DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.162 **中图分类号**：TM863 **文献标志码**：A

基于光伏电池瞬态模型的光伏阵列雷电感应过电压防护

孙新凤[1,2]，李梦媛[1,2]
(1.国网冀北电力有限公司技能培训中心，保定 071051；2.保定电力职业技术学院，保定 071051)

摘要：做好光伏阵列的雷电过电压防护对于确保其长期稳定运行十分重要，分析雷电感应过电压对光伏阵列的危害，考虑光伏电池瞬态模型和光伏组件间雷电过电压耦合特性，利用EMTP软件搭建光伏阵列仿真电路，计算独立接闪杆遭受雷击时逆变器端口、直流电缆与金属边框、旁路二极管处的浪涌过电压，分析不同雷电流波形作用下电涌保护器SPD(surge protection device)和瞬态抑制二极管TVS(transient voltage suppressor)的防护效果。分析结果表明：仅在逆变器端口安装1组SPD时，逆变器端口雷电感应过电压能够得到一定抑制，但直流电缆与金属边框电位差、旁路二极管过电压幅值仍然较高；在光伏组串两端均安装SPD后，逆变器和旁路二极管过电压、直流电缆与金属边框电位差均得到明显抑制。雷电感应过电压幅值受雷电流波头时间影响明显，雷电流波头时间越短，感应过电压幅值越高。当雷电流波头时间很短时，旁路二极管仍然存在发生永久击穿的风险。推荐在光伏组串两端均安装SPD，同时在旁路二极管两端并联1个TVS管，以实现可靠的光伏阵列雷电感应过电压防护。

关键词：光伏电池瞬态模型；光伏阵列；雷电感应过电压；旁路二极管；电涌保护器；瞬态抑制二极管

Lightning Induced Overvoltage Protection for PV Array Based on Transient Model of PV Cells

SUN Xinfeng[1,2], LI Mengyuan[1,2]
(1. Skills Training Center, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Baoding 071051, China; 2.Baoding Technical College of Electric Power, Baoding 071051, China)

Abstract: A proper lightning overvoltage protection for photovoltaic (PV) arrays is crucial to their long-term stable operation. The damage caused by lightning induced overvoltage to a PV array is analyzed. The equivalent circuit of the PV array is modelled in the EMTP with the consideration of transient models of PV cells as well as the lightning overvoltage coupling characteristics of PV modules. The values of surge overvoltage across the inverter port and bypass diode and the potential differences between a DC cable and a metallic frame are calculated when lightning stroke the isolated rod, and the protective effects of surge protection device (SPD) and transient voltage suppressor (TVS) under varying waveforms of lightning current are discussed. Results show that if SPDs are only installed at the port of an inverter, induced overvoltage across the inverter port can be suppressed to some extent while the large-amplitude overvoltage may occur across the bypass diode and potential differences may occur between the DC cable and the metallic frame. When SPDs are installed on both sides of the PV string, the overvoltage of all the equipment is significantly suppressed. The amplitude of lightning induced overvoltage is obviously affected by the wave front time of lightning current, and a short wave front time may result in an increase in the amplitude of induced overvoltage. However, a risk of permanent breakdown still exists for the bypass diode in the case of a very short wave front time. It is suggested that SPDs should be installed on both sides of the PV string while adding an extra TVS in parallel with the bypass diode, so as to realize reliable protection for PV array against lightning induced overvoltage.

Keywords: Transient model of photovoltaic (PV) cell; PV array; lightning induced overvoltage; bypass diode; surge protection device (SPD); transient voltage suppressor (TVS)

收稿日期：2022-09-19；**修回日期**：2022-11-28；**录用日期**：2022-12-09；**网络首发日期**：2023-06-29
基金项目：国家电网公司科技资助项目(520626180046)
This work is supported by State Grid Corporation of China under the grant 520626180046

光伏 PV(photovoltaic)发电因其绿色低碳、清洁无污染等优点，在全球得到广泛推广。据统计，2021 年我国累计光伏并网装机容量达到 308 GW，光伏发电量约占全国全年总发电量的 4.0%[1]。随着“碳达峰、碳中和”线路图明确，光伏发电应用占比必将得到进一步提升，预计国内“十四五”“十五五”期间光伏年均装机需求分别可达 72 GW 和 100 GW。光伏产业的蓬勃发展也面临着日益严重的雷电灾害威胁，为尽可能接收光能，光伏发电系统一般选址在开阔地带或地势较高的地点，其中不乏山坡、沿海等环境恶劣、地形复杂地区，雷电危害事故时有发生，造成电池板损坏、逆变器等设备损毁[2-3]，影响正常发电。

