。

* 1. UPFC直流设备爬电距离

以持续运行直流电压为基础确定UPFC直流设备外绝缘的最小爬电比距。UPFC直流设备均安装于室内，由于室内环境条件可以得到很好的控制，运行中不受外界自然环境和污秽的影响，因此UPFC直流设备爬电比距可取较低的值，典型220kV和500kV UPFC阀厅设备爬电比距设计值为18mm/kV。

━━━━━━━━━━━