第 49 卷 第 2 期：738-746　　高电压技术　　Vol.49, No.2: 738-746
2023 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211503

风光储混合系统的雷电过电压仿真

张毅龙，沈思远，杨冬阳，刘亚坤
（上海交通大学电气工程系电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240）

摘　要：风光储混合系统相比于单一风电场或光伏系统具有多端源载混合的特点，混合系统的端口阻抗网络及其雷电下暂态响应特性与单一系统存在差别。利用 PSCAD/EMTDC 搭建风光储混合系统的暂态模型，计算风光储混合系统的雷电过电压分布，分析混合系统遭受雷击位置、架空线长度和避雷器接地方式对混合系统过电压水平的影响。结果表明，混合系统中光伏侧遭受雷击时变压器的过电压峰值高于风机侧遭受雷击情况；增大风机侧接入母线的架空线长度或减小光伏侧的架空线长度均可降低混合系统的过电压；风机侧与光伏侧的变压器高压侧避雷器均采用公共接地方式，储能侧采用单独接地方式可有效抑制混合系统的雷电过电压水平。
关键词：雷击；PSCAD；风光储；混合系统；过电压；避雷器

Simulation of Overvoltage in Wind-photovoltaic-energy Storage Hybrid System Induced by Lightning Stroke

ZHANG Yilong, SHEN Siyuan, YANG Dongyang, LIU Yakun
(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract：Compared with a single wind farm or photovoltaic system, the wind- photovoltaic- energy storage hybrid system has the characteristics of multi-terminal source load mixing. The port impedance network and lightning transient response of the hybrid system are distinct from those of a single system. The PSCAD/EMTDC is used to build the transient model of the wind- photovoltaic-energy storage hybrid system. Then, the lightning overvoltage distribution of the hybrid system is calculated, and the effects of lightning location, overhead line length and arrester grounding mode on the overvoltage level of the hybrid system are analyzed. Results show that, in the hybrid system, the peak overvoltage of the transformer when the photovoltaic side is struck by lightning is higher than that when the wind turbine side is struck by lightning. The overvoltage of the hybrid system can be reduced by increasing the length of the overhead line connected to the bus from the wind turbine side and by decreasing the length from the photovoltaic side. It is suggested that the common grounding method is adopted in arresters at the high voltage side of the transformers at both the wind turbine and photovoltaic sides,and the separate grounding method is adopted to restrain the overvoltage at the energy storage side.
Key words：lightning strike; PSCAD; wind- photovoltaic- energy storage; hybrid system; overvoltage; arrester

0　引言

发展风光储混合系统是实现“碳达峰”、“碳中和”目标的必要技术手段[1]。兆瓦级风光储混合系统是由风电场、光伏发电系统以及配套的储能系统组成，混合系统中风机和光伏组件具有较大的雷电截收面积和较高的雷电入侵概率，实际运行数据也表明雷击是威胁风机或光伏系统安全的主要因素之一[2]。同时，混合系统中风电场、光伏系统、储能系统之间存在电气连接，相比于单一风电场或光伏系统，混合系统的端口阻抗网络发生改变，研究风光储混合系统的雷电暂态响应特征具有重要意义。

已有工作多集中在单一的风电机组或光伏发电系统方面。王晓辉等通过频域—时域混合法研究了雷击点及雷电流波形等对塔体雷电暂态响应的影响[3]。张波等通过矩量法和 Fourier 变换研究了不同叶片和塔筒总高度、不同土壤电阻率、不同接地装置尺寸和不同雷电流波形情况下，风机遭遇雷电流时叶片和塔筒对接地装置冲击接地特性的影响[4]。赵清江等研究了不同雷电流幅值、接地电阻和 SPD 保护模式对屋顶光伏发电系统中光伏阵列和逆变器过电压的影响[5]。然而，目前对于风光储混合系统的雷电过电压特性研究还较为缺乏。

基金资助项目：国家重点研发计划(2017YFC1501506)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2017YFC1501506).

开展风光储混合系统的雷电过电压仿真研究，需要建立基于变压器与输电线路连接下的风−光−储各系统及子系统间联合的电路模型。其中，风电侧风机叶片与塔体的电路建模应包含响应暂态过程的电感/电容特征，同时需考虑塔体与内部电缆之间的耦合过程；光伏侧的暂态建模需考虑光伏阵列与对应连接装置的雷电响应过程及光伏逆变器的暂态响应，子系统间的暂态建模需考虑连接线路(电缆或架空线)的频率相关特性和公共母线各端侧的电气连接。

为此，利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建风光储混合系统的暂态模型，计算不同雷电流侵入位置下风光储混合系统的暂态过电压，研究风电场和光伏系统接入母线的架空线长度对混合系统雷电过电压分布的影响，分析混合系统中避雷器接地方式对雷电过电压的抑制效果。研究结果可为风光储混合系统的雷电防护提供参考。

1 风光储混合系统建模

基于设计输出功率为 20 MW 的风光储混合系统，搭建该混合系统的暂态分析电路模型。所建模型由 15 MW 风电场、5 MW 光伏发电系统以及配套的电池储能系统组成，各子系统通过升压变压器和架空线连入公共母线，再通过变比为 35 kV/220 kV 的变压器实现并网，如图 1 所示。

其中，风电场系统由 10 个 1.5 MW 风电机组、变压器以及连接线路等构成，风电机组之间采用 500 m 架空线按链型结构连接。风机的具体参数见表 1[6]。光伏发电系统由 5 个 1 MW 光伏阵列、直流汇流箱、直流配电柜、并网逆变器、并网变压器以及连接电缆等构成[7]。电池储能系统由电池储能单元、储能变流器(power converter system, PCS)以及并网变压器等构成[8]。