对于大型光伏电站的雷电防护，国内外学者通过试验[4-5]和仿真[6-7]等手段进行了大量研究，取得了诸多成果，汇总形成了较为成熟的防护标准规范[8]，尤其是在指导系统雷电直击防护方面。然而，对光伏阵列附近遭受雷电后，光伏阵列内部直流设备受感应过电压的危害及防护研究稍显不足，多采用近似公式[9-10]对感应过电压幅值进行估算，缺乏对光伏电池单元瞬态模型、光伏组件电缆与边框过电压耦合特性的分析。在电涌保护器 SPD(surge protection device)的布置安装等方面也无十分明确的规范，大多依靠工程经验选取[11-12]。此外，随着电子技术的不断发展，光伏阵列内各种电气电子设备越来越集成化、智能化，其电路抗浪涌能力较弱，数 kV 的浪涌过电压即可损毁旁路二极管等元件[13]，这就对光伏阵列的感应过电压防护提出了更高的要求，仅仅依靠经验选取无法满足精细防护。

本文基于光伏电池的瞬态模型，考虑直流电缆与边框过电压耦合特性，利用 EMTP 软件搭建光伏阵列仿真电路，分析雷击独立接闪杆时，光伏组件各部位雷电感应过电压；比较仅在逆变器端口安装 SPD 和在光伏组串两端均安装 SPD 对逆变器、直流电缆和旁路二极管的防护差异；讨论不同雷电流波形参数对 SPD 防护效果的影响；分析额外安装瞬态抑制二极管 TVS(transient voltage suppressor)的必要性和有效性，为光伏阵列雷电感应过电压防护提供一定参考。

1　光伏阵列雷电感应过电压

光伏阵列是光伏发电系统的核心组成部分，在目前较为常见的集中式发电结构[2]中，光伏组件通过串、并联构成光伏阵列，产生 1 个足够高的直流电压，经由并网逆变器将直流电转换为交流电，从而将能量输入电网。常见的光伏阵列接闪方式有独立接闪和非独立接闪 2 种：独立接闪方式设有独立接闪杆和泄流引下线；非独立接闪方式采用光伏方阵金属框架、金属夹件作接闪器或额外设置接闪短杆与金属框架相连。对于光伏阵列而言，雷电对其危害途径主要包括雷电直击、雷电感应和地电位反击 3 种[14]，采用独立接闪方式进行防护时，雷电直接击中光伏电池板或光伏阵列支架的概率相对较小，且独立接闪杆与光伏阵列电气设备保持一定安全距离，降低了发生地电位反击的概率。然而，独立接闪杆遭受雷击后，瞬变雷电流会产生强烈的电磁脉冲辐射，电缆感应产生暂态过电压可能会造成光伏逆变器、旁路二极管等光伏发电系统中的电气和电子设备故障，电缆电位迅速抬升还会对光伏电池板、金属边框造成反击，引起电弧和电缆绝缘故障，甚至造成电池板短路、开路。

典型的光伏阵列布局示意图及俯视图如图 1 所示，由 24 块光伏电池单元串联。光伏阵列采用独立接闪方式，设置独立接闪杆，光伏组件金属边框、组件钢结构支架和地网连成一体。

根据法拉第电磁感应定律，当独立接闪杆遭受雷击后，光伏电缆感应产生的雷电感应过电压可以表示为

$$U_{\mathrm{c}}=-\frac{\mathrm{d}\varphi_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{s}B\mathrm{d}S=-S_{\mathrm{c}}\sin\alpha\cdot -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_{s}B\mathrm{d}S \tag{1}$$

式中：φ_{c} 为通过电缆回路的磁通量；B 为雷击点附近水平磁场；S 为计算面积；S_{c} 为电缆环路面积；α 为光伏阵列倾角。

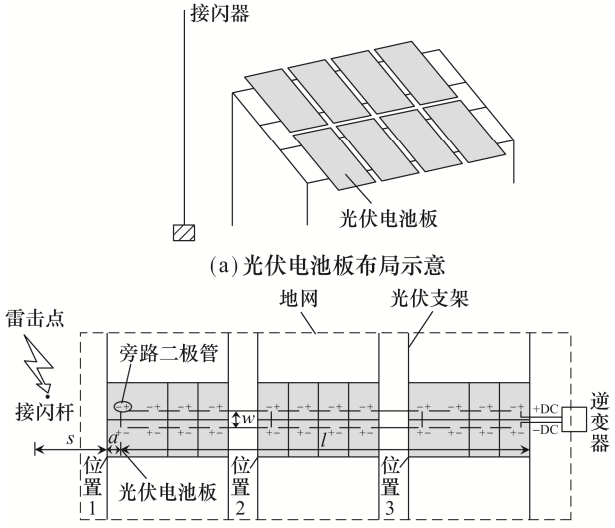


图 1 光伏阵列布局示意及系统俯视图

Fig. 1 Schematic of configuration of PV array, and top view of system

金属边框产生的雷电感应过电压可以表示为

$$U_{\mathrm{m}}=-\frac{\mathrm{d}\varphi_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{s}B\mathrm{d}S=-S_{\mathrm{m}}\sin\alpha\cdot\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_{s}B\mathrm{d}S \tag{2}$$

