第 52 卷 第 3 期：1080-1089 高电压技术 Vol.52, No.3: 1080-1089
2026 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251044

多重雷击下±500 kV 直流架空线转海缆的雷电侵入波过电压防护

何少敏[1]，韩永霞[1]，林昊君[1]，李端姣[2]，孙文星[2]，陈宇慧[2]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 广东电网有限责任公司，广州 510620）

摘　要：为保障多重雷击下绝缘水平较低的直流海缆安全，基于 PSCAD/EMTDC 搭建阳江三山岛海上风电±500 kV 海陆一体化柔性直流输电系统转换站电磁暂态模型，仿真计算站内关键设备及海缆过电压分布，分析不同雷电流幅值、波形及冲击次数对站内设备过电压的影响，研究了加装电抗器对各设备雷电过电压的抑制效果，并对比了不同避雷器配置方案下转换站对多重雷击的耐受能力。研究结果表明：雷电流幅值越高、波前时间越短，靠近架空线侧的设备过电压幅值越高；而波尾越长，海缆接入点的过电压越大。当绕击雷电流限制在 30 kA 以内时，无需采取额外防护措施；而在 40 kA 绕击下，海缆反极性过电压高达 631 kV，绝缘裕度不足。通过配置 4 mH 的电抗器可将海缆处过电压抑制至 384 kV，安全裕度提高至 33%；同时在转换站进线侧和电抗器架空线侧增设避雷器，可进一步降低设备过电压并保证避雷器的电气应力均处于安全范围。研究结果可为大容量海上风电采用直流海陆一体输送工程站线协同雷电防护设计提供参考。

关键词：海上风电；直流转换站；海陆一体协同；多重雷击；雷电侵入波过电压；防护方案

Lightning Intruding Overvoltage Protection for the ±500 kV DC Overhead Transmission Line-submarine Cable System Under Multiple Lightning Strikes

HE Shaomin[1], HAN Yongxia[1], LIN Haojun[1], LI Duanjiao[2], SUN Wenxing[2], CHEN Yuhui[2]
(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract：To ensure the safety of the DC submarine cable with relatively low insulation level under multiple lightning strikes, a transition station model of the ±500 kV integrated offshore-onshore flexible DC transmission system for the Yangjiang Sanshan Island offshore wind power project is established in PSCAD/EMTDC. The overvoltage distributions of key equipment and submarine cables in the station are simulated, and the effects of multiple lightning current waveforms and the number of return strokes on equipment overvoltage in the station are analyzed. Furthermore, the suppression effects of installing reactors on lightning overvoltage are investigated, and the station's withstand capabilities against multiple lightning strikes are compared under different arrester configuration schemes. The results indicate that higher lightning current amplitudes and shorter front time lead to higher overvoltages on equipment near the overhead transmission line, whereas longer tail time results in larger overvoltages at the submarine cable connection point. When the lightning current is limited to 30 kA, no additional protective measures are required. However, under 40 kA lightning strokes, the reverse-polarity overvoltage at the submarine cable terminal reaches 631 kV with an insufficient insulation margin. Installing a 4 mH reactor can suppress the cable terminal overvoltage to 384 kV, increasing the insulation margin to 33%. Additionally, adding arresters at both the station inlet and the overhead transmission line side of the reactor can further reduce equipment overvoltages and ensure that the electrical stress of all arresters remains within safe limits. These findings provide a coordinated transition station-transmission line lightning protection design methodology for large-scale offshore wind power projects using integrated offshore-onshore DC transmission.

Key words：offshore wind power; DC transition station; offshore-onshore integration; multiple lightning strokes; lightning intruding overvoltage; protection scheme

基金资助项目：智能电网重大专项(2030)(2025ZD0807000)；广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515010276)。
Project supported by Smart Grid-National Science and Technology Major Project(2025ZD0807000), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2024A1515010276).

