第 52 卷 第 4 期：1685-1695 高电压技术 Vol.52, No.4: 1685-1695
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250878

光伏拓扑对光储混合系统雷击过电压特征的影响分析

罗栋煌[1]，招隽键[1]，沈思远[1]，郝　伟[1]，庞全全[2]，刘亚坤[1]
（1. 上海交通大学电气工程学院电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240;
2. 北京大学材料科学与工程学院，北京 100871）

摘　要：光储混合系统的过电压问题是影响其安全运行因素之一，其中雷击过电压在混合系统中的暂态响应过程还不清楚。为此，建立光储混合系统(15 MW 光伏/5 MW 储能)雷击过电压暂态分析模型，依据实际工程拓扑结构，研究集中式、集散式、组串式 3 种光伏拓扑结构下混合系统的暂态响应特征，讨论雷电流波形、雷击位置对暂态响应过电压的影响，并开展不同拓扑结构的对比分析。结果表明，光伏拓扑结构明显影响雷击过电压传播路径和响应幅值，集散式拓扑受击子阵过电压响应峰值最高，为集中式的 1.2 倍，组串式的 1.18 倍；集中式拓扑中相邻支链平均过电压峰值最高，为组串式的 2.5 倍，集散式的 1.5 倍；混合系统中逆变器和储能接口处过电压在组串式拓扑下的响应幅值最大。研究结果可为光储混合系统雷电防护设计提供参考。
关键词：光储混合系统；雷击；过电压；光伏拓扑；暂态建模

Impact Analysis of Photovoltaic Topology on Lightning Overvoltage Characteristics in Photovoltaic-energy Storage Hybrid System

LUO Donghuang[1], ZHAO Junjian[1], SHEN Siyuan[1], HAO Wei[1], PANG Quanquan[2], LIU Yakun[1]
(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract：Overvoltage is one of the key factors impairing the safe operation of photovoltaic-energy storage hybrid systems,and the transient response to lightning overvoltage in hybrid system remains unclear yet. In this paper, a transient analysis model of lightning overvoltage for a photovoltaic-energy storage hybrid system (15 MW photovoltaic/5 MW energy storage) is developed based on practical engineering topologies. The transient response characteristics of the hybrid system under three photovoltaic topologies, namely, the centralized, the distributed, and string topologic structures, are investigated. The influences of lightning current waveforms and strike locations on transient overvoltages are analyzed, and comparative analyses among different topologies are conducted. Results indicate that the photovoltaic topology significantly affects the propagation paths and magnitudes of lightning-induced overvoltages. Specifically, the distributed topology experiences the highest peak overvoltage at the directly impacted sub-array, approximately 1.2 times that of the centralized topology and 1.18 times that of the string topology. In the centralized topology, adjacent branch arrays exhibit the highest average peak overvoltages, reaching approximately 2.5 times that of the string topology and 1.5 times that of the distributed topology. Furthermore, the inverter and energy storage interface experience the largest transient overvoltage magnitude under the string topology. These findings can provide valuable references for lightning protection design in photovoltaic-energy storage hybrid systems.
Key words：photovoltaic-energy storage hybrid system; lightning; overvoltage; photovoltaic topology; transient model

0　引言

光储混合系统是提高光伏发用电效能的有效技术途径之一，我国实现“碳达峰”和“碳中和”过程计划建设多个光储混合系统[1]。光储混合系统常建造于山区、屋顶等开阔无遮挡区域，具有较多的雷电侵入端口。然而，混合系统内部存在复杂的电气连接和耦合，各子系统及其设备的过电压耐受能力差异明显，在雷击等情况下易产生过电压问题，威胁混合系统安全[2]。

已有研究主要围绕单一光伏系统遭受雷击过程开展研究。文献[3]针对光伏系统中的直流线缆进行了等效暂态建模，细化了直流母线及其过电压保护装置，分析了雷击下光伏系统内部过电压强度的影响因素。文献[4]结合仿真与试验验证，进行了光伏组件的精细化暂态建模，主要围绕其安装框架系

统，讨论了光伏组件内部的雷击过电压分布。文献[5]建立了 3 种雷击场景，分析了光伏组件不同类型的接地网络建模对光伏系统雷击过电压分布的影响。然而，现有研究主要聚焦于单一光伏系统的雷击暂态或特定部件的建模(如直流线缆[3]、组件框架[4]、接地网络[5])。对于子系统间存在复杂电气耦合的光储混合系统，其雷击过电压暂态响应机制尚未明晰。

实际工程如昌江光伏电站雷击事故[6]、宁波光伏场雷击事故[7]等表明光伏拓扑结构会影响雷击过电压响应特征。对于光储混合系统，光伏拓扑的改变会直接改变光储混合系统的端口阻抗特征和内部电气混连特性。另一方面，逆变器、储能等对过电压敏感，混合系统暂态过电压分析方法还有待研究，不同拓扑结构下逆变器、储能等的响应过电压特征还不清楚，相比现有研究中对逆变器及储能变流器等建模的等效处理[8-9]，本文针对不同光伏拓扑结构的功率变换电路进行了差异化的暂态建模，考虑了直流链路电容、滤波电路及器件寄生参数的影响。此外，还考虑了光伏子阵内安装框架各导体的互耦关系及接地网络对光伏子阵中的雷击过电压暂态分布特征的影响。

为此，以光伏额定输出功率为 15 MW/储能额定功率为 5 MW 的光储混合系统为对象，依据实际工程拓扑结构，考虑各子系统在雷击暂态响应下的杂散阻抗特征与子系统间的电气耦合特性，建立光储混合系统雷击过电压暂态分析模型，研究集中式、集散式、组串式 3 种光伏拓扑结构下混合系统的暂态响应特征，讨论雷电流波形、雷击位置对暂态响应过电压的影响，并开展不同拓扑结构雷击过电压分布及响应的对比分析。

1 光储混合系统建模

基于设计光伏额定输出功率为 15 MW/储能额定功率为 5 MW 的光储混合系统[10]，搭建其对应的雷击过电压暂态分析电路模型，光储混合系统组成图如图 1 所示。其中，光伏发电子系统由 6 个 2.5 MW 的光伏阵列和对应的接地网络、逆变器、输电线缆等构成。每个光伏阵列由 25 个额定功率 100 kW 的光伏子阵以 5 串 5 并的结构组成。电池储能子系统中电化学电池储能单元采用二阶 RC 模型等效，由一个等效电压源 U_{oc}、欧姆内阻 R_0、电化学极化内阻 R_1、浓差极化内阻 R_2 以及电化学极化电容 C_1、浓差极化电容 C_2 组成，经由储能变流器、线缆通过 0.69/35 kV 升压变压器与架空线缆接入公共母线，35 kV 公共母线经 35/220 kV 升压变压器并网。

1.1 光伏子阵及电池储能子系统建模

在雷击暂态冲击情况下，首先对光伏子系统中光伏子阵进行等效建模，结合光伏子阵安装框架(以下简称框架)上的耦合关系，建立了包括发电单元、框架、接地网络的光伏子阵雷击过电压暂态分析模型，如图 1 所示。光伏子阵发电单元结构参数如表 1 所示。