式中：φ_{m} 为通过金属边框回路的磁通量；S_{m} 为金属边框面积。

假定场点 $P(r, \Phi, z)$为柱坐标系中任意一点，当 P 点距离雷电回击通道很近时，可以忽略其周围磁场的辐射场项，P 点处的近区磁场一级近似表达式[15-16]为

$$B=\frac{\mu_0}{4\pi}\int_{-H}^{H}\frac{H}{R^3}i(0,t-R/c)\mathrm{d}z' \tag{3}$$

式中：μ_0 为磁导率；H 为雷云底部高度；R 为电流原点到场点的距离，$R=[(z-z')^2+r^2]^{1/2}$；$i(0, t)$为雷电回击通道底部电流函数；c 为光速；z' 为雷电回击通道某一点的纵向坐标。

2 仿真模型

2.1 光伏发电系统模型

直流情况下的单个光伏电池可视为 1 个 PN 结，雷电流作用下的光伏电池单元等效电路必须考虑其动态特性，电池 PN 结的电容效应不能忽视[17]。图 2 分别给出了光伏电池的直流模型和瞬态模型。

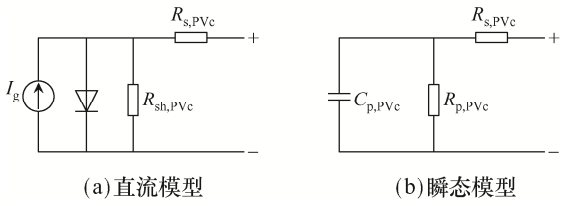


图 2 光伏电池直流模型和瞬态模型

Fig. 2 DC and transient models of PV cell

图 2(a)中：I_{g} 为光电流；$R_{\mathrm{s,PVc}}$ 和 $R_{\mathrm{sh,PVc}}$ 分别为光伏电池的串联电阻和并联电阻。由于光伏电池受光照产生的光电流数值远小于雷电流幅值，因此光伏电池的瞬态模型中忽略其影响。图 2(b)中：PN 结结电容代替了二极管，结电容 $C_{\mathrm{p,PVc}}$ 包括扩散电容和势垒电容，二极管动态电阻和 $R_{\mathrm{s,PVc}}$ 并联形成新的等效并联电阻 $R_{\mathrm{p,PVc}}$。

雷电流高频成分作用下，必须考虑逆变器的阻抗损耗和容性特征，逆变器暂态电路模型[18]如图 3 所示。

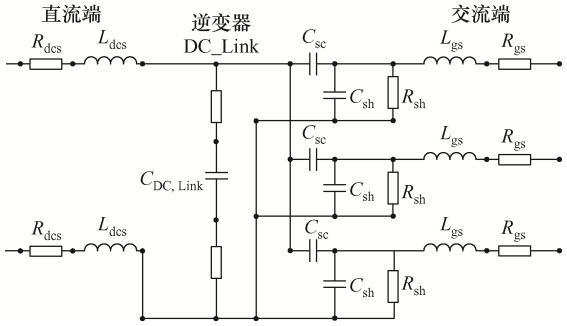


图 3 逆变器暂态电路模型

Fig. 3 Transient circuit model of inverter

图 3 中，逆变器直流侧和交流侧主要考虑电阻损耗和接线电感，直流侧电阻 R_{dcs} 和电感 L_{dcs} 分别取 0.1 Ω 和 1.0 μH，交流侧电阻 R_{gs} 和电感 L_{gs} 分别取 3.0 Ω 和 0.1 μH；忽略逆变器相间互电容，采用集中电容 $C_{\mathrm{DC,link}}$ 表征逆变器直流母线电容，取 2 400 μF。逆变器低压电路电子控制和驱动模块分别用分流电阻 R_{sh} 和对地电容 C_{sh} 表征，分别取 250.0 Ω 和 0.1 nF。此外，逆变器中还存在 IGBT 等半导体器件，其固有电容通过 C_{sc} 表征，取 1 nF。光伏组件相关电气参数见表 1。

表 1　光伏阵列电气参数

Tab. 1 Electrical parameters of PV array

部件	参数	数值
光伏电池单元	最大输出功率/W	3 000
	绝缘耐压/kV	≤5
	短路电流/A	8.87
	开路电压/V	37.2
金属边框	上层边框波阻抗/Ω	120
	下层边框波阻抗/Ω	350
	边框波速/(m·s^{-1})	3×10^{8}
直流电缆	标称截面/mm^2	4
	导体参考外径/mm	2.9
	电缆外径/mm	6.38
	直流电阻率/(Ω·m)	0.59×10^{-3}