0 引言

在“双碳”目标推动下，风力发电凭借其低碳可持续发展、成本较低、技术成熟及运行可靠等优势在全球范围内得到了快速发展和应用[1-4]。阳江三山岛海上风电柔直输电工程作为国内外首个超大规模、海陆一体±500 kV 柔性直流输电工程，其直流线路采用架空线路与海缆混合结构，并通过转换站连接架空线路和海缆。海底电缆作为连接海上换流站以及陆上电网的重要输电载体，其安全稳定运行对于海上风电的可靠输送至关重要。然而，直流架空线路遭受雷击产生的雷电过电压可能沿线侵入转换站[5-8]，从而威胁转换站内设备及相连海缆的绝缘安全。由于海缆成本高，维修难度大、周期长，且该工程首次采用的±500 kV 直流海缆雷电冲击耐受电压仅为 1 175 kV，因此需要慎重设计转换站的雷电侵入波防护方案。

广东省雷电定位系统近 10 年监测数据的统计结果表明，陆地区域以及距离海岸线 100 km 海上区域的多回击地闪分别占总雷击地闪的 33.46%和45.66%[9]，可能造成架空线路短时间内遭受多重雷击，进而引起站内避雷器、断路器及绕组类设备故障[10-12]。因此，有必要开展架空线-海缆转换站的多重雷击侵入波过电压防护研究。目前，国内外已开展的变电站/换流站雷电侵入波仿真研究中，主要考虑线路遭受单次雷击，雷电流波形参数多采用 2.6/50 μs 双指数或 1/70 μs 斜角波[13]等。针对多回击地闪的雷电流波形参数，IEEE 推荐负极性首次和后续回击分别采用 5.63/77.5 μs 和 0.75/30.2 μs 波形模拟，IEC 62305-1 则推荐采用 1/200 μs 和 0.25/100 μs 波形。此外，标准推荐波形也可能与本地区的雷电流特征之间存在差异。为进一步精确模拟多回击地闪后续回击下雷电流波形参数，国内外学者开展了人工引雷实验，实测得到多回击下的雷电流参数，如 0.36/18 μs[14]和 0.2/18 μs[15]等。尽管如此，上述单次雷电流波形参数差异以及多重雷击对雷电侵入波幅值及其防护方法的影响仍不清楚[16]。

因此，本文针对三山岛±500 kV 海上风电海陆一体化送出系统的转换站，搭建多重雷击下雷电侵入波的电磁暂态仿真模型，分析多重雷击下转换站内设备以及海缆处的雷电侵入波过电压及其影响因素，并基于设备雷电冲击绝缘水平提出转换站的雷电侵入波防护方案。

1 系统结构参数及仿真建模

广东阳江三山岛海上风电柔直输电工程计划按照每 2 000 MW 风电机组建设一个 500 kV 海上柔性直流换流站，经海底电缆连接至陆上转换站[17]，再由转换站连接直流架空线路送至陆上换流站，图 1 为转换站的电气主接线图。

1.1 雷电流模型

直流架空输电线路遭受绕击后的雷电侵入波过电压对转换站设备威胁最大，且绕击雷电流幅值越大，站内设备和海缆所承受的雷电过电压就越高。当雷电流增大至绝缘子串闪络时，部分雷电流将通过杆塔和地线入地，此时站内的雷电过电压反而降低。因此，在绕击侵入波计算过程中，海缆所承受的最大雷电过电压与进线段最大绕击雷电流及绕击耐雷水平相关。

雷电定位系统监测数据表明，广东地区雷电的回击频次主要集中在 2~5 次之间[18]。人工引雷试验结果显示，实测的后续回击雷电流波形为 0.36/18 μs，与 IEC 推荐波形 0.25/100 μs 及 IEEE 推荐波形 0.75/30.2 μs 相比，波前时间较为相近，但波尾时间较短[14]。

