

集中式光伏发电系统的雷电浪涌防护设计

黄金鹏

厦门赛尔特电子股份有限公司, 厦门市翔安区翔安西路 8001,361013

摘要:

截止到 2024 年底, 光伏发电已经占全国新增电力供应的 26.5%, 仅次于火力发电。光伏发电系统作为可再生能源的重要组成部分, 近年来发展迅速, 在能源发电领域得到广泛应用。光伏系统主要分为集中式、分布式和混合式三大类。然而, 光伏发电系统面临严重的雷电浪涌危害, 雷电浪涌会击穿光伏组件的 PN 结和防倒流二极管, 损坏控制器、逆变器和外围设备等。为确保光伏发电系统稳定安全工作, 必须解决雷电浪涌问题。本文重点针对集中式光伏发电系统, 提出一种雷电浪涌保护设计方案, 通过合理使用电涌保护器, 可以有效抵御雷电入侵的危害, 降低光伏发电系统遭雷击的损失, 保障系统的安全运行。

关键词: 集中式光伏发电系统、雷电浪涌、电涌保护器。

1. 引言

光伏行业自 1839 年光生伏特效应发现至今累计装机突破 880GW, 已覆盖全球 180 多个国家当前, 中国主导全球 80%以上产能, 行业年减排 8 亿吨二氧化碳。集中式光伏电站规模大, 一般应用于大型开阔地区, 如平原、草原、沙漠、海边等, 其主要组成部分包括了主要设备包括: 光伏组件、汇流箱、逆变器、配电柜、变压器、能量和环境监控设备等。其中光伏并网逆变器是将太阳能电池所输出的直流电转换成符合电网要求的交流电, 再输入电网的设备, 是并网型光伏系统能量转换与控制的核心部件。然而, 许多光伏系统安装在雷击风险高的区域, 雷电成为光伏系统主要风险, 例如直击雷可导致组件烧毁或火灾, 雷电电磁脉冲 LEMP 引发逆变器等设备过电压损坏, 导致逆变器核心元件 (IGBT 模块、MPPT 控制器) 击穿或热失控, 叠加组件热斑效应可能诱发火灾。

2、光伏发电系统的雷电浪涌风险

2.1 雷电浪涌的危害效应

2.1.1 雷电电磁脉冲

雷电电磁脉冲又称感应雷。在各类光伏发电系统中, 雷击电磁脉冲 (LEMP) 可通过电源线/信号线耦合侵入, 典型值可达千伏级造成电源及控制设备的电路板击穿。

2.1.2 雷电的地电位反击

当雷电流通过接地系统泄放时, 由于不同接地体间的阻抗差异, 会在设备间形成危险的电位差。这种电位差可能引发设备间的闪络放电。雷电流泄放时不同接地系统电位差可达数万伏。在有外部防雷装置 LPS 的情况下, 光伏组件与外部防雷装置 LPS 未做等电位连接, 其支架易遭受地电位反击的冲击。

2.1.3 高低压线路上的雷电传导效应

在光伏电站的高、低压线路, 会将直击雷或者雷电电磁脉冲传导至各个设备端, 而造成大范围的设备损坏。

2.1.3 操作过电压

操作过电压与雷电浪涌相似，均属于瞬态过电压。操作过电压指由感性负载电流突变，如变压器、电机等感性设备启停时，磁场能量快速释放，产生 $L \cdot di/dt$ 感应电动势，形成陡峭电压。

2.1.5 其他瞬态过电压的影响

其他瞬态过电压包括电网电源中负载通断产生的瞬态过电压、由外部电路产生的瞬态过电压、设备内部产生的瞬态过电压等。

2.2 雷电的入侵途径

针对光伏发电系统，雷电流对其内部的电气电子系统的损害导致失效的情况，雷电流入侵其内部的途径包括四种类型。

2.2.1 雷击建筑物或构筑物 S1

雷击光伏发电装置的外部防雷保护装置上 (S1)，雷电流通过接闪器、引下线和接地系统，反击到光伏装置的内部。这部分雷击往往模拟雷电流波形为 $10/350\mu s$ 的直击雷，带有非常高的能量，造成光伏逆变器等设备损坏，严重时可能会引起功率模块、电池等设备的起火和爆炸。