为体现雷电流作用下的地网水平接地极的暂态传输特性，采用有损长线分布参数模型进行模拟。图 4 给出了接地极暂态电路模型[19-20]，图中：R_0、L_0、C_0、G_0分别为单位长度接地导体的电阻、电感、电容和电导；dx 为接地导体分段长度。具体电路模型参数根据相关公式求取。光伏阵列地网参数和土壤参数见表 2。

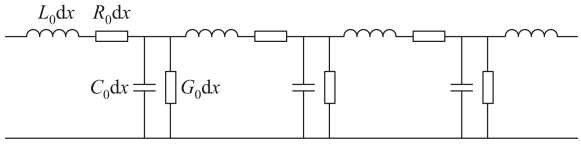


图 4　接地极暂态电路模型

Fig. 4 Transient circuit model of grounding electrode

表 2　光伏阵列地网参数和土壤参数

Tab. 2 Parameters of PV array grounding grid and soil

参数	数值
地网尺寸/m	15×5
水平接地极半径/m	0.01
土壤电阻率/(Ω·m)	100
地网埋深/m	0.6
接地极电阻率/(Ω·m)	1.72×10^{-8}
土壤相对介电常数	10

2.2　电缆与边框耦合模型

独立接闪杆遭受雷击后，感应过电压沿着金属边框和直流电缆传播，边框与并行直流电缆之间存在暂态电位差，导致二者之间电场变化产生容性耦合。除此之外，二者之间还存在感性耦合，电缆、边框中流动的雷电流在周围空间产生瞬变电磁场，导致穿过各自回路的磁通量发生变化，反过来又会影响二者电位。由于雷电流在金属边框中传播时呈现较为明显的波过程特征，因此采用多波阻抗模型对金属边框进行模拟[21]。考虑边框和电缆耦合特性后的光伏组件等效电路模型如图 5 所示。图中：C_c为光伏边框与光伏电池间的耦合电容；$C_{p,PVm}$为光伏电池并联电容；$R_{p,PVm}$为光伏电池并联连接电阻；$R_{s,PVm}$为光伏电池串联连接电阻。

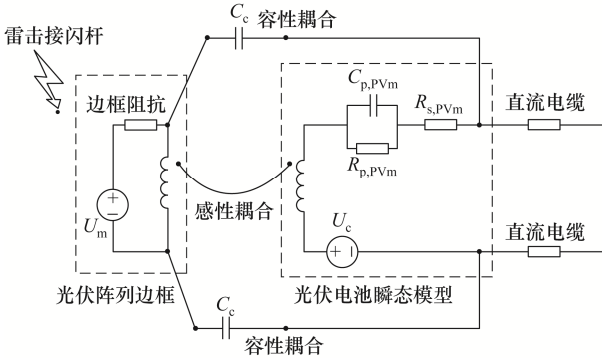


图 5　考虑组件耦合特性的等效电路模型

Fig. 5 Equivalent circuit model with consideration of coupling characteristics of modules

边框与电缆间的容性耦合系数和感性耦合系数计算示意如图 6 所示。图中：R_f和 h_f分别为边框的半径和高度；R_c和 h_c分别为电缆的半径和高度；d 为光伏边框与电缆的水平距离；D 为光伏边框与电缆中心的直线距离；D'为光伏边框镜像与电缆中心的直线距离。

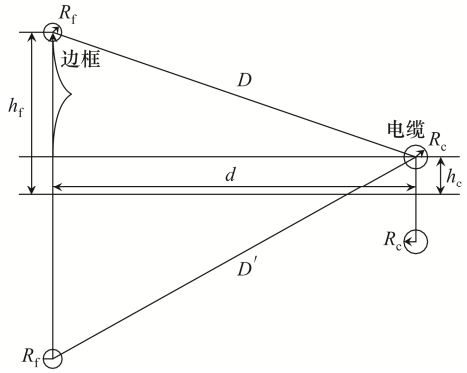


图 6　边框与电缆耦合系数计算示意

Fig. 6 Schematic of calculation of coupling coefficients between frame and cable

边框与电缆间的容性耦合系数可以通过镜像

法结合麦克斯韦静电方程求取[22]，即

$$\alpha_{11}=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{2h_{\mathrm{f}}}{R_{\mathrm{f}}}\right) \tag{4}$$

$$\alpha_{22}=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{h_{\mathrm{c}}+\sqrt{h_{\mathrm{c}}^2-R_{\mathrm{c}}^2}}{h_{\mathrm{c}}}\right) \tag{5}$$

$$\alpha_{12}=\alpha_{21}=\alpha=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{D}{D'}\right) \tag{6}$$

$$C_{\mathrm{c}}=\frac{\alpha}{\alpha_{11}\alpha_{22}-\alpha^2}\approx\frac{\alpha}{\alpha_{11}\alpha_{22}} \tag{7}$$