为考虑最严苛工况下的雷电侵入波，本文选取幅值为 20~40 kA 的雷电流绕击转换站进线段杆塔，且假设绝缘子不发生闪络。在单次雷击模拟中，采用 2.6/50 μs、10/350 μs、5.63/77.5 μs、1/200 μs、0.25/100 μs、0.36/18 μs 等雷电流波形仿真对比站内侵入波过电压，涵盖了国际标准推荐波形与广东地区实测波形，以保证仿真结果的代表性与区域适用性，见图 2。多重雷击模拟时，假设共计 5 次回击，负极性首次和后续电流波形分别取 5.63/77.5 μs、0.36/18 μs 以及 IEC 推荐的 1/200 μs 和 0.25/100 μs，正极性雷电流波形取 10/350 μs 和 0.25/100 μs，具体参数如表 1 所示。雷电流波形利用 Heidler 函数模拟，仿真采用理想电流源并联雷电通道等值波阻抗为 800 Ω。

1.2 线路和杆塔

直流侧架空输电线路采用 JL/LB20A-500/45 型铝包钢芯铝绞线，线路全段敷设 2 根 OPGW-150-48-1-4 型光缆，具体参数如表 2 所示，仿真中采用频率相关模型(frequency-dependent model)模拟。杆塔包含耐张塔和直线塔 2 种，型号分别为 JG372 和 ZC375，仿真采用多导体分层波阻抗模型[19-20]。

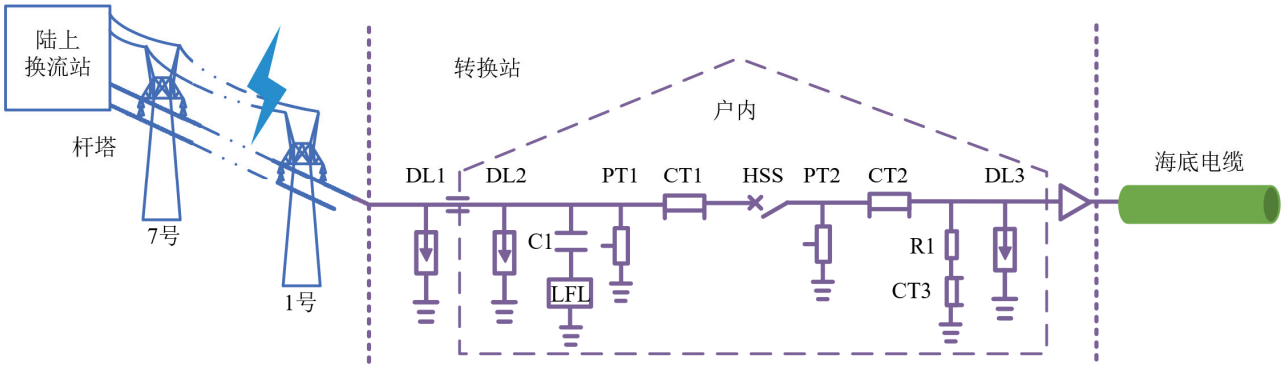


图 1 转换站电气主接线图

Fig.1 Main electrical wiring diagram of the transition station

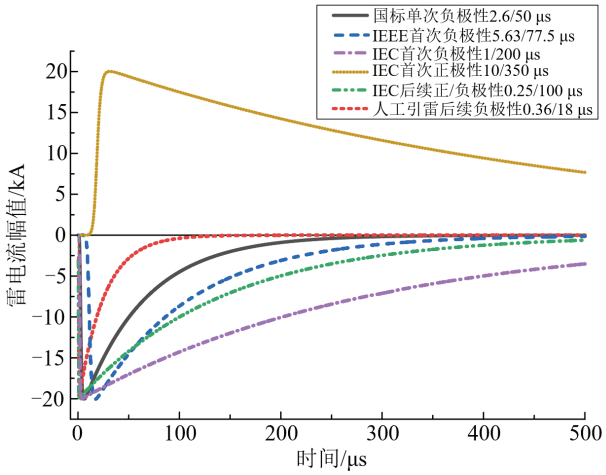


图 2 单次冲击雷电流波形

Fig.2 Waveforms of impulse lightning current

表 1 多重雷电流波形参数

Table 1 Parameters of multiple lightning current waveforms

雷电流极性	类型	首次回击波形/μs	后续 2~5 次回击波形参数/μs
负	IEEE+人工引雷	5.63/77.5	0.36/18
	IEC 推荐	1/200	0.25/100
正	IEC 推荐	10/350	0.25/100