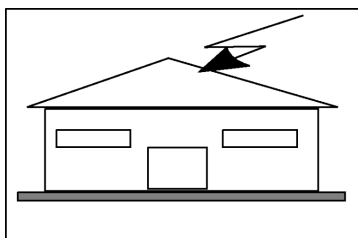


图 1 雷击建筑物或构筑物 S1

2.2.2 雷击建筑物或构筑物的附近 S2

雷击光伏发电装置 (S2) 附近，在雷电电磁脉冲的作用下，与接地系统耦合，在接地回路中产生感应过电压和感应雷电流，或者雷电电磁脉冲直接作用在附近光伏装置的电子设备上。这部分雷击通常以模拟雷电流波形为 $8/20\mu s$ 的雷电电磁脉冲或者感应雷电流

其产生的损害效应一般为导致光伏系统电子器件、传感器、数据通信等设备的失效。

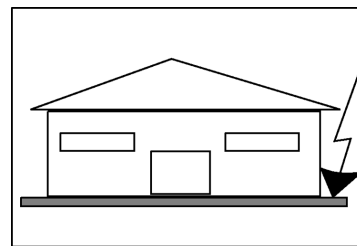


图 2 雷击建筑物或构筑物的附近 S2

2.2.3 雷击线路 S3

雷击线路 (S3)，雷电流以传导的形式，通过供电线路或者信号线路进入到光伏系统设备内。这部分雷击通常以模拟雷电流波形为 $10/350\mu s$ 的直击雷，带有非常高的能量，对光伏逆变器等设备进线开关、控制模块电源造成损坏，严重时也会以前起火和爆炸。

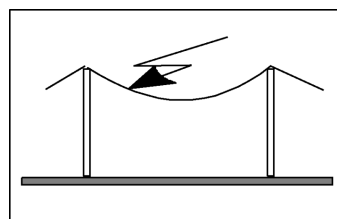


图 3 雷击线路 S3，

2.2.4 雷击线路附近 S4

雷击线路附近 (S4) 在雷电电磁脉冲的作用下，与供电线路或信号线路耦合，产生感应过电压和感应过电流，之后进入到光伏装置内的电子设备上。这部分雷击通常以模拟雷电流波形为 $8/20\mu s$ 的雷电电磁脉冲或者感应雷电流，其产生的损害效应一般为导致光伏电子器件、传感器、数据通信等设备的失效。