1.1 雷电流建模

依据 IEC 61400-24 标准，采用幅值为 100 kA、波形为 10/350 μs 的电流模拟侵入风光储混合系统的首次正极性雷电流，其等效波形采用双指数函数模拟，表达式如式(1)所示[9]。

$$i(t)=KI_{\mathrm{m}}\left(\mathrm{e}^{-\alpha t}-\mathrm{e}^{-\beta t}\right) \tag{1}$$

式中：I_{m} 为雷电流幅值；K 为幅值修正系数；α为波头时间常数；β为波尾时间常数。

注入雷电流的电路模型如图 2 所示，其中雷电流通道波阻抗 Z_0 为 400 Ω[10]。

表 1 风机的具体参数

Table 1 Specific parameters of wind turbine

叶片		塔体			
长度/m	引下线半径/m	顶部半径/m	底部半径/m	高度/m	平均厚度/m
50	4.7×10^{-3}	3.52	4.8	70	4.6×10^{-2}

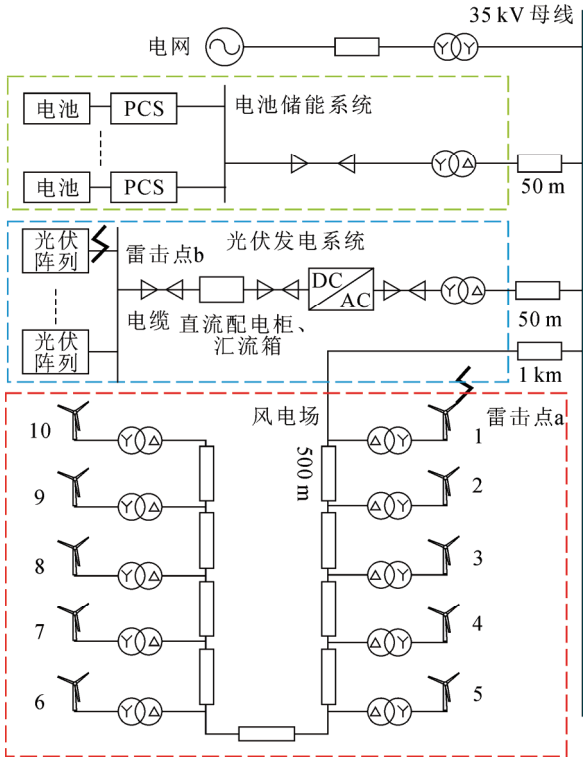


图 1 风光储混合系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of wind-photovoltaic-energy storage hybrid system

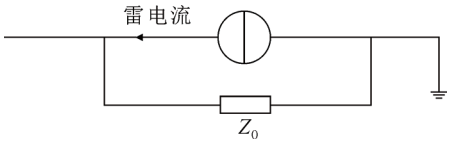


图 2 雷电流的电路等效模型

Fig.2 Circuit equivalent model of lightning current

1.2 风电机组建模

叶片是风机接闪频次最高的部位[11]，当其遭受雷击时，雷电流通过叶片内部引下线流经塔体，而后注入风电机组的接地装置；同时，雷电流会在风机内部三相电缆上感应产生过电压[12]。分析叶片遭受雷击后风机的暂态过程，需对叶片内部引下线、塔体、内部三相电缆和接地装置进行暂态建模。暂态建模中依据分段建模思想，各部位分段长度应满

足式(2)[13]。

$$\Delta l < 0.1c/f_{\mathrm{u}} \tag{2}$$

式中：c 为光速；f_{u} 是雷电流上限截止频率。在雷电暂态过程分析中，f_{u} 为~MHz 等级，因此将叶片等分为两段，塔体与内部三相电缆等分为 3 段。

对于叶片内部引下线的暂态建模，其可用 Π 型 RLC 电路表示，每段叶片内部引下线的等效电阻 R_{b} 依据式(3)计算得到，叶片内部引下线的电感 L_{b} 与电容 C_{b} 由平均电位法计算得到[14]。计算可得 R_{b}=0.243 Ω、L_{b}=41 μH、C_{b}=170 pF。

$$R_{\mathrm{b}} = \sqrt{\mu_{\mathrm{b}} f_{\mathrm{u}}}\, l_{\mathrm{b}} \Big/ \left(2r_{\mathrm{b}}\sqrt{\pi\sigma_{\mathrm{b}}}\right) \tag{3}$$

式中：μ_{b} 与 σ_{b} 分别为引下线的磁导率与电导率；r_{b} 为引下线半径；l_{b} 为每段叶片长度。

对于风机塔体的暂态建模，每段塔体可等效为圆柱壳，采用Γ型 RLC 等效电路表示，其等效电阻 R_{t} 由式(4)计算得到[13]。

$$R_{\mathrm{t}} = \left(1+\left(\sqrt{\frac{q}{2}}-1\right)\left(1-\frac{w}{r_{\mathrm{t}}}-\frac{8}{4\sqrt{2q}-5}\left(\frac{w}{r_{\mathrm{t}}}\right)^2\right)\right)R_{\mathrm{t0}} \tag{4}$$

式中：r_{t} 为塔体等效半径；$q=2\pi f_{\mathrm{u}}\mu_{\mathrm{t}}\sigma_{\mathrm{t}}w^2$，$\mu_{\mathrm{t}}$ 与 σ_{t} 分别是塔体的磁导率与电导率；w 是塔体平均厚度；R_{t0} 是塔体的直流电阻。

每段塔体的等效电感 L_{t} 与塔体对地总电容 C_{t} 由式(5)和(6)得到[15]。计算可得 R_{t}=5.6 mΩ、L_{t}=9.4 μH、C_{t}=1380 pF。

$$L_{\mathrm{t}} = \frac{\mu_0 h_{\mathrm{t}}}{2\pi}\left(\ln\frac{2h_{\mathrm{t}}}{r_{\mathrm{t}}}-1-\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\mu_0}\ln p\right) \tag{5}$$

$$C_{\mathrm{t}} = 2\pi\varepsilon_0 H \Big/ \ln\frac{H}{r_{\mathrm{t}}} \tag{6}$$