1.3 转换站内关键设备

在雷电侵入波作用下，转换站内隔离开关、断路器、互感器等设备均可等值为冲击入口电容，如表 3 所示。此外，各设备间的连线采用分布参数电路模型，以准确反映雷电波在站内的传播特性。

如图 1 所示，在穿墙套管两侧分别配置一柱避雷器 DL1 和 DL2，以限制站内设备以及套管处过电压。同时，在转换站末端海缆接入点处配置一柱 DL3 避雷器，用于抑制内部过电压并保护海缆。站内避雷器的配合电流为 20 kA，残压为 1 050 kV，允许的最大吸收能量为 5 000 kJ，避雷器伏安特性如图 3 所示，仿真中采用非线性电阻模拟。

表 2 架空线路参数

Table 2 Parameters of the overhead lines

类型	参数	数值
地线	型号	OPGW-150-48-1-4
	外径/mm	16.6
	20℃时直流电阻/(Ω·km^{-1})	0.284
导线	型号(分裂数)	JL/LB20A-500/45
	外径/mm	30.0
	20℃时直流电阻/(Ω·km^{-1})	0.057 5
	分裂间距/mm	500

表 3 转换站设备等值入口电容值

Table 3 The equivalent input capacitance values of transition station equipment

设备	等值入口电容/pF
穿墙套管	5 000
隔离开关	150
支柱绝缘子	100
HSS 开关	300
电流互感器	150
电容式电压互感器	5 000
高压极线耦合电容	2 800

1.4 海底电缆

直流海缆为单芯结构，总长 114.8 km，雷电冲击下同极性耐受电压为 1 175 kV，反极性耐受电压为 630 kV。直流海缆的基本结构及电气参数分别如图 4 和表 4 所示，图 4 中导体半径 r_1=28.6 mm，绝缘层厚度 d_1=30.4 mm，非金属套外半径 r_2=71 mm，内衬层外半径 r_3=80.3 mm，电缆外半径 r_4=90.8 mm，仿真采用频率相关模型。