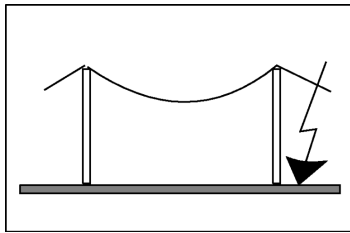


图 4 雷击线路附近 S4

3 光伏发电系雷电浪涌防护的设计原则

3.1 雷电防护区的定义

建筑物和构筑物，如光伏系统的雷电防护区的划分，根据其的接闪器的保护范围、各层屏蔽措施、等电位连接等确定。雷电防护区同时等决定了电涌保护器的安装位置。

LPZ 0_A：建筑物外部的无保护区域。能遭受直接雷击，无屏蔽电磁干扰脉冲（LEMP）。

LPZ 0_B：处于外部防雷系统保护的区域，无屏蔽措施，有 LEMP 干扰。

LPZ 1：建筑物内部的区域，可能有部分低能量的 LEMP。

LPZ 2：建筑物内部的区域。可能有少量的 LEMP。

LPZ 3-n：建筑物内部的区域（也可以是电气设备的金属外壳）没有通过 LEMP 或谐波的干扰脉冲。



图 5 建筑物防雷分区

3.2 雷电浪涌的防护措施

光伏发电系统内部雷电浪涌防护的基本防护措施（SPM）包括：

接地和连接网络：接地装置将雷电流传导并泄放到大地上，连接网络则最大程度地降低电位差，减少磁场。

磁屏蔽和布线：空间屏蔽衰减了雷闪直击建筑物或其附近而在 LPZ 内部产生的磁场，减少了内部浪涌。使用屏蔽电缆或屏蔽管道的内部线路屏蔽能使内部感应浪涌减至最小。

协调配合的 SPD 系统：该系统限制来源于外部和内部产生的浪涌。

隔离界面：隔离界面限制了进入 LPZ 线路中的传导浪涌。应始终确保良好接地，特别是在进入建筑物或构筑物的入口处，将每个导电装置直接或通过适合的 SPD 进行等电位化连接。

3.3 电涌保护器简介

3.3.1 电涌保护器的定义

电涌保护器（SPD），用于限制瞬态过电压和分泄电涌电流的器件。它至少含有一个非线性元件。电涌保护器（SPD）的核心作用是限制瞬态过电压和泄放电涌电流，保护电气设备免受雷电、操作过电压等瞬时高压冲击的损坏。

3.3.2 电涌保护器的分类

电涌保护器按其内部核心元件特性分为：电压开关型电涌保护器、限压型电涌保护器、组合型电涌保护器三类。

电压开关型电涌保护器，无电涌出现时为高阻抗，当出现电压电涌时突变为低阻抗。通常采用放电间隙、充气放电管等元件做电压开关型电涌保护器的组件。也称“克罗巴型”电涌保护器。具有不连续的电压、电流特性。

限压型电涌保护器，无电涌出现时为高阻抗，随着电涌电流和电压的增加，阻抗连续变小。通常采用压敏电阻、抑制二极管做

限压型电涌保护器的组件。也称“箝压型”电涌保护器。具有连续的电压、电流特性。

组合型电涌保护器，由电压开关型元件和限压型元件组合而成的电涌保护器，其特性随所加电压的特性可以表现为电压开关型、限压型或电压开关型和限压型皆有。

4 集中式光伏电站雷电浪涌防护设计

4.1 电涌保护器选型和安装的主要因素

用于保护光伏系统的 SPD 选型和安装取决于以下主要因素：

- 地闪密度 $N_c[1/(km^2 \cdot 年)]$ 或年平均雷暴日 T_p （每年的雷暴天数）。
- 低压电力系统特征（如架空线路或地下电缆），及被保护设备的特性。