式(5)和(6)中：μ_0 为真空磁导率；h_{t} 为每段塔体高度；p 为与塔体内外半径之比有关的几何参数，取 0.99；ε_0 为真空介电常数；H 为塔体总高度。

风机内部三相电缆的结构与尺寸如图 3 所示，r_1 为芯线半径，r_2 为屏蔽层外半径，r_3 为铠装层外半径。对于每段电缆的等效电阻，由于铠装层电阻 R_1、屏蔽层电阻 R_2 和芯线电阻 R_3 会受到集肤效应的影响，因此可通过集肤效应电阻变化曲线进行估算[16]。对于每段电缆的等效电感，铠装层电感 L_1、屏蔽层电感 L_2 和芯线电感 L_3 由式(7)—(8)得到[17]。计算可得 R_1=862 mΩ、R_2=180 mΩ、R_3=193 mΩ、L_1=201 μH、$L_{2,3}$=7 μH。

$$L_{\mathrm{l}} = \frac{\mu_0 h_{\mathrm{t}}}{2\pi}\left(\ln\frac{2h_{\mathrm{t}}}{r_3}-1-\frac{\mu_{\mathrm{l}}}{\mu_0}\ln p_{\mathrm{l}}\right) \tag{7}$$

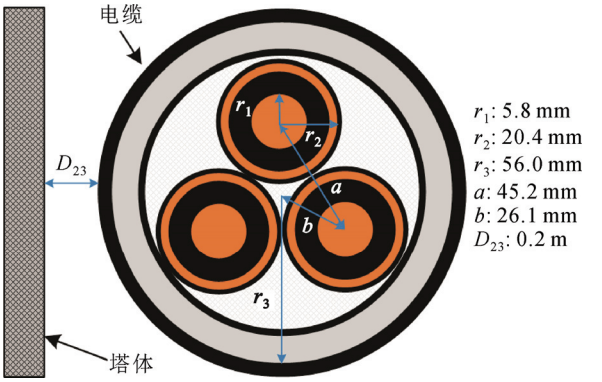


图 3 三相电缆截面图

Fig.3 Section diagram of three-phase cable

$$L_{2,3} = \frac{\mu_0 h_{\mathrm{t}}}{2\pi}\ln\frac{r_2}{0.7788 r_{\mathrm{l}}} \tag{8}$$

式(7)—(8)中 μ_{l} 为铠装层磁导率，取 $400\mu_0$。

对于塔体内部的分布电容，由于塔体的半径远大于电缆的外半径，可将塔体等效为一个平面。每段塔体和电缆间的分布电容 C_0，铠装层与屏蔽层间的分布电容 C_1，屏蔽层之间的分布电容 C_2，屏蔽层与芯线之间的分布电容 C_3 见式(9)—(12)[6,17]。计算可得 C_0=301 pF、C_1=4247 pF、C_2=3241 pF、C_3=2373 pF。

$$C_0 = 2\pi\varepsilon_0 h_{\mathrm{t}} \Big/ \operatorname{arcosh}\left(\frac{r_{\mathrm{t}}^2+r_3^2-{D_{23}}^2}{2r_{\mathrm{t}}r_3}\right) \tag{9}$$

$$C_1 = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r h_{\mathrm{t}} \Big/ \ln\left(m+\sqrt{m^2-1}\right) \tag{10}$$

$$C_2 = \pi\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{r}} h_{\mathrm{t}} \Big/ \ln\left(\frac{a+\sqrt{a^2-4r_2^2}}{2r_2}\right) \tag{11}$$

$$C_3 = 0.02413\varepsilon_{\mathrm{r}} h_{\mathrm{t}} \Big/ \lg\frac{r_2}{r_{\mathrm{l}}} \tag{12}$$

式(9)—(12)中：ε_{r} 为绝缘层的相对介电常数；$m=(r_2^2+r_3^2-b^2)/2r_2r_3$；$a$ 为两根芯线中心的距离。

对于接地装置，其通常为水平接地体与垂直接地体组成的接地网。在分析雷电暂态过程时，接地装置可采用接地电阻等效[18]。根据国家标准 GB/T 36490—2018，本文采用的接地电阻为 4 Ω。

综上，包括叶片、塔体、内部电缆以及接地装置等的风机暂态分析电路模型如图 4 所示。

1.3 光伏系统建模

在光伏系统中，光伏阵列具有铺设面积大、运行在开阔地区的特点，极易遭受雷击。当光伏阵列遭受雷击时，雷电流会经由光伏阵列进入光伏系统并通过电缆向并网逆变器等装置传播。