进一步搭建光伏子阵框架及其接地装置的雷击暂态模型。其中光伏框架的物理结构如图 2(a)所示，依据框架的物理几何建立用以分析雷击暂态过电压的电位系数矩阵，并依此形成光伏安装系统安装框架的等效耦合电路，从而建立框架各杆间阻抗的互耦合关系。所建电位系数矩阵与框架导体杆的物理特征、相对位置以及介质特性等有关。其中框架前、后桩导体杆高度 L_1、L_2 分别为 0.25 m、0.60 m，主梁导体杆长度 L_3 为 1 m，各导体杆外径 R 为 0.010 36 m。组成框架的各导体杆外径相同，导体两两之间共存在两种相对位置，即倾斜和平行的情况，如图 2(b)所示[11]。

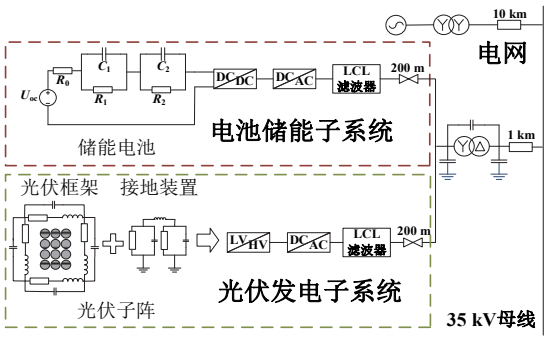


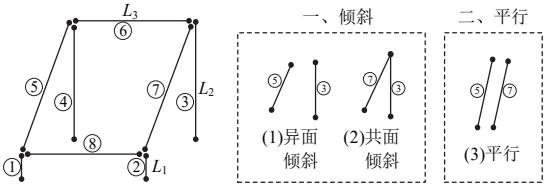
图 1 光伏额定输出功率为 15 MW/储能额定功率为 5 MW 的光储混合系统组成图

Fig.1 Composition of a PV-BESS hybrid system with a photovoltaic rated output power of 15 MW and energy storage rated power of 5 MW

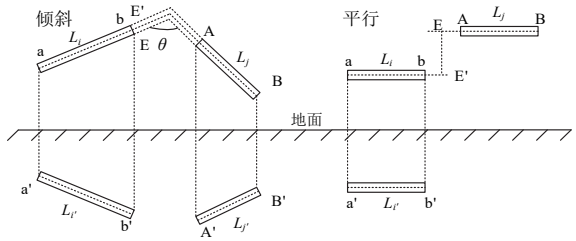
表 1 光伏子阵参数

Table 1 PV array parameters

光伏发电单元参数	数值
光伏电池模块串联数 N_{ms}	92
光伏电池模块并联数 N_{mp}	115
光伏电池单体串联数 N_{cs}	9
光伏电池单体并联数 N_{cp}	20



(a) 安装框架导体杆的物理结构及相对位置分类



(b) 导体杆的相对位置示意图

图 2 安装框架导体杆暂态参数的计算图示

Fig.2 Calculation diagram of transient parameters of mounting frame conductor

对任意导体杆 i(ab)和 j(AB)，互电位系数矩阵中各元素的计算过程如式(1)所示[4,12]。

$$P_{ij}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 L_i L_j}\left(\Lambda_{ij}-\Lambda_{i'j}\right) \tag{1}$$

式中：ε_0 为真空介电常数；i、j 表示第 i 根与第 j 根导体杆，L_i、L_j 为对应导体杆长度，m；P_{ij} 为对应的电位系数矩阵元素；Λ_{ij} 和 $\Lambda_{i'j}$ 为框架导体杆间静电耦合电势的二重积分表达式。

如图 2 所示，由不同导体的长度 L_n(n=1，2，3)、导体间的相对距离 D 与导体间的夹角 θ，可求出任意 i 和 j 的空间角度 δ，如式(2)所示，以及框架导体杆两两间相对位置为倾斜情况下的互电位系数矩阵，如式(3)所示。

$$\begin{aligned}\delta=&\arctan\left(\frac{D_1}{D_2\tan\theta}+\frac{(D_2+L_n)(R+L_n)\sin\theta}{D_1D_2}\right)-\\&\arctan\left(\frac{D_1}{D_3\tan\theta}+\frac{(R+L_n)R\sin\theta}{D_1D_3}\right)+\\&\arctan\left(\frac{D_1}{D_4\tan\theta}+\frac{R^2\sin\theta}{D_1D_4}\right)-\\&\arctan\left(\frac{D_1}{D_5\tan\theta}+\frac{(R+L_n)R\sin\theta}{D_1D_5}\right)\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\Lambda_{ij}=&(R+L_3)\ln\frac{D_2+D_3+L_n}{D_2+D_3-L_n}-R\ln\frac{D_4+D_5+L_n}{D_4+D_5-L_n}+\\&(R+L_n)\ln\frac{D_2+D_5+L_3}{D_2+D_5-L_3}-R\ln\frac{D_3+D_4+L_3}{D_3+D_4-L_3}-\frac{\delta D_1}{\sin\theta}\end{aligned} \tag{3}$$

式中：D_1、D_2、D_3、D_4、D_5、D_6、D_7 分别对应 EE'、EA、Ea、BA、Bb、Ba、AA、Ab，即导体杆间的相对距离。当 D_1=0 时，表示两导体杆为共面倾斜时；当 θ=π/2 时，P_{ij}=0，表示两导体杆相互垂直，且此时二者间的互感为 0。

当框架导体杆两两间相对位置为平行情况下互电位系数矩阵的计算如式(4)所示。

$$\begin{aligned}\Lambda_{ij}=&(2L_3+R)\operatorname{arsinh}\frac{2L_3+R}{D_3}-\sqrt{(2L_3+R)^2+D_8^2}+\\&R\operatorname{arsinh}\frac{R}{D_8}-\sqrt{D_8^2+R^2}-(L_3+R)\operatorname{arsinh}\frac{L_3+R}{D_8}+\\&\sqrt{(L_3+R)^2+D_8^2}-(L_3+R)\operatorname{arsinh}\frac{L_3+R}{D_8}+\\&\sqrt{(L_3+R)^2+D_8^2}\end{aligned} \tag{4}$$