-是否安装有外部 LPS，用以保护光伏系统免受直击雷。

-若安装外部 LPS，SPD 的要求取决于 LPS 的等级。

-LPS 和光伏系统之间需满足安全间隔距离的要求（隔离型/非隔离型 LPS）。

-土壤电阻率。

-安装在地面的光伏发电系统来说，通常选用 LPLIII。

4.2 集中式光伏系统的电涌保护器设计要求

4.2.1 电涌保护器的安装位置及试验等级

根据相关规范，结合雷电防护区的定义以及各种光伏发电系统的使用场景，按下述方式配置电涌保护器，如图所示。

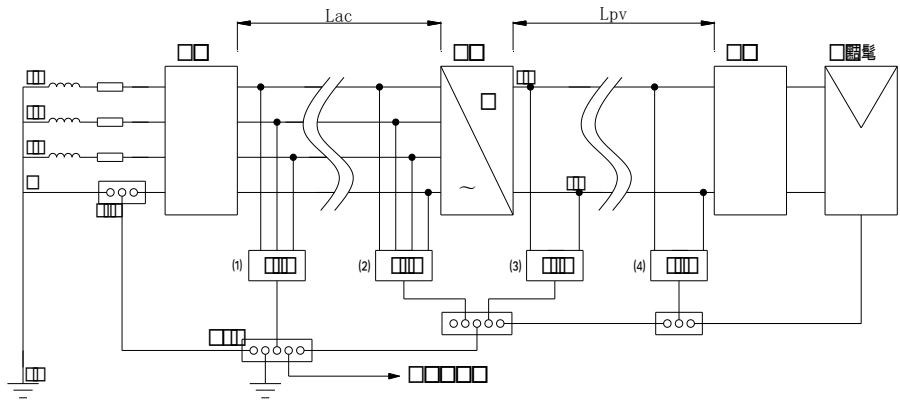


图 6 电涌保护器在光伏发电系统中的安装

上图中位置①的 SPD 为配电柜或并网柜内的交流电涌保护器，其位置应尽量靠近电网，位置②的 SPD 为逆变器交流侧的电涌保护器，位置③的 SPD 为逆变器直流侧的电涌保护器，位置④的 SPD 为汇流箱的电涌保护器，其位置尽量靠近光伏组件。其中逆变器至配电柜之间的距离记为 L_{ac} ，变流器至汇流箱之间的距离记为 L_{pv} 。逆变器直流侧电涌保护器试验标准参照 GB/T18802.31，交流侧电涌保护器试验标准参照 GB/T18802.11。

(10/350 μ s) 和标称放电电流 I_n (8/20 μ s)

I类试验的冲击放电电流，流过 SPD 具有指定转移电荷量 Q 和在指定时间内具有指定比能量 W/R 的放电电流峰值。II类试验的标称放电电流，流过 SPD 具有 8/20 波形电流的峰值。对于满足II试验的 SPD，标称放电电流作为一个试验参数，用以确定测得的限制电压（另一项试验是电压开关型和复合型 SPD 的波前放电电压试验）。

4.2.2 电涌保护器的冲击放电电流 I_{imp}

表 1 集中式光伏电站中逆变器直流侧使用 SPD 的 I_{imp} 和 I_n 值要求

雷电保护等级和最大雷电电流 (10/350)		连接到逆变器直流侧的电涌保护器 I_{imp} (10/350 μ s), I_n (8/20 μ s)					
		电压限制型 SPD 或 电压限制型与电压开关型串联组合的 SPD				电压开关型 SPD 或 电压开关型与电压限制型并联组合的 SPD	
		$I_{10/350}$		$I_{8/20}$		$I_{10/350}$	
		每模	I_{total}	每模	I_{total}	每模	I_{total}
III 或 IV	100 kA	5kA	10kA	15kA	30kA	10kA	20kA

根据光伏电站采用防雷保护水平 LPLIII, 100kA (10/350 μ s), 直流电涌保护器选择电压限制型 SPD 或电压开关 SPD, Y 型保护模式, 可得出:

采用电压限制型 SPD: $I_1=I_2\geq 5kA$ (10/350 μ s) or 15kA (8/20 μ s); $I_3=I_{total}=I_1+I_2\geq 10kA$ (10/350 μ s) or 30kA (8/20 μ s)。

采用电压开关型 SPD: $I_1=I_2\geq 10kA$ (10/350 μ s)。

4.2.3 电涌保护器的最大持续工作电压 U_c

最大持续工作电压 U_c , 是指可持续加于电气系统电涌保护器保护模式的最大均方根电压或直流电压; 可持续加于电子系统电涌保护器端子上, 且不致引起电涌保护器传输特性减低的最大均方根电压或直流电压。最大持续工作电压的确定依据是根据系统标称工作电压 U_n 而确定, 一般情况下不超过 U_n 的 1.15 倍。除上述要求外, 还需要考虑当光伏系统参与并网时, 要满足电网并网的高电压穿越要求。如下:

- a)交流端口电压升高至 1.3 倍额定电压时, 光伏逆变器不脱网连续运行 0.5 s;
- b)交流端口电压升高至 1.25 倍额定电压时, 光伏逆变器不脱网连续运行 1 s;
- c)交流端口电压升高至 1.2 倍额定电压时, 光伏逆变器不脱网连续运行 10 s;
- d)交流端口电压高出电压轮廓线时, 光伏逆变器与电网断开。