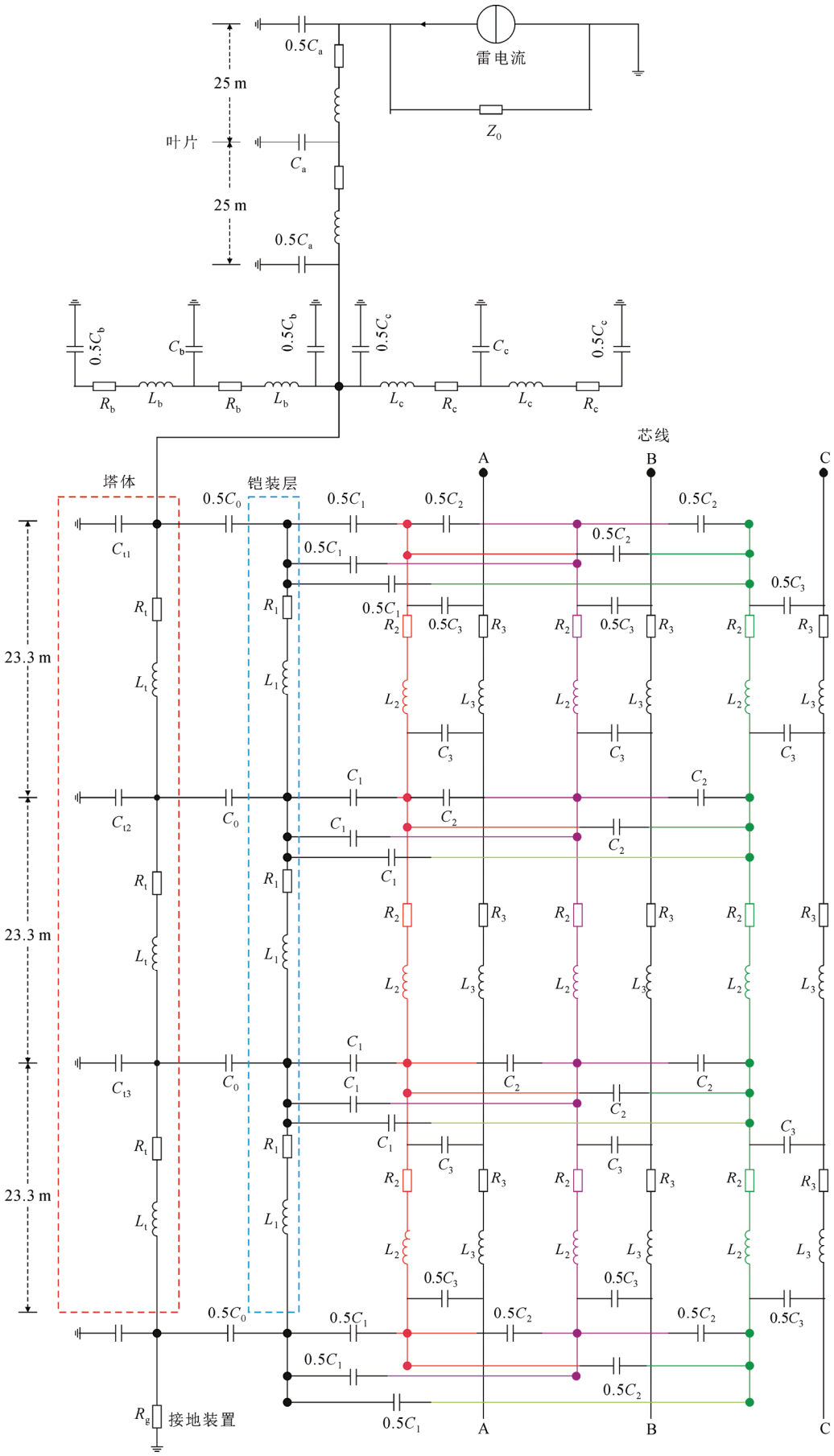


图 4　风机的暂态分析电路模型

Fig.4　Transient analysis circuit model of wind turbine

光伏阵列由多个光伏组件串、并联组成，其中光伏组件可采用基于单二极管的光伏电池等效电路进行建模[19]，该等效电路包括一个与二极管反并联的电流源，一个旁路电阻和一个串联电阻，其电路如图 5 所示。

对于逆变器，可采用如图 6 所示的电路模型开展暂态分析[20]。其中，电阻损耗 R_{dcs} 和线圈电感 L_{dcs} 表征逆变器直流侧的接线和端子特征；直流链路电容可简化为集总值 C_{DC_Link}；电阻损耗 R_{gs} 和线圈电感 L_{gs} 表征交流侧的接线和端子特征；分流电阻 R_{sh} 和对地分流电容 C_{sh} 代表低压电路的控制电路和驱动电路；电容 C_{sc} 代表半导体材料的固有电容。

对于连接电缆，通常使用 PV1−f 型专用电缆连接光伏阵列与直流汇流箱，使用 ZR−YJV22 型电缆连接直流汇流箱与并网逆变器。PV1−f 型和 ZR−YJV22 型电缆分别采用 PSCAD 软件中的同轴电缆与管道电缆模型，电缆埋深 1 m，土壤电阻率为 100 Ω·m。根据电缆横截面设置电缆的几何位置和导体/绝缘体参数，如表 2 所示。

对于并网变压器，其为低压侧星形连接、高压侧三角形连接的 35 kV 三相变压器。当变压器遭受雷电流冲击时，变压器绕组的对地电容与绕组间电容不可忽略。因此，变压器的暂态分析电路模型需考虑杂散电容参数[21]，如图 7 所示。

1.4 电池储能系统建模

电池储能系统多安装在室内，遭受雷电直击概率较低，因此研究不考虑其遭受雷电直击情况。电池储能系统的建模采用多组电池储能单元与 PCS 配对的方式，其中，电池储能单元通过 RC 电池模型建模[22]，如图 8 所示。该电路由电压源、内阻 R_i=0.1 Ω和 RC 网络组成，其中 RC 网络表征电池双电层和扩散电容（R_p=10 kΩ，C_p=1 F）。

储能 PCS 主要由逆变器与滤波器组成，其中，LCL 型滤波器可有效滤除高次谐波且在低开关频率下性能优异，替代了传统的 L 型滤波器[23]。图 9 为 PCS 的暂态电路，其中 R_{pcs}=0.05 Ω为 PCS 侧滤波电感 L_{pcs}(0.35 mH)的等效内阻，R_{gr}=0.05 Ω为电网侧滤波电感 L_{gr}(0.007 mH)的等效内阻，C_{LCL}=260 μF 为 LCL 型滤波器的电容。

1.5 架空线建模

风光储混合系统通过 35 kV 架空线并入母线，所采用的架空导线型号为 LGJ−240，架空地线型号为 GJ−35[24]。为考虑线路参数的频率依赖性，选用

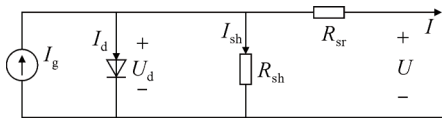


图 5 光伏电池的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of photovoltaic cell