式中：D_8 为导体杆间的垂直距离 Eb。导体杆的自电容和互电容矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中各元素 C_{ii}、C_{ij} 分别通过式(5)—(6)得出，电感矩阵 $\boldsymbol{L}$ 通过式(7)得出[13]。

$$C_{ii}=\sum_{i=1}^{n}P'_{ij},\quad j=1,2,3,\cdots,k,\cdots,n-1,n \tag{5}$$

$$C_{ij}=-P'_{ij},\quad j,k=1,2,3,\cdots,n-1,n,i\neq j \tag{6}$$

$$\boldsymbol{L}=\mu_0\varepsilon_0\boldsymbol{C}^{-1} \tag{7}$$

式中：μ_0 为真空磁导率；P'_{ij} 通过对电位系数矩阵求逆所得；$\boldsymbol{L}$ 为电感矩阵。框架导体的电阻值计算如式(8)所示[14]：

$$R_i=\frac{L_n\sqrt{\mu f_c}}{2r\sqrt{\pi\sigma_c}} \tag{8}$$

式中：μ 为导体的磁导率，H/m；σ_c 为导体杆的电导率，S/m；f_c 为上截止频率，Hz；L_n 为第 n 个导体杆的长度，m；r 为导体杆的半径，m。

进一步地，通过上述计算得到光伏子阵框架结构的等效建模参数，建立框架的暂态等效模型，如图 3 所示。

图中 R_{rn}、C_{rn}、L_{rn}(n=1,2,3,4)为框架中水平导体的等效阻抗；R_{ln}、C_{ln}、L_{ln}(n=1,2,3,4)为框架中倾斜导体的等效阻抗；R_{mn}、L_{mn}、C_{mn}(n=1,2,3,4)为导体间的等效耦合，接地系统采用水平接地体与垂直接地体复合构成[15]；R_h、C_h 为水平接地体的等效阻抗；R_v、C_v 为垂直接地体的等效阻抗。

电池储能单元的暂态模型通过锂离子电池的串、并联等效实现，该系统采用 215 个电池单体串联和 72 组电池并联以输出 690 V 的工作电压。电池储能单元通过储能变流器实现电池储能系统与电网之间的能量交换。储能变流器拓扑结构如图 4 所示，主要包括双向 DC/DC、DC/AC 以及 LCL 滤波电路。

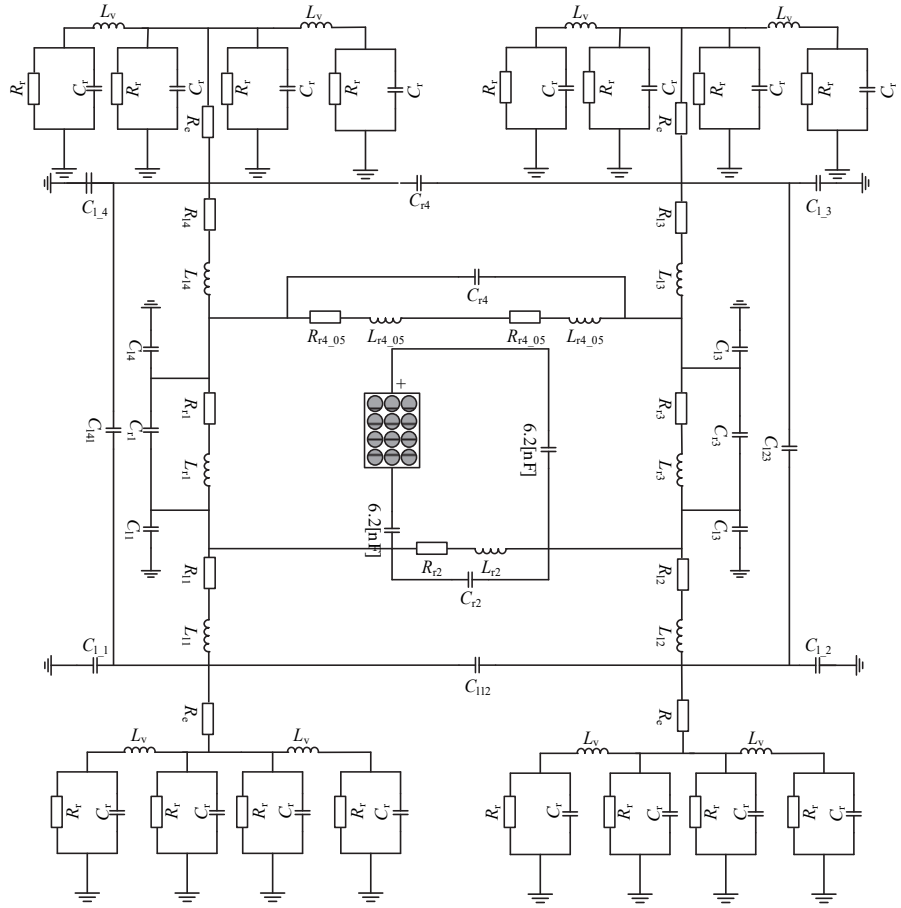


图 3 光伏子阵安装框架及其接地系统的暂态等效电路

Fig.3 Transient equivalent circuit of photovoltaic sub-array mounting frame

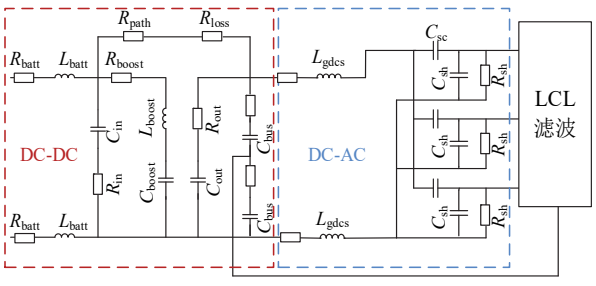


图 4 储能变流器暂态等效电路

Fig.4 Transient equivalent model of PCS

其中，R_{batt}、L_{batt} 表征储能电池的发热特性与寄生损耗；C_{in}、R_{in} 表征 DC/DC 变换器的输入主电感与主电容；C_{out}、R_{out} 表征 DC/DC 变换器的输出主电容及其寄生等效电阻；C_{bus} 表征半母线电容即直流链路电容；R_{sh}、C_{sh}、C_{sc} 为驱动电路中半导体设备的等效杂散阻抗[16]。

1.2 3 种光伏阵列拓扑建模

在光储混合系统的光伏发电子系统中，常用的光伏拓扑结构主要分为 3 种：集中式拓扑、组串式拓扑和集散式拓扑[17]。依据我国现行光伏发电系统设计规范 GB/T 32512—2016《光伏发电站防雷技术要求》[18]，参考象山长大涂滩涂集中式光伏发电项目、青海共和集散式光伏电站与安徽马钢分布式光伏电站等实际运行电站中的典型应用形式对光伏阵列拓扑进行建模[19]。

其中，一个 2.5 MW 的光伏阵列由 25 个额定功率为 100 kW 的光伏子阵列组成。本文统一采用 5 串×5 并的光伏子阵布局，每个光伏子阵间距取 5 m，每串支链阵列间距取 20 m。3 种光伏拓扑结构(集中式、集散式、组串式)如图 5 所示。1 号拓扑为集中式拓扑，每 5 个光伏子阵构成 1 组支链，直流侧经汇流箱后通过 100 m 电缆线路连接至集中式逆变器，储能单元经 PCS 的 AC 端直接与集中式逆变器的 AC 端并联，而后通过升压变压器并网。2 号拓扑为集散式拓扑，各光伏支链分别通过 DC/DC 变换器通过 100 m 电缆线路接入统一的直流母线，储