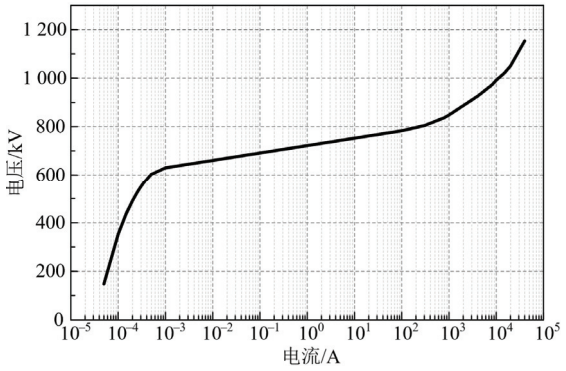


图 3　避雷器伏安特性曲线

Fig.3　Voltage-ampere characteristic curve of surge arrester

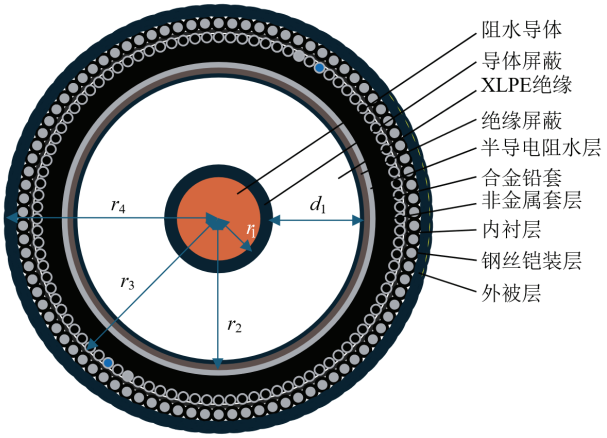


图 4　±500 kV 直流海缆结构示意图

Fig.4　Schematic diagram of ±500 kV DC submarine cable structure

2　单次雷击雷电流波形的影响

2.1　雷电流陡度的影响-常规转换站

采用图 2 中不同的雷电流波形绕击转换站进线段，幅值取 40 kA，且负极性雷电流绕击负极线，正极性雷电流绕击正极线，假设线路未发生绕击闪络，则站内设备的最大雷电过电压如图 5 所示。

由图 5 可知，雷电流波前时间越短，即波头上升沿越陡，设备上的雷电过电压就越高[21]。相较于单次雷击，多重雷击中的后续雷电流波头更陡，如当波前时间为 0.25 μs 时，套管侧过电压(1 257 kV)约为波前时间为 2.6 μs 时(1 022 kV)的 1.2 倍。因此，仅采用 2.6/50 μs 的雷电流波形校核站内设备雷电过电压，计算结果偏宽松。此外，随着雷电流冲击波形陡度增加，避雷器的老化速率显著加快[22]，残压也会随之升高。因此有必要结合实测的真实雷电流陡度开展海缆-架空线路防雷设计，以准确计算设备最高雷电侵入波过电压和避雷器严苛考核工况，确保设备安全。

此外，由于转换站内海缆接入点距离雷电侵入点较远，雷电过电压波在传播过程中会发生多次折反射和衰减，其过电压最大值出现在振荡的中后期，因此，海缆处的过电压主要受雷电流波尾时间的影响。由图 5 所示海缆过电压波形可知，尽管 0.36/18 μs、1/200 μs 和 0.25/100 μs 等雷电流波形均有较高的波头陡度，但 0.36/18 μs 波形的波尾较短、雷电流持续时间短，导致其在海缆上产生的过电压幅值显著低于其他雷电流波形。相比之下，10/350 μs 雷电流波形的波尾持续时间最长，在海缆处产生的过电压幅值最大。

表 4　直流海缆电气参数

Table 4　Electrical parameters of DC submarine cable

序号	参数	数值
1	电缆芯导体电阻/(W·m^{-1})	7.2×10^{-6}
2	电缆芯导体相对磁导率	1
3	绝缘层相对介电常数 ε_r	2.5
4	绝缘层相对磁导率	1
5	铅套电阻率/(W·m^{-1})	21.4×10^{-8}
6	铅套相对磁导率	0.999 982
7	铠装钢丝电阻率/(W·m^{-1})	13.8×10^{-8}
8	铠装钢丝相对磁导率	400