式中：ε_0为真空介电常量。

边框与电缆间的互感系数计算较为复杂，Peppas 等给出了简化电场强度水平分量有限积分过程后的近似公式[22]，即

$$L_{\mathrm{c}}=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left[\frac{R_{\mathrm{c}}(d-R_{\mathrm{c}})}{R_{\mathrm{f}}(d-R_{\mathrm{f}})}\right] \tag{8}$$

仿真中，雷云底部高度取 7.5 km，回击通道底部电流函数采用与实际观测结果较为相符的 Heidler 函数，具体波形参数采用 CIGRE 推荐值[23]，波前时间为 3.83 μs，半峰值时间为 77.50 μs，幅值为 31.1 kA。接闪短杆与光伏阵列间隔距离为 5 m，逆变器直流侧正、负电缆进线端各安装 1 组限压型 SPD，采用非线性电阻进行模拟，SPD 参考电压 $U_{1\,\mathrm{mA}}$= 620 V，10 kA 雷电流冲击下残压 U_{res}不超过 1.8 kV。

3 仿真结果分析

3.1 逆变器过电压

未安装 SPD 与安装 SPD 后，逆变器端口过电压波形如图 7 所示。

由图 7 可见，未安装 SPD 时，逆变器端口产生脉冲状过电压，幅值达 3.42 kV，超过了 IEC 标准给定的 II 类设备冲击耐受电压 2.50 kV，容易造成设备损坏。安装 SPD 后，逆变器端口过电压幅值得到显著抑制，未超过 500 V，因此在逆变器端口安装 SPD 防护是十分必要的。

3.2 直流电缆过电压

逆变器端口安装 SPD 后，直流电缆不同部位与金属边框电位差波形如图 8 所示。

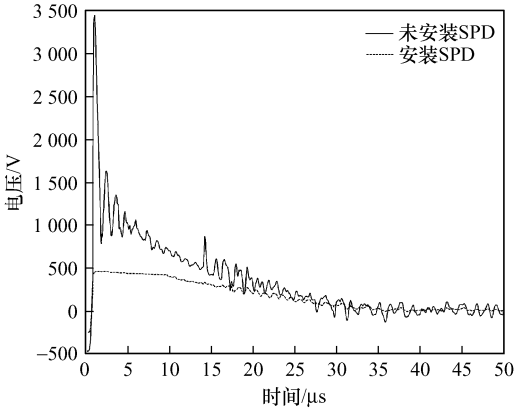


图 7 安装 SPD 前后逆变器端口过电压波形

Fig. 7 Overvoltage waveforms at inverter port before and after installing SPDs

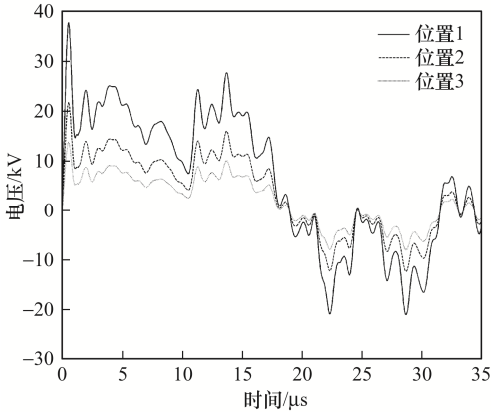


图 8 直流电缆与金属边框电位差波形

Fig. 8 Waveforms of potential between DC cable and metallic frame

由图 8 可见，光伏阵列遭受雷击后，直流电缆与金属边框间电位差呈明显衰减振荡特征，过电压幅值随着距雷击点距离的增加而减小。即使逆变器端口安装 SPD 后，直流电缆与金属边框电位差仍可达到数十 kV，而 PV1-f 型光伏电缆冲击耐受电压仅为 10 kV[24]，过高电位差极易造成电缆绝缘层击穿。

光伏组串两端均安装 1 组 SPD 后，直流电缆不同部位对金属边框电位差如图 9 所示。

由图 9 可见，当组串两端均安装 SPD 后，直流电缆与金属边框间电位差峰值得到大幅衰减，不同位置处过电压均未超过 3 kV，说明组串两端安装 SPD 对直流电缆进行防护是有效的。