能单元通过双向 DC-DC 直接接入同一公共直流母线，再集中送入逆变器，所有子阵共享直流母线。3 号拓扑为组串式拓扑，由多个串联子阵分别集成 DC/DC+DC/AC 双级功率变换，各组串经 100 m 汇流线路独立并网，储能单元经 PCS 转换后汇入交流低压母线与光伏子系统并联后并网，形成高隔离度的模块化结构[20-22]。

进一步搭建光伏功率变换电路，针对不同的光伏阵列拓扑，建模主要包括 DC/DC、DC/AC 两部分结构。DC/DC 变换器可采用如图 6 所示的电路模型开展暂态分析[23-24]。

图中 R_{pv} 和 L_{pv} 分别表征 DC/DC 变换器与光伏模块间连接线的寄生电阻和寄生电感；C_{boost} 和 L_{boost} 表征滤波电容与电感；R_{sw_on} 与理想开关的串联支路表征 IGBT-二极管对开关换向损耗；与器件并联的 RC 支路 R_{sw_sh} 与 C_{sw_sh} 表征功率器件的换向速度；C_{gnd} 和 R_{gnd} 表征 DC/DC 变换器绝缘的电气模型，包括 IGBT 模块的铝散热器与地之间的寄生分流电容和分流电阻；R_{dc} 和 L_{dc} 分别表征 DC/DC 变换器输出端连接线的寄生电阻和寄生电感。

针对 DC/AC 逆变电路，依据我国现行光伏发电系统设计规范 GB50797—2012《光伏发电站设计标准》[9]中对逆变器容量匹配的原则，结合实际工程，不同拓扑结构下的光伏逆变器暂态建模过程主要考虑直流链路电容及滤波电路的响应特性[25]，分别取集中式、集散式、组串式 3 种拓扑下的直流链路电容为 2 400 nF、1 200 nF 及 480 nF[4,26]。滤波电路使用 LCL 滤波器兼有 LC 滤波器的低频段高效滤波和 L 滤波器高频分量衰减能力，将逆变器输出的交流电压滤波后送入电网，滤波器等效电路如图 7 所示。

2 仿真计算与讨论

在 PSCAD 中开展 3 种不同光伏发电系统拓扑下光储混合系统的雷电过电压计算。如图 8 所示，以横列 1—5 及纵列 A—E 表示光伏子阵在阵列中的位置，如 PV1-A 为阵列首端，PV5-E 为阵列末端。分别针对 3 种拓扑下典型位置(PV1-A、PV3-C、PV5-E)的光伏阵列框架输入雷电流，计算不同光伏系统拓扑结构中的过电压分布及峰值响应，进一步对比在相同拓扑结构下雷击不同光伏子阵位置所引发的过电压差异，分析 3 种光伏拓扑对雷电过电压的传播路径、影响范围及幅值特征的影响规律。

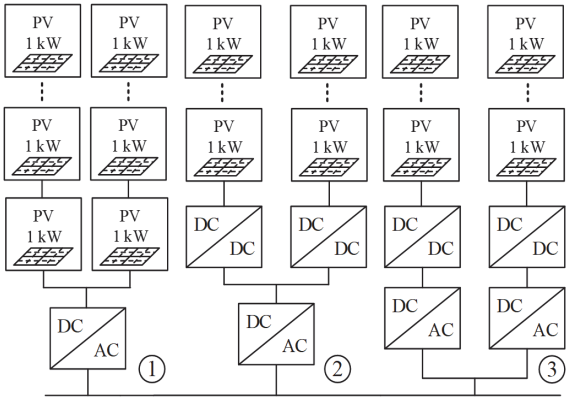


图 5 3 种光伏拓扑结构示意图

Fig.5 Schematic diagrams of three PV topology structures

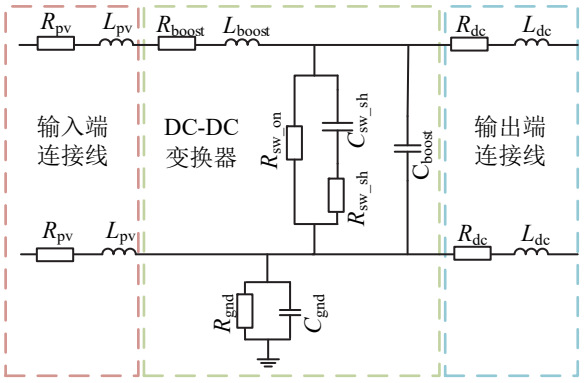


图 6 DC/DC 变换器暂态等效电路

Fig.6 Transient equivalent circuit of DC/DC converter

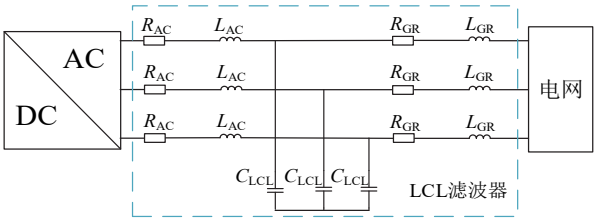


图 7 光伏滤波电路的暂态等效电路

Fig.7 Transient equivalent model of photovoltaic inverter circuit

2.1 雷电流波形对混合系统过电压响应影响

不同雷电流波形影响其电流变化率、频率特征及能量分布特性，可能影响混合系统中的过电压响应特性。光储混合系统中 3 种拓扑结构会改变其端口阻抗特性，进而也会因不同雷电流波形产生混合系统的响应变化。

结合实际工程分析，目前集中式拓扑占比约为 55.8%，在光伏并网工程中占主导地位。因此本节首先以集中式拓扑为例，分析混合系统在不同雷电

流下的暂态响应。依据 GB 50057—2010《建筑物防雷设计规范》标准，本文选用 1/200 μs 的负极性雷电流和 10/350 μs 的正极性雷电流进行仿真计算，两种雷电流的波形特征如图 9 所示。在 10 μs 时对集中式拓扑中的 PV1-A 分别输入幅值为 100 kA 的两种雷电流后，计算得受击子阵的雷电过电压响应如图 10 所示。

分析图 10 可知，输入波形为 10/350 μs 的模拟雷电流后，受击子阵在 40 μs 处达到暂态过电压峰值，达 31.3 kV。输入波形为 1/200 μs 的模拟雷电流后受击子阵在 12 μs 处达到峰值，产生的过电压峰值为 332 kV。相比得到，波形为 10/350 μs 的模拟雷电流比波形为 10/350 μs 情况产生的过电压峰值高 960%。进而，研究分析不同雷电流波形下混合系统不同节点过电压风险出现的时间，结果如图 11 所示。

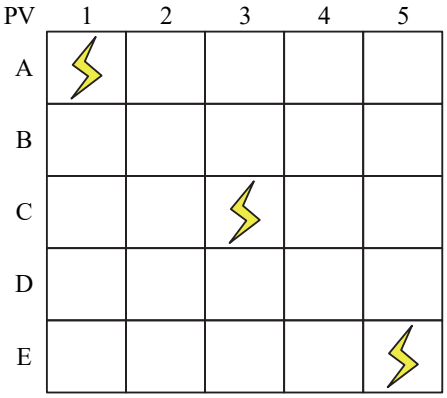


图 8 光伏阵列子阵排布及雷电流输入位置示意图

Fig.8 Schematic diagram of PV sub-array layout and lightning current injection locations