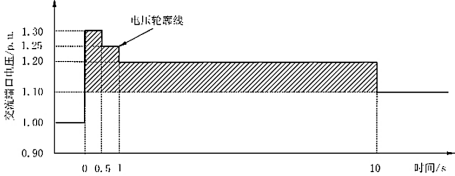


图 7 逆变器高电压穿越能力要求

4.2.4 电涌保护器的电压保护水平 U_p 要求

电压保护水平 U_p 表征电涌保护器限制接线端子间电压的性能参数。电压保护水平值应大于所测量的限制电压的最高值。

电压保护水平 U_p 应低于被保护设备的耐冲击电压额定值 U_w 。通常, 在没有明确给出数值时, 宜保持设备耐冲击电压额定值 U_w 与 U_p 之间至少 20% 的安全裕度, 即 $U_p\leq 0.8U_w$ 。

表 2 直接由电网电源供电的设备额定冲击耐受电压

供电系统 称电压 */V(三相 系统)	供电系统标称 电压*/V(单相 系统)	相对中性线交流 或直流标称电压 上限/V	设备额定冲击电压 U_w /kV			
			过电压类别I	过电压类别II	过电压类别III	过电压类别IV
230/400 277/480	—	300	1.5	2.5	4	6

400/690	—	600	2.5	4	6	8
1000	—	1000	4	6	8	12
—	$>1000\leq1250$	1250	4	6	8	12
—	$>1250\leq1500$	1500	6	8	10	15

4.3 集中式光伏电站雷电浪涌保护设计

4.3.1 无外部防雷装置的雷电浪涌防护

对于无外部防雷装置 LPS 的情况，位置①交流 SPD 选择 T1 试验等级，位置②的交流 SPD 选择 T2 试验等级，位置③和位置④直流 SPD 选择 T2 试验等级。

当位置①配电柜与位置②逆变器的交流侧之间距离 L_{ac} 小于 10m，或逆变器与配电柜同柜安装时，不需要安装位置①中电涌保护器。当位置③逆变器直流侧与位置④汇流箱之间距离 L_{pv} 小于 10m，或逆变器与配电柜同柜安装时，不需要安装位置中电涌保护器。

配电柜①宜使用 SD25T...L306 系列电压限制型交流电涌保护器，其试验等级为

T1+T2，冲击放电电流 I_{imp} (10/350 μ s) = 5.0~12.5kA，标称放电电流 I_n (8/20 μ s) = 25kA， $U_c=275\sim880V$ ，电压保护水平 $U_p\leq1.4\sim2.8kV$ ，保护模式采用“3+0”型。逆变器交流侧②宜使用 SD20R...L405 系列电压限制型交流电涌保护器，其试验等级为 T2，标称放电电流 I_n (8/20 μ s) = 20kA， $U_c=275\sim750V$ ，电压保护水平 $U_p\leq1.4\sim2.8kV$ ，保护模式采用“4+0”型。

逆变器直流侧③和汇流箱④宜使用 SD20R...L312PV 系列电压限制型直流电涌保护器，其试验等级为 T2，标称放电电流 I_n (8/20 μ s) = 20kA， $U_{cpv}=1000\sim1500VDC$ ，电压保护水平 $U_p\leq4.0\sim5.0kV$ ，保护模式采用“Y”型，即“DC+/DC-,DC+/PE,DC-/PE”。