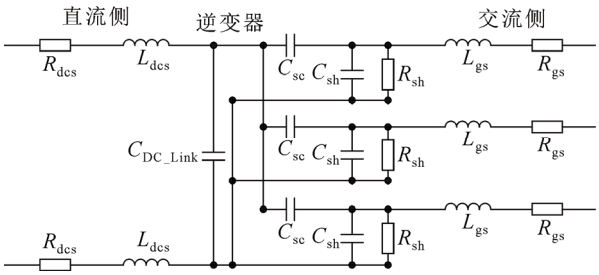


图 6 逆变器的等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of inverter

表 2 电缆参数

Table 2 Parameters of cables

电缆型号	标称截面/mm²	导体半径/mm	绝缘厚度/mm	护套厚度/mm	导体直流电阻/(Ω·km⁻¹)
PV1−f	4	1.13	0.52	1.4	≤5.09
ZR−YJV22	2×70	4.5	1.1	1.8	≤0.268

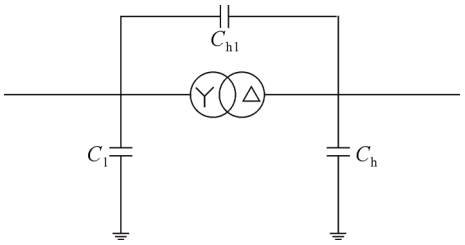


图 7 三相变压器的暂态模型

Fig.7 Transient model of three-phase transformer

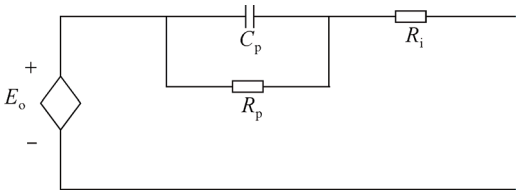


图 8 电池储能单元的等效电路

Fig.8 Equivalent circuit of battery energy storage unit

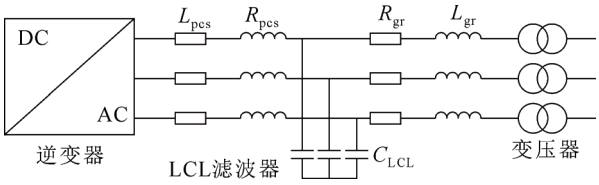


图 9 PCS 的暂态分析电路

Fig.9 Transient analysis circuit of PCS

PSCAD 中的频率相关模型。35 kV 架空线的结构如图 10 所示，其中 G1、G2 是两条架空地线，C1、C2、C3 是 3 条架空导线。

1.6 避雷器建模

风光储混合系统在低压侧位置安装有电涌保护器(surge protective device, SPD)，在高压侧位置安装有无间隙氧化锌避雷器(metal oxide arrester, MOA)。采用 PSCAD 设置的与可变电压源串联的非线性电阻器对 SPD 进行建模，该模型可直接输入 I-V 特性，支路电阻在整个工作区域内呈分段线性变化。采用 PINCETI 模型等效电路对避雷器进行建模[25]，如图 11 所示，其中 R=1 MΩ，L_0=0.634 μH，L_1=1.9 μH。

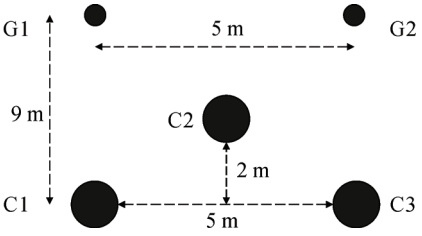


图 10 架空线结构

Fig.10 Structure of overhead lines

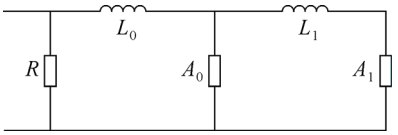


图 11 PINCETI 模型的等效电路

Fig.11 Equivalent circuit of PINCETI model

2 仿真与讨论

在 PSCAD 中搭建上述风光储混合系统的暂态分析电路模型，开展不同雷击位置下的混合系统雷电过电压计算，其中雷电流分别注入：(a)1 号风机叶片顶端和(b)光伏阵列出口，如图 1 所示。

2.1 不同雷击位置下混合系统的过电压

图 12—图 14 为雷电流侵入位置(a)和(b)时风光储混合系统的过电压波形。分析图 12 可知，当雷电流侵入位置(a)1 号风机叶片顶端时，风力发电机出口侧的过电压峰值达 122.63 kV，呈振荡衰减趋势；当雷电流侵入位置(b)光伏阵列出口时，光伏逆变器交流侧的过电压先增大至峰值 319.68 kV，后呈现逐渐减小的趋势。对比可知，光伏阵列遭受雷击后逆变器的过电压峰值相比于风机叶片遭受雷击后风力发电机出口侧过电压峰值高 161%。分析图 13—图 14 可知，当雷电流侵入位置(a)时，光伏逆变器交流侧和储能 PCS 电网侧的暂态电压峰值分别为 0.84 kV 和 1.16 kV；当雷电流侵入位置(b)时，风力发电机出口侧和储能 PCS 电网侧的暂态电压峰值分别为 0.16 kV 和 0.24 kV。当雷电侵入风光储混合系统时，风力发电机与光伏逆变器在雷电过电压作用下会发生绝缘破坏，但在变压器钳制电位与隔离保护作用下，未遭受雷电直击子系统过电压水平得到了限制。

进一步分析风光储混合系统中变压器的过电压分布情况，结果如表 3 所示。由表 3 可知，当雷电流分别侵入位置(a)和(b)时，未遭受雷电直击子系统的变压器低压侧过电压峰值均被限制在 260 V 以下，验证了变压器钳制电位的作用。当雷电流侵入位置(a)时，风机侧变压器高压侧的过电压峰值为 256 kV；当雷电流侵入位置(b)时，光伏侧变压器高压侧的过电压峰值为 335 kV，表明光伏侧变压器需耐受更高的过电压水平。因此，风光储混合系统运行中应重点关注光伏系统变压器的绝缘状态。