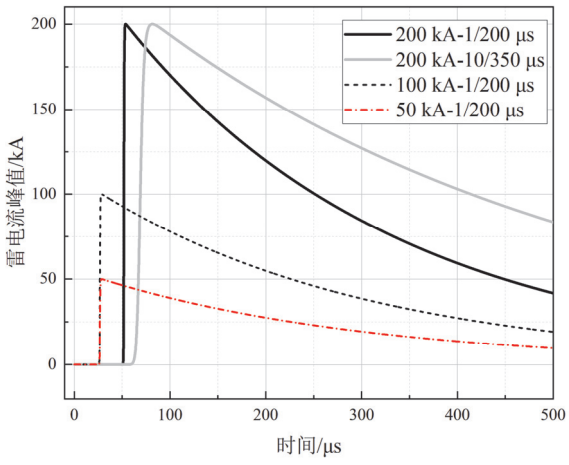


图 9 两种雷电流的波形特征

Fig.9 Waveform characteristics of the two lightning currents

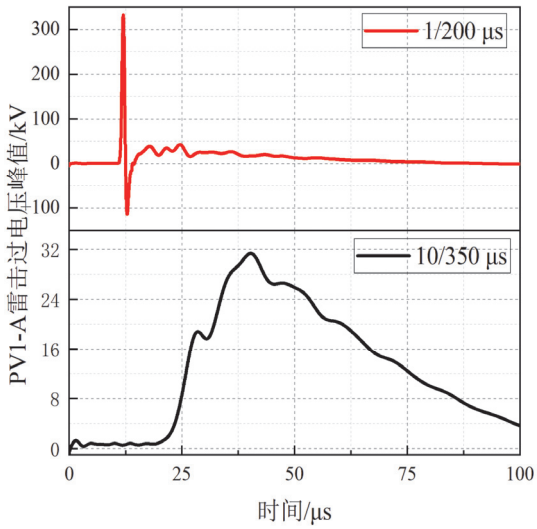
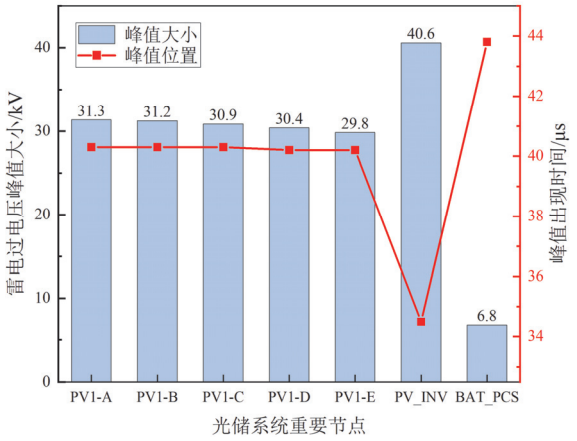
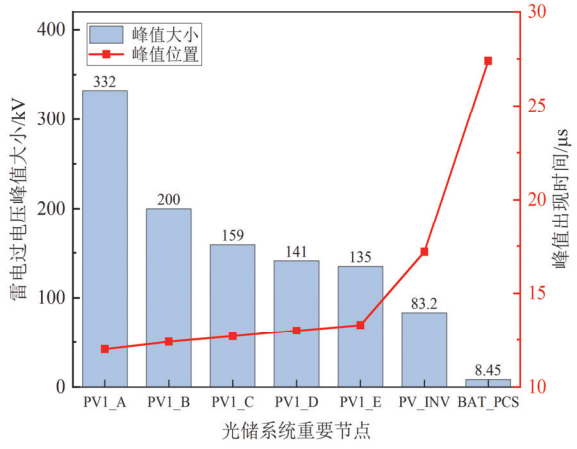


图 10 两种雷电流输入下受击子阵的雷电过电压响应

Fig.10 Overvoltage response of the struck sub-array under two lightning current waveforms



(a) 10/350 μs 输入时雷电过电压峰值及峰值出现时间



(b) 1/200 μs 输入时雷电过电压峰值及峰值出现时间

图 11 不同雷电流输入时混合系统不同节点的过电压响应

Fig.11 Overvoltage response of key nodes under varying lightning current waveforms

结合峰值分布从时间尺度分析系统其他位置的过电压响应情况，当输入波形为 10/350 μs 的模拟雷电流时，雷击支链上各子阵的电压峰值出现时间(图 11(a)折线)集中于 40 μs 附近，峰值大小整体呈现均匀分布的特征。储能 PCS 直流侧电压在约 44 μs 处达到峰值，产生的峰值约为 6.8 kV。但光伏逆变器直流侧的电压峰值出现在 34 μs 处，超前受击子阵 6 μs，并且峰值大小比受击子阵高 30%。

当输入波形为 1/200 μs 的模拟雷电流时，雷击支链上各子阵的电压峰值出现时间(图 11(b)折线)集中于 12~13 μs 间，平均峰值比 10/350 μs 输入下高 529%。并且系统整体峰值呈明显的快速传播与阶梯式峰值时序特征(子阵→逆变器→储能单元)。光伏逆变器直流侧的过电压峰值出现在约 17 μs，而储能 PCS 直流侧电压在约 27 μs 处达到峰值，滞后受击子阵约 15 μs。储能系统产生的过电压峰值较低，峰值滞后特征明显，这主要是受连接电缆分布参数及 PCS 内部滤波网络影响。

为分析不同雷电流波形对设备过电压峰值响应的影响，评估混合系统中功率变换设备的耐受阈值，本工作计算并对比了不同雷电流波形作用下逆变器直流侧的过电压峰值差异。表 2 为两种雷电流在不同幅值的输入下逆变器直流侧的过电压响应峰值的对比结果(数据来自文献[13])。

结合图 11 与表 2 可知，两种雷电流波形下混合系统的过电压响应差异明显。为此，分析了不同模拟雷电流波形的频率特征，由式(9)计算雷电流的频率范围，10/350 μs 雷电流中的频率成分 f_{main} 集中在 0.46~18.37 kHz 之间，1/200 μs 雷电流中的频率成分集中在 0.79~159.15 kHz 之间，计算得两种雷电流的在不同频段的能量分布对比如图 12 所示。进一步通过式(10)计算得逆变器直流侧端口等效阻抗 L_{eq} 与 C_{eq} 之间的谐振频率 f_0 约为 0.5 kHz。结合图 12 中 10/350 μs 雷电流中 0~1 kHz 的能量占主导地位分析，在雷击初始阶段部分的中低频能量通过逆变器支路耦合，并激发 LC 回路谐振，通过谐振中的电容电压的叠加效应，引起逆变器直流侧电压的快速上升。因此，在实际的工程应用中可以合理控制光伏阵列与逆变器之间的直流电缆长度，改变光伏直流电缆等效电感与逆变器直流链路电容路径之间的谐振频率，有助于降低雷击过电压响应峰值。

$$f_{\text{main}} \in \left[\frac{\beta}{2\pi}, \frac{\alpha}{2\pi}\right] \tag{9}$$