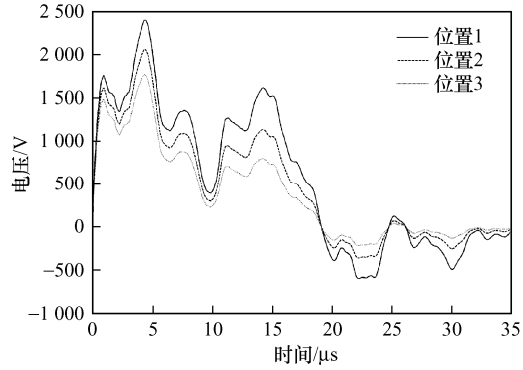


图 9　光伏组串两端均安装 SPD 后直流电缆对金属边框过电压波形

Fig. 9 Waveforms of overvoltage between DC cable and metallic frame when SPDs are installed on both sides of PV string

3.3 旁路二极管过电压

仅在逆变器直流侧安装 SPD 和在光伏组串两端均安装 SPD 后，旁路二极管两端电位差如图 10 所示。

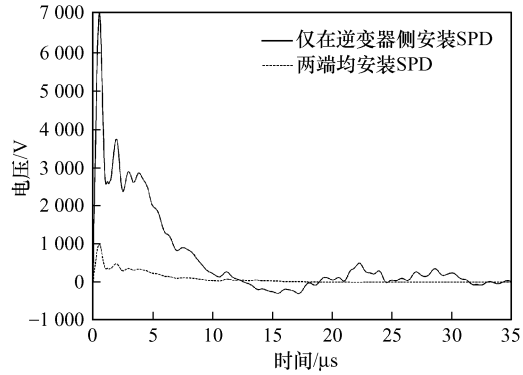


图 10　旁路二极管两端过电压

Fig. 10 Overvoltage across bypass diode

由图 10 可见，仅在逆变器端口安装 SPD 时，对旁路二极管的保护效果欠佳，旁路二极管两端过电压达到 7 kV。一般光伏阵列中旁路二极管反向重复峰值电压不超过 1 kV，当浪涌电压超过 2 kV 时，旁路二极管将会发生永久击穿[25]。当组串两端均安装 SPD 后，旁路二极管两端电压得到一定程度抑制，过电压未超过 1 kV。

3.4 外部因素影响

在自然界中，每次发生雷电过程其电流波形均不相同，因此仿真中额外采用几种较为典型的标准雷电流波形和非标准雷电流波形，标准雷电流波和非标准雷电流波的波形参数见表 3。

表 3　雷电流波形参数

Tab. 3 Waveform parameters of lightning current

雷电流波形		波前时间/μs	波尾时间/μs
标准雷电流波	8/20 μs	5.900	11.445
	10/350 μs	1.000	475.000
非标准雷电流波	0.7/60 μs	0.177	7.000
	2/70 μs	0.280	95.000

不同雷电流波形参数下，逆变器端口、直流电缆-金属边框、旁路二极管的过电压峰值见表 4。

表 4　不同雷电流波形参数下过电压幅值

Tab. 4 Amplitude of overvoltage under different waveform parameters of lightning current

SPD 安装情况	雷电流波形	过电压峰值/kV		
		逆变器端口	直流电缆-金属边框	旁路二极管
逆变器前端安装	8/20 μs	0.51	34.70	5.75
	10/350 μs	0.43	26.10	4.22
	0.7/60 μs	1.58	59.50	10.02
	2/70 μs	0.86	43.10	7.83
组串两端安装	8/20 μs	0.33	1.99	0.96
	10/350 μs	0.20	1.47	0.74
	0.7/60 μs	0.71	3.65	2.78
	2/70 μs	0.49	2.81	1.36

分析表 4 可以看出，雷电流波形对过电压幅值影响明显，波前时间越短，过电压幅值越高，这主要是由于越短波前时间导致雷电流高频成分越丰富。仅在逆变器前端安装 SPD 时，无法实现对直流电缆和旁路二极管的有效防护，而逆变器内低压电路控制模块等冲击耐受电压一般不超过 1 kV，0.7/60 μs 波形下逆变器端口过电压仍有可能超过 1 kV，这主要是由于直流电缆间电位差是正负极 2 条保护支路残压之差，仅在电缆正负极对地安装 SPD 缺乏额外的差模保护。当组串两端均安装 SPD 后，各部位过电压均得到明显降低，表明该防护措施是较为行之有效的。需要注意的是，0.7/60 μs 波形下旁路二极管过电压幅值仍然超过 2 kV，说明该防护措施对旁路二极管的保护仍存在一定缺陷。

3.5 TVS 管防护效果分析

旁路二极管的雪崩容量一般低于数十 mJ[25]，难以承受自然界中连续多次脉冲的雷电过程，为此可以通过增加串联旁路二极管数量实现对单个旁路二极管的分压或在旁路二极管两端并联 1 个 TVS 管，从而实现对旁路二极管的额外防护。考虑非理想特性的 TVS 管仿真电路模型[25-26]如图 11 所示。