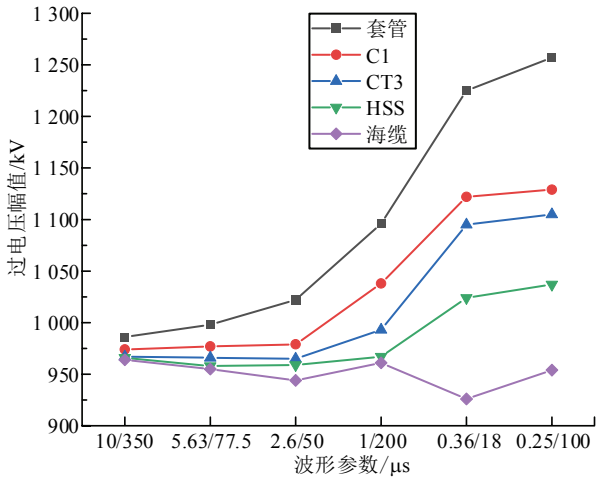


图 5　不同雷电流波形下设备过电压

Fig.5　Overvoltage of equipment under different lightning current waveforms

2.2　雷电流幅值的影响-常规转换站

为分析电流幅值对站内设备过电压的影响，采用严苛的 0.25/100 μs 雷电流波形，开展幅值为 20~40 kA 的雷电流绕击进线段时转换站雷电过电压的

仿真，各站内设备过电压如图 6 所示。

图 6 表明，各设备过电压随着雷电流幅值增大而上升，30 kA 及以下雷电流绕击进线段时，站内避雷器最大残压均低于其雷电冲击保护水平，海缆处过电压仅为918 kV，其冲击耐受电压为1 175 kV，绝缘裕度为 28%。而当雷电流幅值增至 40 kA 时，海缆上最高雷电过电压上升至 954 kV，绝缘裕度仅为 23%，绝缘裕度有限；且此时，转换站架空线侧 DL1 避雷器电压最高为 1 091 kV，超出其雷电冲击保护水平 1 050 kV。

2.3 海缆反极性雷电过电压

当转换站进线段直流架空极线遭受反极性雷电流绕击时，直流运行电压叠加反极性雷电冲击电压，可能导致海缆接入点过电压极性反转。此时，海底电缆中的空间电荷与电极之间形成较高电场，导致电缆绝缘强电场畸变，从而显著降低电缆的冲击耐受电压[23]。

自然界中雷电以负极性地闪为主，但近年来统计数据显示广东陆地和海上区域正极性雷电的占比已分别上升至 21.65%和 28.32%[9]。因此，在反极性雷电侵入波研究中，需同时考虑正极性和负极性雷电流分别绕击不同极线的工况。由于海缆处过电压受到雷电流波尾影响较大，因此为分析最严苛的过电压，分别仿真 10/350 μs 正极性雷电流绕击负极线以及 1/200 μs 负极性雷电流绕击正极线 2 种工况。仿真结果表明，30 kA 雷电流冲击下，海缆接入点的反极性过电压分别为 396 kV 和 331 kV，对应的绝缘裕度为 37%和 47%；而在 40 kA 雷电流冲击下，海缆接入点的反极性过电压分别提升至 631 kV 和 607 kV，绝缘裕度仅为 3%~7%。

上述分析表明，当进线段甚至全线直流架空线路的最大绕击电流及绕击耐雷水平限制在 30 kA 以内时，图 1 原站内避雷器配置方案能有效保障同极性和反极性雷击下站内设备及海缆安全。然而，当实际杆塔和线路设计不足导致更高幅值的雷电流侵入转换站时，需提出相应的防护方案以降低海缆处的雷电侵入波过电压，尤其是反极性雷电过电压。

3 单次雷电侵入波下站内电抗器配置方案

当 30 kA 以上的同极性和反极性雷电流绕击进线段时，为降低雷电过电压并提高绝缘裕度，设计在直流转换站极线布置串联电抗器 L 作为抑制雷电过电压的关键设备，并在电抗器两端配置 DR 型避雷器，如图 7 所示。为了设计数值合理的电抗器，对比分析不同电抗值下站内电抗器架空线侧 L1 点和海缆侧 L2 点对地的雷电过电压，在 40 kA 同极性雷电流绕击进线段时站内设备最大过电压如图 8 所示。

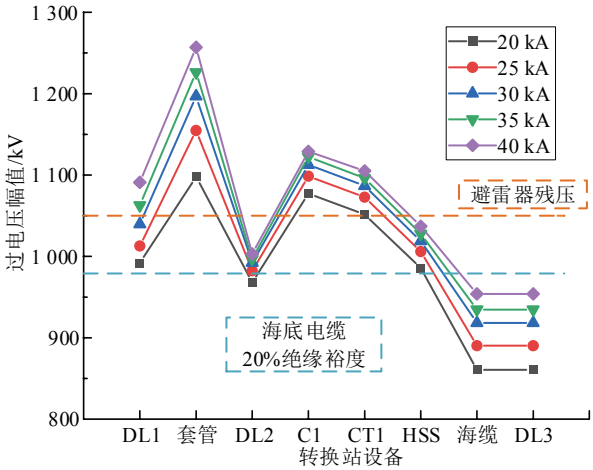


图 6 0.25/100 μs 雷电流波形冲击下的站内设备过电压

Fig.6 Overvoltages of the station equipment under the 0.25/100 μs lightning current impulse