表 2 两种雷电流输入下逆变器直流侧过电压峰值

Table 2 Peak overvoltage at the inverter DC side under two lightning current inputs

雷电流波形/μs	雷电流幅值/kA	逆变器直流侧峰值电压/kV	
		本工作	现有研究[13]
1/200	10	11.86	9.40
	50	49.60	47.10
	100	91.26	90.50
10/350	10	5.36	5.50
	50	27.09	27.90
	100	50.40	48.70

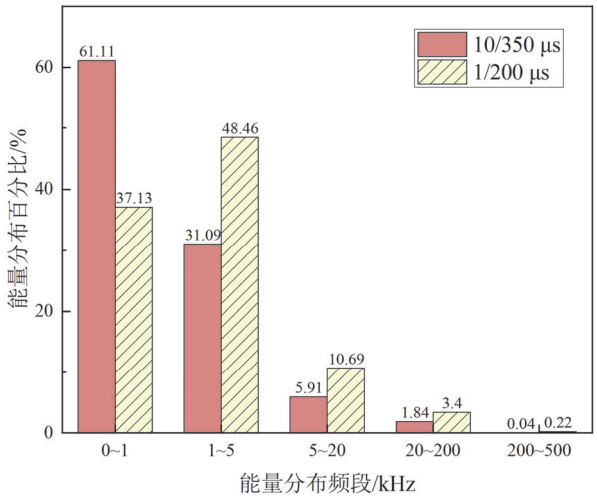


图 12 典型雷电流(10/350 μs 与 1/200 μs)在不同频段的能量分布对比

Fig.12 Energy distribution of typical lightning currents (10/350 μs and 1/200 μs) across frequency bands

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{eq}}C_{\text{eq}}}} \tag{10}$$

式中：β 为雷电流波头部分电流的上升速度；α 表征雷电流波尾部分电流的衰减速度；等效电感 L_{eq} 以光伏直流电缆电感 L_{line} 为主导，等效电容 C_{eq} 以逆变器直流链路电容 $C_{\text{dc_link}}$ 为主导。

进而，计算两种雷电流输入下各子阵的瞬态电压上升速率 dU/dt。以受击子阵为分析对象，波形为 1/200 μs 模拟雷电流输入下其 dU/dt 可达 137.6 kV/μs，而波形为 10/350 μs 模拟雷电流输入情况下的 dU/dt 仅有 1.20 kV/μs，约为前者的 0.9%。以其他子阵为分析对象，波形为 1/200 μs 输入下平均的 dU/dt 约为 20~30 kV/μs，波形为 10/350 μs 输入下平均的 dU/dt 约为 1~2 kV/μs。结合图 10 和图 12 可知，这是由于 1/200 μs 陡波雷电流具有极短的上升沿和更高的频率成分，造成该受击子阵的瞬态峰值响应显著增大。设计混合系统雷电防护时需在

标准设计雷电流波形基础上增加对陡前沿雷电波形响应和防护的考虑，额外配置高频抑制手段。

进一步地，选用幅值为 100 kA、波形为 1/200 μs 的雷电流进行不同拓扑结构的混合系统过电压响应计算分析。分别向 3 种拓扑结构下 1 号支链的 1 号光伏子阵(即 PV1-A)注入雷电流，计算得各子阵的雷击过电压峰值响应如图 13 所示。以受击支链为分析对象，雷击后集散式拓扑的受击子阵 PV1-A 上表现出最高的过电压峰值 385 kV，分别约为集中式和组串式的 120%和 118%。并且集散式拓扑下受击支链内各子阵(PV1-A~E)上产生的平均过电压也为 3 种拓扑中最高，分别约为集中式和组串式的 149%和 131%。以相邻支链的子阵为分析对象，计算得各子阵的雷击过电压峰值响应如图 14 所示。雷击后集中式拓扑各子阵的电压水平最高，平均过电压峰值为 96.7 kV，分别比集散式和组串式拓扑的平均过电压峰值高 50%和 150%。

对比 3 种拓扑下的过电压峰值分布特征，受击支链内的过电压峰值分布均呈现出从支链首端向末端逐渐降低的现象。其中，组串式拓扑的首末端过电压峰值的降幅最大，约为 60%。而不同拓扑间相邻支链的过电压峰值分布存在显著差异，集中式拓扑呈现出“两边高，中间低”的特征，集散式拓扑整体呈现出从支链首端向末端逐渐降低的现象，组串式拓扑支链内部的过电压变化并不明显。观察 3 种拓扑的过电压分布特征，在支链末端均出现了电压抬升的现象。

拓扑结构对过电压幅值的影响体现在各并网拓扑对雷击浪涌的阻抗和分流路径不同。结合拓扑结构分析可知，集中式拓扑支链间通过公共的直流母线连接，跨支链能量传递通道通畅。而集散式拓扑下每条支链末端配置了单级 DC/DC 变换器，提供了一定阻抗隔离效果，雷击浪涌跨支链传播强度较集中式减弱，整体电压水平低于集中式，但由于末端阻抗界面仍存在，导致相邻支链末端仍出现一定程度的能量反射和电压升高现象。组串式拓扑每个支链末端均配置了 DC/DC+DC/AC 双级功率变换器，各支链独立且无直流母线，并通过自身逆变器输出至交流母线，因此支链之间的电气隔离更强，跨支链浪涌传播较弱，使得相邻支链整体电压最低且分布均匀。