表 3 变压器过电压分布

Table 3 Overvoltage distribution of transformer

雷电流侵入位置	变压器所在系统	峰值过电压/kV	
		低压侧	高压侧
(a)	1 号风电机组	84.94	256.01
	光伏发电系统	0.25	39.53
	电池储能系统	0.26	40.37
(b)	1 号风电机组	0.16	20.85
	光伏发电系统	5.99	335.22
	电池储能系统	0.03	26.70

在风光储混合系统暂态电路的建模中，具有多端源载混合特点的风−光−储电路连接的阻抗特征与单一风电场或光伏系统的端口阻抗特征明显不同，为分析风光储混合系统与单一系统在雷击情况下的过电压差别，进行了与已有研究中单一系统雷电过电压的对比。表 4 为风光储混合系统中的风机与单一风电机组中的风机（数据来自文献[6]和[26]）在 100 kA 雷电流侵入情况下过电压分布的对比结果。

由表 4 可知，风光储混合系统的风机塔体顶端峰值电位与单一风电机组情况相近，而底端峰值电位约为单一风电机组的一半，这是由于风光储混合系统中因变压器与风机公共接地导致接地电阻减半。同时，对于风光储混合系统和单一风电机组，系统中芯线的过电压均随接地电阻的减小而减小，

表 4 风机过电压分布

Table 4 Overvoltage distribution of wind turbine

系统	接地电阻/Ω	塔体峰值电位/kV		芯线峰值电位/kV	
		顶端	底端	顶端	底端
单一系统[6]	0.3	2000	30	1.5	0.3
混合系统	0.3	2021	15	36.6	34.3
单一系统[26]	10	2000	1000	25.5	20.8
	5	1920	500	20	11
	1	1900	100	15	3
混合系统	10	2060	522	738	648
	5	2041	259	397	346
	1	2024	51	93	82

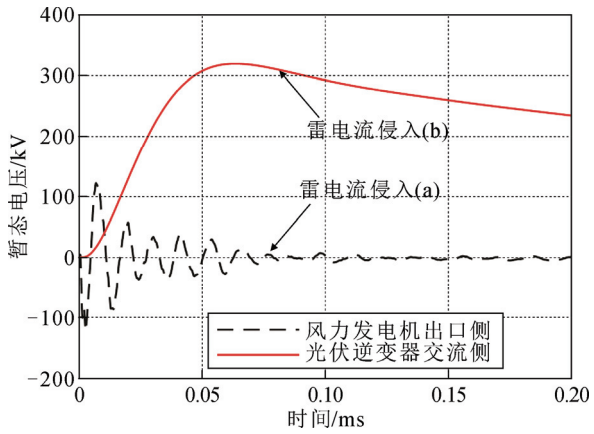


图 12 雷电侵入位置(a)时风力发电机和侵入位置(b)时光伏逆变器的过电压

Fig.12 Overvoltage of wind turbine generator at lightning intrusion position (a) and overvoltage of photovoltaic inverter at lightning intrusion position (b)

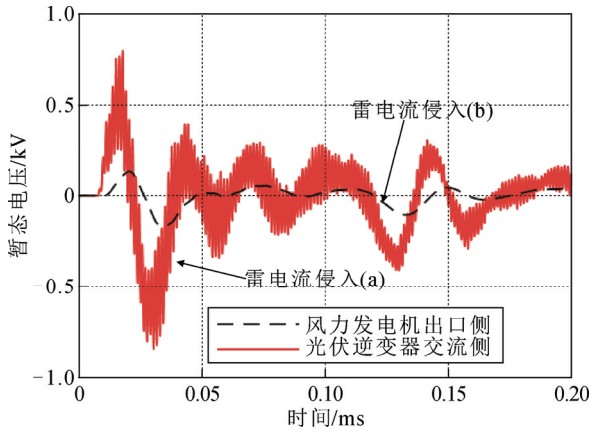


图 13 雷电侵入位置(a)时光伏逆变器和侵入位置(b)时风力发电机的过电压

Fig.13 Overvoltage of photovoltaic inverter at lightning intrusion position (a) and overvoltage of wind turbine generator at lightning intrusion position (b)

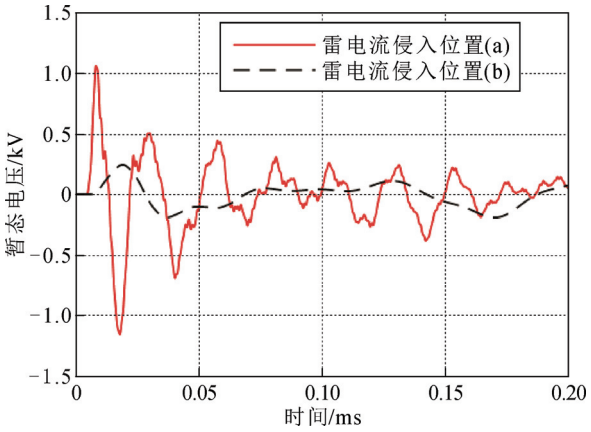


图 14 雷电侵入位置(a)和(b)时储能 PCS 电网侧暂态电压

Fig.14 Grid side transient voltage of PCS in energy storage system at lightning intrusion locations (a) and (b)

但混合系统中芯线的过电压水平远高于单一风电机组情况，这是由于混合系统中内部电缆底端与变压器连接，导致芯线的过电压水平相比于单一风电机组情况增大。

2.2 架空线长度影响

在风光储混合系统中，风机侧接入母线和光伏侧接入母线的架空线长度会受各子系统的布置方式发生变化，因此研究分析了不同架空线长度对混合系统过电压响应的影响。

当雷电流分别侵入位置(a)和(b)时，对应改变风电场与光伏发电系统连入母线的架空线长度，得到不同架空线长度下的仿真结果如图 15 所示。结果表明，随着风电场连入母线的架空线长度的增加，混合系统变压器高压侧的过电压逐渐减小。其中，当架空线长度由 250 m 增加至 1 km 时，光伏与储能系统的变压器高压侧暂态电压峰值分别减小了 16%和 37%；由 1 km 继续增加至 2 km 时，光伏与储能系统的变压器高压侧过电压峰值分别减小了 17%和 5%。