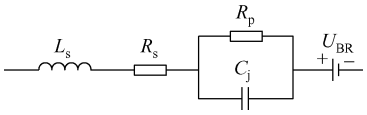


图 11 非理想 TVS 管暂态电路模型

Fig. 11 Transient circuit model of nonideal TVS

图 11 中：L_s 和 R_s 分别为 TVS 管的寄生电感和射频电阻；C_j 为 TVS 的结电容；U_{BR} 为击穿电压；R_p 为击穿电阻。

旁路二极管两端并联 TVS 管后两端电位差如图 12 所示。雷电流波形为 0.7/60 μs，幅值为 31.1 kA。TVS 管电路参数：L_s=4.6 nH、R_s=0.5 Ω、C_j=10^3 pF，U_{BR}=66.3 V。

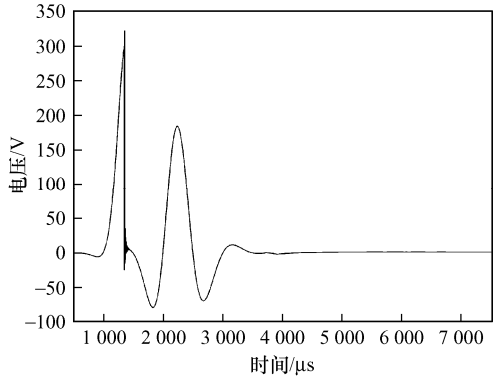


图 12 安装 TVS 管后旁路二极管过电压

Fig. 12 Overvoltage across bypass diode after installing TVS

由图 12 可见，旁路二极管两端并联 TVS 管后过电压幅值得到大幅抑制，由原来的 2.78 kV 降低至 0.32 kV，旁路二极管得到了充分保护。

4 结语

本文分析了采用独立接闪方式时雷击接闪杆产生的感应过电压对光伏阵列电缆及电气设备的危害，基于光伏电池瞬态模型在 EMTP 软件中搭建光伏阵列仿真电路，对逆变器、直流电缆和旁路二极管的雷电感应过电压防护进行了分析，对不同防雷器件的防护方式及效果进行了对比分析。仿真结果表明，在光伏组串两端均安装 SPD 能够有效保护逆变器和直流电缆，推荐在旁路二极管两端额外安装 TVS 管，为光伏阵列尽可能实现完善的雷电感应过电压防护提供一定理论指导。

参考文献：

[1] 魏景东, 赵增海, 郭雁珩, 等. 2021 年中国光伏发电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(10): 4-8.
Wei Jingdong, Zhao Zenghai, Guo Yanheng, et al. Development status and prospect of photovoltaic power generation in China in 2021 [J]. Water Power, 2022, 48(10): 4-8. (in Chinese)

[2] 潘启勇, 张磊. 基于模糊故障树的光伏并网微型逆变器故障识别方法研究[J]. 电源学报, 2022, 20(4): 179-186.
Pan Qiyong, Zhang Lei. Study on fault diagnosis method for photovoltaic grid-connected micro-inverter based on fuzzy fault tree [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(4): 179-186. (in Chinese)

[3] 王小宇, 刘波, 孙凯, 等. 光伏阵列故障诊断技术综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6526-6543.
Wang Xiaoyu, Liu Bo, Sun Kai, et al. A review of photovoltaic array fault diagnosis technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(20): 6526-6543. (in Chinese)

[4] Melaka U T M, Rahim N H A, Baharudin Z A, et al. Investigation of wave propagation to PV-solar panel due to induced overvoltage generated by lightning impulse generator [C]// Advanced Science and Technology Letters. 2013: 15-22.

[5] Jiang Taosha, Grzybowski S. Electrical degradation of photovoltaic modules caused by lightning induced voltage [C]// 2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Philadelphia, PA, USA, 2014: 107-110.

[6] 李辉, 陈江波, 尹晶, 等. 大型光伏发电站防雷研究[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 112-117.
Li Hui, Chen Jiangbo, Yin Jing, et al. Over-voltage

invasion wave simulation and lightning protection study of large-scale photovoltaic power generation stations [J]. Electric Power, 2014, 47(1): 112-117. (in Chinese)

[7] Méndez Y, Acosta I, Rodriguez J C, et al. Effects of the PV-generator's terminals connection to ground on electromagnetic transients caused by lightning in utility scale PV-plants [C]// 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril, Portugal, 2016: 1-8.

[8] Danish Standards. Protection against lightning - Part 1: General principles: DS/EN 62305-1: 2011 [S]. Copenhagen, Denmark: Danish Standards, 2011.