如表 3 所示，组串式拓扑中受击支链的光伏逆变器及储能子系统的交直流侧产生的过电压为 3 种

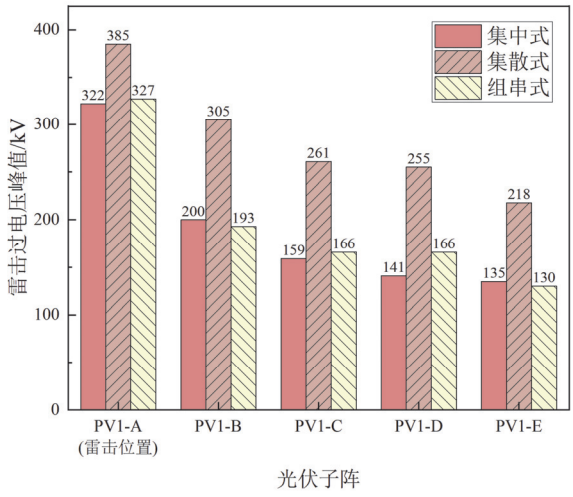


图 13 受击支链各子阵的过电压峰值

Fig.13 Overvoltage peak values of sub-arrays in the struck branch

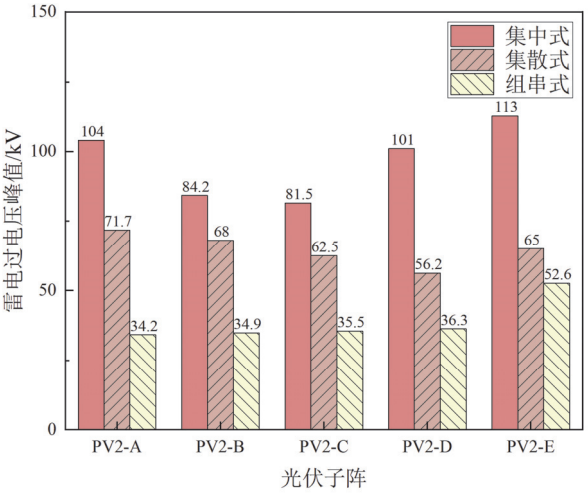


图 14 相邻支链各子阵的过电压峰值

Fig.14 Overvoltage peak values of Sub-arrays in the adjacent branch

表 3 3 种不同拓扑下系统过电压分布

Table 3 Overvoltage distribution in the system under three different topologies

位置	过电压峰值/kV		
	集中式	集散式	组串式
受击支链平均峰值	191.43	284.61	196.20
光伏逆变器直流侧	79.97	110.95	78.96
光伏逆变器交流侧	4.86	5.89	38.03
光伏逆变器 A 相桥臂	20.49	20.37	20.24
储能单元正极电压	9.52	10.56	27.95
储能变流器直流侧	9.75	11.61	28.04
储能变流器 A 相桥臂	1.05	2.03	28.46
储能变流器交流侧	5.05	5.92	52.06

拓扑中最高。其中储能 PCS 直流侧的过电分别约为集中式与集散式的 495%和 416%。这是由于组串式系统的直流链路电容相对更小，导致光伏逆变器及储能 PCS 的直流侧在雷电流冲击下会出现更高的瞬态过电压。

总结可知，组串式拓扑在限制系统范围浪涌扩散方面的效果更好，但其逆变器及储能接口处的局部防护压力更大，需在系统设计中予以重点考虑。

2.2 不同雷击位置下系统节点电压特性

为分析不同拓扑结构下雷击位置造成的雷击响应差异，假设混合系统中光伏阵列中各光伏子阵遭受雷击的概率相同。分别选取 PV1-A、PV3-C、PV5-E 3 个位置对应光伏阵列的首端、中端及末端。在不同位置输入幅值为 100 kA，波形为 1/200 μs 雷电流，计算并分析受击子阵及光储系统整体的电压响应分布。

由表 4 中可知，在集中式拓扑中，当光伏阵列中端遭受雷击时光储系统各部分产生的峰值最高，其中受击支链上的平均过电压分别比首、末端受击时高 17.9%和 35.6%。光伏逆变器直流侧电压峰值较首、末端受击时分别高 72%和 7.6%。储能变流器直流侧电压峰值较首、末端受击时分别高 1.8%和 6.7%。对比可知，集中式拓扑下光伏系统内部产生的过电压峰值远高于电池储能系统。集中式拓扑中可重点关注系统中部子阵的防雷设计，加强逆变器端口的功率器件的浪涌防护。

由表 4 中可知，在集散式拓扑中，当光伏阵列首端遭受雷击时光储系统各部分产生的峰值最高。其中受击支链上的平均过电压分别比中、末端受击时高 13.9%和 4.2%。对比可知，集散式拓扑下当光伏阵列末端遭受雷击时，系统内部其他节点的过电压峰值远低于首端及中端发生雷击所产生的峰值。由表 4 中可知，在组串式拓扑中，当系统末端遭受雷击时光储系统各部分产生的峰值最高，其中受击支链上的平均过电压分别比首、中端受击时高 40.4%和 14.5%。结合表 4 分析，组串式拓扑的功率变换环节的过电压峰值响应相比其他两种拓扑更剧烈，这是由于组串式拓扑的直流链路电容 C_{dc_link} 更小。而雷击位置的变化将改变浪涌在系统中的传播路径及阻抗特性，引起 3 种拓扑结构下过电压响应的分布特征存在一定差异。工程设计中应针对不同拓扑识别高风险区域，并据此优化防雷布局与绝缘配合策略。

表 4 不同雷击位置下系统过电压分布

Table 4 Overvoltage distribution in the system under different lightning strike locations

位置		过电压峰值/kV		
		受击子阵 PV1-A	受击子阵 PV3-C	受击子阵 PV5-E
集中式拓扑	受击子阵峰值	322.17	324.48	312.79
	受击支链平均峰值	191.43	225.69	166.43
	光伏逆变器直流侧	79.97	137.58	127.80
	光伏逆变器交流侧	4.86	5.88	5.48
	光伏逆变器 A 相桥臂	20.49	23.23	21.95
	储能单元正极电压	9.52	9.80	9.06
	储能变流器直流侧	9.75	9.93	9.30
	储能变流器 A 相桥臂	1.05	1.37	1.25
	储能变流器交流侧	5.05	6.19	5.77
集散式拓扑	受击子阵峰值	384.85	325.08	371.79
	受击支链平均峰值	284.61	249.96	273.05
	光伏逆变器直流侧	110.95	102.57	35.54
	光伏逆变器交流侧	5.89	5.50	4.28
	光伏逆变器 A 相桥臂	20.37	19.37	7.65
	储能单元正极电压	10.56	9.74	4.30
	储能变流器直流侧	11.61	11.11	4.36
	储能变流器 A 相桥臂	2.03	1.87	4.60
	储能变流器交流侧	5.92	5.61	3.31
组串式拓扑	受击子阵峰值	326.59	334.53	347.07
	受击支链平均峰值	196.20	240.43	275.38
	光伏逆变器直流侧	78.96	69.31	92.33
	光伏逆变器交流侧	38.03	43.25	45.72
	光伏逆变器 A 相桥臂	20.24	7.96	17.71
	储能单元正极电压	27.95	63.85	26.91
	储能变流器直流侧	28.04	60.34	27.14
	储能变流器 A 相桥臂	28.46	29.21	34.44
	储能变流器交流侧	52.06	65.07	68.43

3 结论

本研究围绕光储混合系统建立了精细化雷击过电压暂态模型，包括光伏子阵金属框架之间的互耦、电缆耦合以及储能单元阻抗特性，突出不同拓扑下各子系统功率变换环节的建模差异。并开展了集中式、集散式与组串式 3 种典型光伏拓扑下光储混合系统的雷击过电压暂态分析研究，得到结论如下：

1）陡波雷电流对组件绝缘冲击更严重，对混合系统的威胁更大。1/200 μs 陡波雷电流上升斜率快、频率成分高，产生的过电压峰值约为 10/350 μs 缓波雷电流的 9 倍。但 10/350 μs 缓波雷电流更容易激发系统谐振，导致局部位置过电压增大。应在规范基础上额外考虑陡波雷击的防护措施，如加装高频抑制装置。

2）不同光伏拓扑的雷电过电压分布特性及其跨支路传播特性响应存在显著差异。集散式拓扑下光伏阵列的过电压峰值最高；组串式拓扑在逆变器

和储能接口处的局部过电压响应最强，如储能变流器直流侧电压峰值约为集中式的 5 倍。集中式拓扑下混合系统各位置过电压幅值较小，但雷电浪涌可经公共直流母线耦合至其他支路，影响范围最广。

3）集中式拓扑在光伏阵列中部子阵遭雷击时系统响应最为剧烈；集散式拓扑在首端雷击工况下过电压最高；组串式拓扑在末端雷击时过电压最大。工程设计中应针对不同拓扑识别雷击的高风险区域，例如，集中式拓扑需重点防护逆变器直流母线及中部子阵，组串式拓扑则应加强分布式逆变器和储能接口的浪涌保护，并根据需要采用分段接地或独立避雷器配置来限制雷电波在系统中的传播。

参考文献 References

[1] 李庆民，于万水，赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3047-3060.
LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the “peak CO_2 emissions and carbon neutrality” policy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3047-3060.