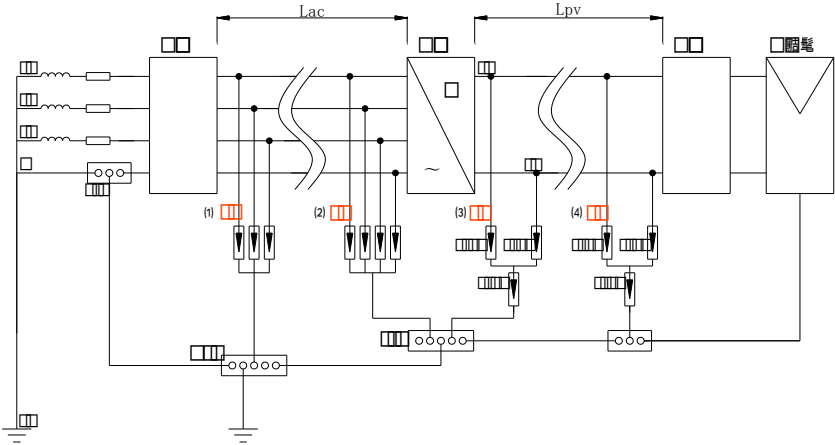


图 8 无外部防雷装置的电涌保护器设计

4.3.2 有外部防雷装置的雷电浪涌防护

(1) 光伏组件与外部防雷装置满足安全距离 s 要求的情况

对于有外部防雷装置 LPS 的情况，且光伏组件与外部防雷装置满足安全距离 s 要求的情况，例如有独立的外部防雷装置时，位置①交流 SPD 选择 T1 试验等级，位置②的

交流 SPD 选择 T2 试验等级，位置③和位置④直流 SPD 选择 T2 试验等级。

对于有外部防雷装置，且光伏组件和外部防雷装置满足安全距离要求的情况，电涌

保护器的设计、安装，与参数与上述的无外部防雷装置情况相同，这里不再赘述。

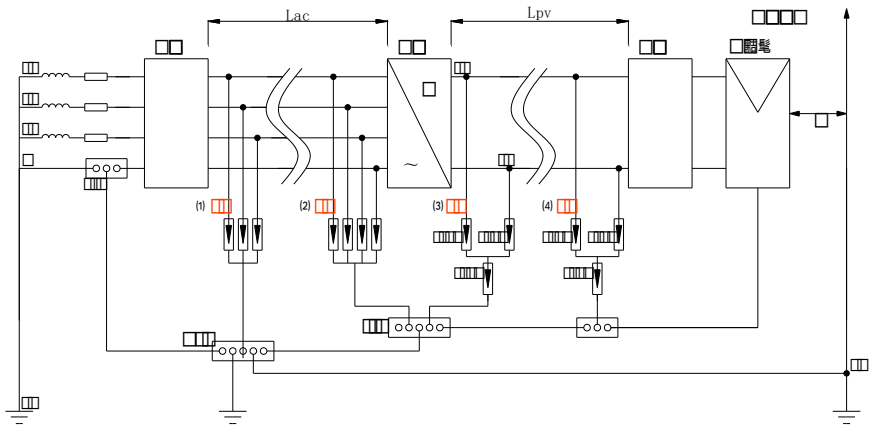


图 9 有外部防雷装置（光伏组件与外部防雷装置间距 s 满足要求）的电涌保护器设计

(2) 光伏组件与外部防雷装置不满足安全距离 s 要求的情况

对于有外部防雷装置 LPS 的情况，且光伏组件与外部防雷装置不满足安全距离 s 要求的情况，例如光伏组件与外部防雷装置进行等电位连接时，位置①②③④SPD 选择 T1 试验等级。

配电柜①宜使用 SD25T...L306 系列电压限制型交流电涌保护器，其试验等级为 T1+T2，冲击放电电流 I_{imp} (10/350 μ s) = 5.0~12.5kA，标称放电电流 I_n (8/20 μ s) = 25kA， $U_c=275\sim880V$ ，电压保护水平 $U_p\leq 1.4\sim2.8kV$ ，保护模式采用“3+0”型。逆

变器交流侧②宜使用 SD25T...L405 系列电压限制型交流电涌保护器，其试验等级为 T1+T2，冲击放电电流 I_{imp} (10/350 μ s) = 5.0~12.5kA，标称放电电流 I_n (8/20 μ s) = 25kA， $U_c=275\sim750V$ ，电压保护水平 $U_p\leq 1.4\sim2.8kV$ ，保护模式采用“4+0”型。

逆变器直流侧③和汇流箱④宜使用 SD25T...L312PV 系列电压限制型直流电涌保护器，冲击放电电流 I_{imp} (10/350 μ s) = 10.0~12.5kA，标称放电电流 I_n (8/20 μ s) = 25kA， $U_{cpv}=600\sim1500VDC$ ，电压保护水平 $U_p\leq 3.0\sim6.4kV$ ，保护模式采用“Y”型，即“DC+/DC-,DC+/PE,DC-/PE”。