当光伏系统接入母线的架空线长度由 250 m 增加至 2 km 时，混合系统中变压器高压侧的暂态电压均有不同程度的增加。其中，光伏系统中变压器高压侧的暂态电压增加了 6%，储能系统中变压器高压侧的暂态电压增加了 16%，风电机组中变压器高压侧的暂态电压增加了 10%。因此，增大风机侧接入母线的架空线长度和减小光伏侧接入母线的架空线长度均有助于降低混合系统中变压器高压侧的过电压水平。

2.3 避雷器接地方式影响

变压器低压侧所装 SPD 通常采用与中性点公共接地方式，但高压侧的避雷器通常有单独接地和公共接地两种方式。不同接地方式对混合系统过电压的影响尚不清楚，因此，有必要研究不同避雷器接地方式下混合系统的过电压水平。

计算得到不同避雷器接地方式下混合系统中变压器的过电压水平如图 16 所示，分析可知，避雷器均采用单独接地方式时，当雷电流侵入位置(a)时，风电机组、光伏系统以及储能系统的变压器高压侧暂态电压峰值分别为公共接地方式下的 195%、26%和 29%；当雷电流侵入位置(b)时，光伏系统、风电机组以及储能系统的变压器高压侧暂态电压峰值分别为公共接地方式下的 185%、42%和 57%。

不同避雷器接地方式下混合系统不同位置出现过电压水平差异的现象，这是由于单独接地时大量雷电流通过变压器接地电阻泄流，引起地电位抬升，使得雷电侵入端的变压器高压侧暂态电压明显增大，同时雷电流也因此被限制在雷电侵入端。在公共接地情况时，避雷器与公共接地系统构成雷电流通道，从而发生回流浪涌现象，此时避雷器反向运作，雷电流可通过避雷器与公共接地系统侵入其他子系统，使得被侵入子系统的变压器高压侧暂态电压明显增大。因此，考虑到 35 kV 变压器高压侧雷电冲击绝缘耐受水平为 185 kV，推荐风机侧与光伏侧的变压器高压侧避雷器均采用公共接地方式，储能侧采用单独接地方式，从而有效抑制混合系统的雷电过电压水平。

3 结论

建立基于 PSCAD/EMTDC 的风光储混合系统的暂态模型，分析风光储混合系统遭受雷击时的暂态过程，得到如下结论：

1）对于 100 kA 雷电流情况，光伏阵列遭受雷击后光伏逆变器的过电压峰值相比于风机叶片遭受雷击后风力发电机出口侧的过电压峰值高 161%，光伏侧遭受雷击时变压器的过电压峰值相比于风机侧遭受雷击情况高 31%，在变压器钳制电位与隔离保护作用下，未遭受雷电直击子系统的过电压水平低于 1.16 kV。

2）增大风电场接入母线的架空线长度和减小光伏系统接入母线的架空线长度可以降低风光储混合系统的雷电过电压峰值。

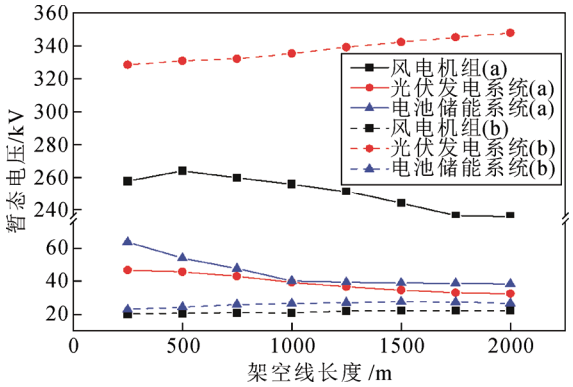


图 15 架空线长度对变压器高压侧暂态电压峰值影响

Fig.15 Influence of overhead line length on transient voltage peak at high voltage side of transformer

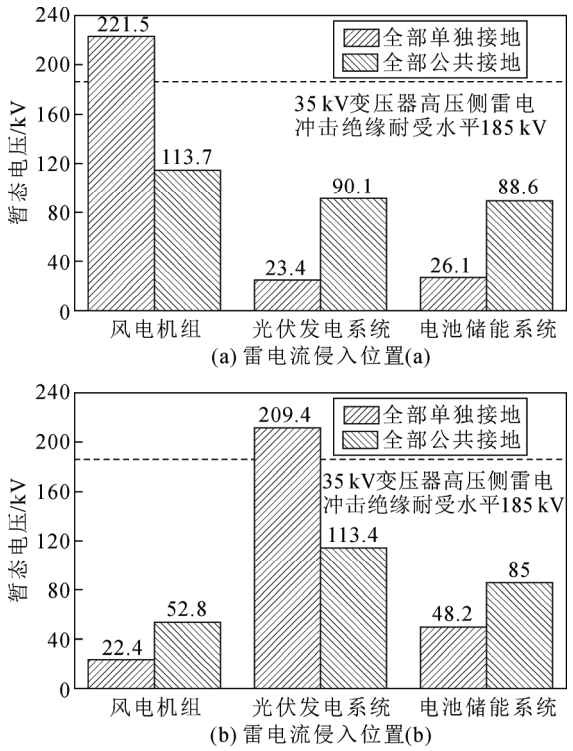


图 16 变压器高压侧暂态电压峰值

Fig.16 Transient voltage at high voltage side of transformer

3）风电机组与光伏系统的变压器高压侧避雷器均采用公共接地方式，电池储能系统的变压器高压侧避雷器采用单独接地方式能有效抑制风光储混合系统的雷电过电压水平。

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] 司马文霞，张煌竟，杨 鸣，等. 某变电站 10 kV 系统实测雷电侵入波过电压幅值与波形特征统计分析[J]. 高电压技术，2021，

47(1)：214-222.
SIMA Wenxia, ZHANG Huangjing, YANG Ming, et al. Statistical analysis of the amplitude and waveform characteristics of intrusive lightning overvoltages measured from the 10 kV system of a substation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 214-222.