[9] 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[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 47-51.
Dou Zhipeng, Yang Zhongjiang, Liu Jian. Calculation of voltage and current induced by lightning electromagnetic fields in photovoltaic modules [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(3): 47-51. (in Chinese)

[10] Jia C, Zhao W, Gao Y, et al. Research on electromagnetic transient response of photovoltaic system when lightning strikes the earth [J]. IET Conference Proceedings, 2022, 2021(15): 1704-1708.

[11] 德和盛电气(上海)有限公司. 防雷指南[M]. 2 版. 上海: 上海印书馆, 2009.

[12] Birkl J, Zahlmann P. Specific requirements on SPDs installed on the DC-side of PV-generators [C]// 2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Cagliari, Italy, 2010: 1-13.

[13] Haeberlin H, Kaempfer M. Measurement of damages at bypass diodes by induced voltages and currents in PV modules caused by nearby lightning currents with standard waveform [C]// 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference. Valencia, Spain, 2007: 2934-2947.

[14] 杨磊, 谭涌波, 强玉华, 等. 太阳能光伏发电系统雷电灾害及防御分析[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 62-67.
Yang Lei, Tan Yongbo, Qiang Yuhua, et al. Analysis on lightning disasters of solar photovoltaic power generation system and prevention scheme [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 62-67. (in Chinese)

[15] 董毅, 张子建, 孟庆大, 等. 光伏阵列回路雷电感应过电压计算[J]. 电瓷避雷器, 2017(5): 145-148, 154.
Dong Yi, Zhang Zijian, Meng Qingda, et al. Calculation of lightning induced overvoltage in PV arrays [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(5): 145-148, 154. (in Chinese)

[16] 蔡力, 杜懿阳, 胡强, 等. 火箭引雷至架空线路与地面近距离磁场对比分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6798-6806.
Cai Li, Du Yiyang, Hu Qiang, et al. Comparative analysis of close magnetic field of rocket-triggered lightning striking the overhead line and the ground [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(24): 6798-6806. (in Chinese)

[17] 严由康, 肖文波, 周恒, 等. 太阳能电池伏安特性测试方法及其应用的评述[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 309-317.
Yan Youkang, Xiao Wenbo, Zhou Heng, et al. Current-voltage measurement methods for solar cells and their applications: A review [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 309-317. (in Chinese)

[18] Xue Jinhui, Yin Zhongdong, Wu Bingbing, et al. Design of PV array model based on EMTDC/PSCAD [C]// 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China, 2009: 1-5.

[19] 杨琳, 吴广宁, 田晓菲. 基于 EMTP 的水平接地体冲击时-频特性分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 194-198.
Yang Lin, Wu Guangning, Tian Xiaofei. Analysis of impulse characteristic grounding electrode in frequency and time domain based on EMTP [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 194-198. (in Chinese)

[20] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
He Jinliang, Zeng Rong. Grounding Technology of Power System [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

[21] 王耀武, 张小青, 陶世祺, 等. 光伏支架系统雷电暂态研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2788-2796.
Wang Yaowu, Zhang Xiaoqing, Tao Shiqi, et al. Lightning transient research of photovoltaic supporting structure [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2788-2796. (in Chinese)

[22] Peppas G D, Papagiannis M P, Koulouridis S, et al. Induced voltage on an above-ground natural gas/oilpipeline due to lightning strike on a transmission line [C]// 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China, 2014: 461-467.

[23] Rakov V A, Borghetti A, Bouquegneau C, et al. CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications [C]// 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA). Belo Horizonte, Brazil, 2013: 373-377.

[24] 中国电器工业协会. 光伏发电系统用电缆: CEEIA B218.1~.4-2012[S]. 北京: 中国电器工业协会, 2012.
China Electrical Equipment Industry Association. Cabled used in photovoltaic system: CEEIA B218.1~.4-2012 [S]. Beijing: China Electrical Equipment Industry Association, 2012. (in Chinses)

[25] 黎莫清, 周小武. TVS 器件特性参数分析及应用[J]. 现代电子技术, 2013, 36(16): 127-130.
Li Moqing, Zhou Xiaowu. Analysis and application of characteristic parameters for TVS device [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(16): 127-130. (in Chinese)

[26] 童瑞婷. 基于静电放电的 TVS 管过冲电压建模方法及应用[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
Tong Ruiting. Study on TVS overshooting voltage modeling method and application basing on the characteristics of ESD [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015. (in Chinese)



孙新凤

作者简介：

孙新凤(1981—)，女，通信作者，硕士，高级讲师。研究方向：电力新能源。E-mail：53964238@qq.com。

李梦媛(1993—)，女，硕士，讲师。研究方向：电力新能源营销。E-mail：1381770148@qq.com。

(责任编辑：耿越)