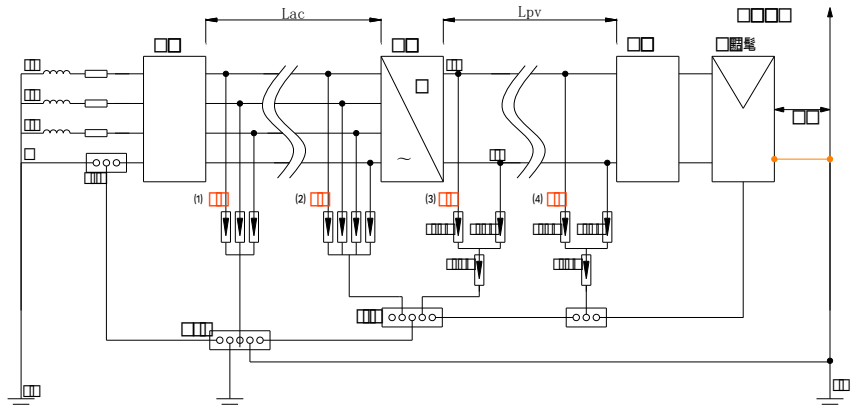


图 10 有外部防雷装置（光伏组件与外部防雷装置间距 s 不满足要求）的电涌保护器设计

5 小结

本文介绍了雷电对集中式光伏发电系统的危害与入侵途径，阐述了电涌保护器在光伏发电系统的设计原则和技术要求，并针对

三种不同的光伏发电系统场景进行了雷电浪涌防护设计。经过多年实际工程经验验证，上述雷电浪涌防护设计，可有效的降低雷电浪涌过电流和过电压水平，使整个系统安全可靠的运行。

参考文献

- [1]GB/T 16895.22-2022 低压电气装置 第 5-53 部分：电气设备的选择和安装 用于安全防护、隔离、通断、控制和监测的电器
- [2]GB/T 18802.11-2020 低压电涌保护器（SPD） 第 11 部分：低压配电系统的电涌保护器 性能要求和试验方法
- [3]GB/T 18802.31-2021 低压电涌保护器（SPD） 第 31 部分：用于光伏系统的电涌保护器 性能要求和试验方法
- [4]GB/T 18802.32-2021 低压电涌保护器（SPD） 第 32 部分：用于光伏系统的电涌保护器 选择和使用导则
- [5]GB/T 19964-2024 光伏电站接入电力系统技术规定
- [6]GB/T 21714.4-2015 雷电防护 第 4 部分：建筑物内电气和电子设备
- [7]GB/T 29319-2024 光伏发电系统接入配电网技术规定

作者简介

黄金鹏（1981 年 6 月），性别：男，籍贯：辽宁，职称：中级职称；职业经历：现任赛尔特电子股份有限公司 SPD 产品应用主管，曾就职于欧宝电气、金风科技、远景能源、西美雷电气和兴天通电讯科技等公司，长期从事雷电防护设计工作。

- [8]张毅龙，沈思远，杨冬阳，刘亚坤，风光储混合系统的雷电过电压仿真，高电压技术，2023 年 2 月 28 日，第 49 卷第 2 期
- [9]冯鹤，周爽，苗菊萍，屋顶光伏发电系统防雷设施经济有效性评价，防灾科技学院学报，2018 年 9 月，第 20 卷第 3 期
- [10]吕嘉奖，水上光伏发电系统雷电防护技术，中文科技期刊数据库（引文版）工程技术，2018 年 9 月 02 期
- [11]窦志鹏，杨仲江，刘健，光伏组件的雷电感应过电压和过电流计算，电瓷避雷器，2018 年 6 月，2017 年第 3 期（总第 277 期）
- [12]RAKOV V A,UMAN M A, lightning physics and effects[M]. Cambridge University Press,2003.
- [13]IEC TR 63227-2020 Lightning and surge voltage protection for photovoltaic (PV) power supply systems