[2] 杨大业，项祖涛，马世英，等. 新能源接入系统暂态过电压产生机理及主要影响因素[J]. 电力电容器与无功补偿，2022，43(3)：127-134.
YANG Daye, XIANG Zutao, MA Shiying, et al. Mechanism and main influencing factors of transient over-voltage in new energy access system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 127-134.

[3] ZHANG Y, CHEN H C, DU Y P. Lightning protection design of solar photovoltaic systems: methodology and guidelines[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 174: 105877.

[4] HETITA I, MANSOUR D E A, HAN Y, et al. Experimental and numerical analysis of transient overvoltages of PV systems when struck by lightning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 9005611.

[5] AHMAD N I, ALI Z, KADIR M Z A A, et al. Analysis of lightning-induced voltages effect with SPD placement for sustainable operation in hybrid solar PV-battery energy storage system[J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6889.

[6] 李 锋，周邦栋. 某山地光伏电站光伏组件防雷保护优化探索[J]. 广西电力，2020，43(1)：57-61.
LI Feng, ZHOU Bangdong. Exploration of lightning protection optimization of the photovoltaic modules in a mountainous region photovoltaic power station[J]. Guangxi Electric Power, 2020, 43(1): 57-61.

[7] 钟泰军，康 慨，李 慧. 大面积光伏旁路二极管击穿事故分析研究[J]. 太阳能，2018(12)：53-60.
ZHONG Taijun, KANG Kai, LI Hui. Analysis of large area PV bypass diode breakdown accident[J]. Solar Energy, 2018(12): 53-60.

[8] ZHANG J H, SUN Q Q, ZHENG Z, et al. Lightning surge analysis for hybrid wind turbine-photovoltaic-battery energy storage system[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 225: 109803.

[9] 张毅龙，沈思远，杨冬阳，等. 风光储混合系统的雷电过电压仿真[J]. 高电压技术，2023，49(2)：738-746.
ZHANG Yilong, SHEN Siyuan, YANG Dongyang, et al. Simulation of overvoltage in wind-photovoltaic-energy storage hybrid system induced by lightning stroke[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 738-746.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 光伏发电站设计标准：GB 50797—2012[S]. 北京：中国计划出版社，2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Code for design of photovoltaic power station: GB 50797—2012[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2012.

[11] 王耀武. 大型光伏阵列雷电暂态研究[D]. 北京：北京交通大学，2021.
WANG Yaowu. Research on lightning transients in large-scale photovoltaic arrays[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2021.

[12] 沈思远，刘亚坤，张毅龙. 三种风电机组拓扑下风光储混合系统的雷电过电压仿真分析[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4506-4515.
SHEN Siyuan, LIU Yakun, ZHANG Yilong. Analysis on lightning overvoltage in wind-photovoltaic-battery hybrid system with three topologies of wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4506-4515.

[13] KERMANI B, SHARIATINASAB R, KHORSHIDI M, et al. Risk analysis of the lightning-related transients on photovoltaic systems: application to a solar power plant without a lightning protection system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2025, 40(1): 618-629.

[14] WANG Y W, YAO X M, TAO S Q, et al. Study on lightning transient behavior of photovoltaic installations[J]. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2020, 9(2): 390-396.

[15] 王洪泽，杨 丹，王梦云. 电力系统接地技术手册[M]. 北京：中国电力出版社，2007.
WANG Hongze, YANG Dan, WANG Mengyun. Power system grounding technical manual[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2007.

[16] 刘星宇，徐少华，李相俊，等. 基于测试标准的大规模储能电站建模与仿真[J]. 电源技术，2021，45(2)：208-213.
LIU Xingyu, XU Shaohua, LI Xiangjun, et al. Equivalent modeling and simulation of large-scale energy storage power station based on test procedures[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(2): 208-213.

[17] CABRERA-TOBAR A, BULLICH-MASSAGUÉ E, ARAGÜÉS-PEÑALBA M, et al. Topologies for large scale photovoltaic power plants[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 309-319.

[18] 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. 光伏发电站防雷技术要求：GB/T 32512—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for protection of photovoltaic power station against lightning: GB/T 32512—2016[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2016.

[19] 李 念. 组串式及集中式逆变器方案比选及应用场景分析[J]. 山西建筑，2024，50(16)：92-95.
LI Nian. Comparison and application scenario analysis of string and centralized inverter schemes[J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(16): 92-95.

[20] 丁 坤，王 祥，徐俊伟，等. 常见光伏阵列拓扑结构分析[J]. 电网与清洁能源，2014，30(3)：114-118.
DING Kun, WANG Xiang, XU Junwei, et al. Topological analysis of common PV arrays[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(3): 114-118.

[21] BIRANE M, LARBES C, CHEKNANE A. Comparative study and performance evaluation of central and distributed topologies of photovoltaic system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(13): 8703-8711.

[22] 齐 磊，赵 巍，孙孝峰，等. 基于双重稳定约束的屋顶光伏逆变器分布式阻尼重构方案[J]. 高电压技术，2024，50(1)：394-405.
QI Lei, ZHAO Wei, SUN Xiaofeng, et al. Distributed damping reconstruction control scheme of rooftop photovoltaic inverters based on dual stability limitations[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 394-405.

[23] FORMISANO A, HERNÁNDEZ J C, PETRARCA C, et al. Modeling of PV module and DC/DC converter assembly for the analysis of induced transient response due to nearby lightning strike[J]. Electronics, 2021, 10(2): 120.

[24] CATALIOTTI A, CARA D D, MARSALA G, et al. High-frequency experimental characterization and modeling of six pack IGBTs power modules[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 6664-6673.

[25] KONG L, NIAN H. Transient modeling method for faulty DC microgrid considering control effect of DC/AC and DC/DC converters[J]. IEEE Access, 2020, 8: 150759-150772.

[26] 李玲玉. 分布式光伏发电并网微型逆变器研究[D]. 南京：东南大学，2016.
LI Lingyu. Research on distributed photovoltaic grid-connected micro inverter[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2016.



罗栋煌
2001—，男，硕士生
主要研究方向为雷电过电压分析和雷电防护
E-mail: 2609215095@sjtu.edu.cn

LUO Donghuang



刘亚坤(通信作者)
1992—，男，博士，副教授，博导
主要研究方向为雷电防护与高电压试验技术
E-mail: liuyakunhv@163.com

LIU Yakun
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2025-06-13 修回日期 2025-12-08 编辑 陈 蔓