[3] 王晓辉，张小青. 考虑参数频变特性的风机塔体雷电暂态计算[J]. 高电压技术，2009，35(6)：1344-1349.
WANG Xiaohui, ZHANG Xiaoqing. Lightning transients of wind turbine towers involving frequency-dependent characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1344-1349.

[4] 张　波，薛惠中，张宝全，等. 雷击风机时叶片和塔筒对接地装置冲击接地特性的影响[J]. 高电压技术，2012，38(10)：2675-2682.
ZHANG Bo, XUE Huizhong, ZHANG Baoquan, et al. Influence of the wind vane tower barrel on the earthing connection's impulse earthing characteristics in a lightning shock[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2675-2682.

[5] 赵清江，王　玥. 屋顶光伏发电系统雷击浪涌防护[J]. 电瓷避雷器，2018(3)：116-120.
ZHAO Qingjiang, WANG Yue. Lightning surge protection for roof-mounted photovoltaic power generation systems[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(3): 116-120.

[6] TAO S Q, ZHANG X Q, WANG Y W, et al. Transient behavior analysis of offshore wind turbines during lightning strike to multi-blade[J]. IEEE Access, 2018, 6: 22070-22083.

[7] 赵　炜. 大型集中式并网光伏发电系统内部雷电过电压保护研究[D]. 北京：北京交通大学，2020.
ZHAO Wei. Research on internal lightning over-voltage protection of large centralized grid connected photovoltaic power generation system[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2020.

[8] 刘　莉. 光伏储能系统的仿真研究[D]. 西安：西安理工大学，2021.
LIU Li. Simulation research on photovoltaic energy storage system[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Technology, 2021.

[9] HEIDLER F, CVETIC J M, STANIC B V. Calculation of lightning current parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 399-404.

[10] MOHAJERYAMI S, DOOSTAN M. Including surge arresters in the lightning performance analysis of 132kV transmission line[C]// 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas, USA: IEEE, 2016: 1-5.

[11] 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.

[12] 张　萍，吴显腾，赵新贺，等. 基于 ATP-EMTP 的海上风机雷电暂态分析[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4266-4273.
ZHANG Ping, WU Xianteng, ZHAO Xinhe, et al. Lightning transient analysis of offshore wind turbine based on ATP-EMTP[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4266-4273.

[13] ZHANG X Q. Calculation of transient potential rise on the wind turbine struck by lightning[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 213541.

[14] ZALHAF A S, AHMED M, OOKAWARA S, et al. A simplified model of wind turbine for lightning transient analysis as influenced by structure of grounding system[C]// 2018 5th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2018: 1-6.

[15] 赵海翔，王晓蓉. 风电机组的雷击过电压分析[J]. 电网技术，2004，28(4)：27-29，72.
ZHAO Haixiang, WANG Xiaorong. Overvoltage analysis of wind turbines due to lightning stroke[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 27-29, 72.

[16] 吴命利，范　瑜. 圆导线内阻抗的数值计算[J]. 电工技术学报，2004，19(3)：52-58.
WU Mingli, FAN Yu. Numerical calculations of internal impedance of cylindrical conductors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 52-58.

[17] JIANG J L, CHANG H C, KUO C C, et al. Transient overvoltage phenomena on the control system of wind turbines due to lightning strike[J]. Renewable Energy, 2013, 57: 181-189.

[18] NGUYEN T Q, PHAM T, TRAN T V. Electromagnetic transient simulation of lightning overvoltage in a wind farm[C]// 2013 IEEE Electrical Insulation Conference. Ottawa, Canada: IEEE, 2013: 81-84.

[19] MAHMOUD Y A, XIAO W D, ZEINELDIN H H. A parameterization approach for enhancing PV model accuracy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5708-5716.

[20] 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. Estoril, Portugal: IEEE, 2016: 1-8.

[21] DAS J C. Surges transferred through transformers[C]// Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Toronto, Canada: IEEE, 2002: 139-147.

[22] HUSSEIN A A H, BATARSEH I. An overview of generic battery models[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, USA: IEEE, 2011: 1-6.

[23] GUZMAN R, DE VICUÑA L G, CASTILLA M, et al. Variable structure control for three-phase LCL-filtered inverters using a reduced converter model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 5-15.

[24] 马庆玉，黄荣辉，刘顺桂，等. 35kV 电缆-架空线金属护层电流初始行波特性研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版)，2017，31(3)：25-29.
MA Qingyu, HUANG Ronghui, LIU Shungui, et al. 35kV cable-overhead lines metal sheath line current initial porter research[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(3): 25-29.

[25] MAGRO M C, GIANNETTONI M, PINCETI P. Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1692-1695.

[26] 肖　翔，张小青，李　聪. 风电机组雷电过电压的仿真分析[J]. 电工技术学报，2015，30(24)：237-244.
XIAO Xiang, ZHANG Xiaoqing, LI Cong. Simulation analysis on overvoltage in wind turbines by lightning stroke[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 237-244.



张毅龙
1996—，男，硕士
主要从事风光储混合系统的雷电防护的研究工作
E-mail: dragonzyl@sjtu.edu.cn

ZHANG Yilong



刘亚坤(通信作者)
1992—，男，博士，副教授，博导
主要从事雷电效应和雷电防护方面的研究工作
E-mail: liuyakunhv@163.com

LIU Yakun
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2021-09-08　修回日期　2022-12-06　　编辑　陈　蔓