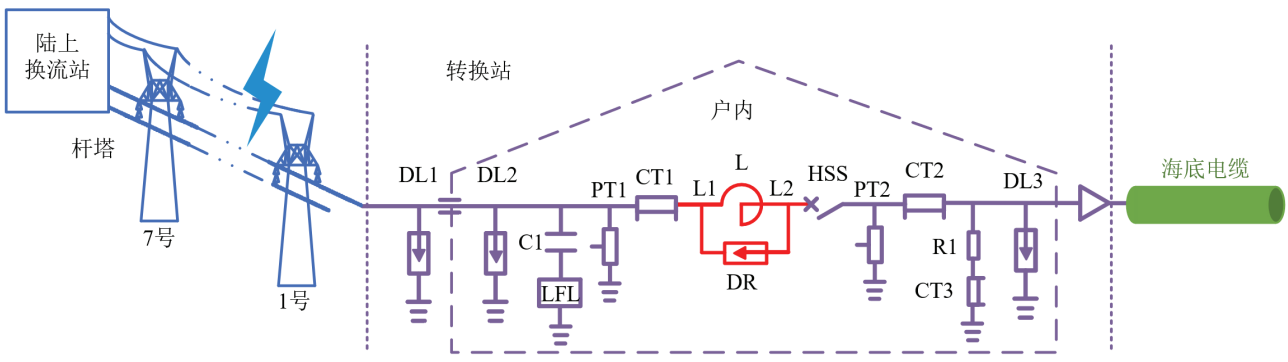
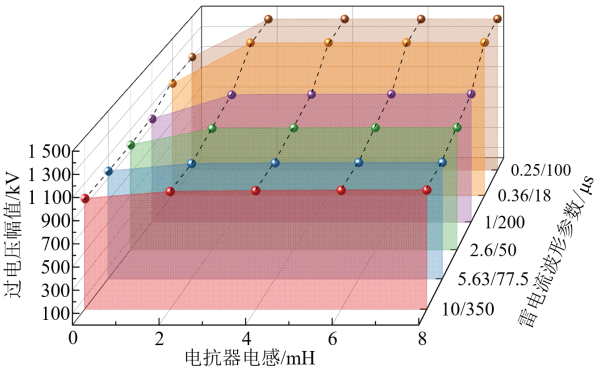
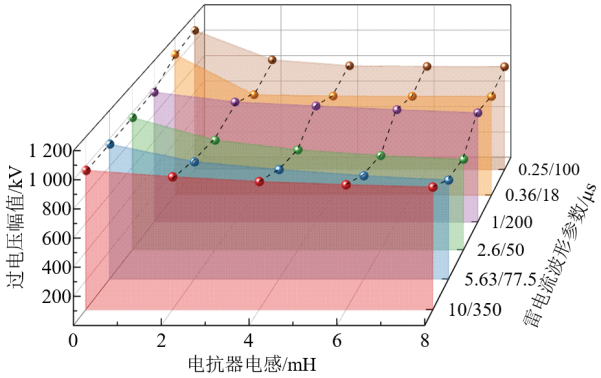


图 7 配置电抗器后转换站电气接线图

Fig.7 Electrical wiring diagram of the transition station after installing the reactor



(a) 电抗器架空线侧(L1 点)过电压



(b) 电抗器海缆侧(L2 点)过电压

图 8 配置电抗器对站内设备过电压的影响

Fig.8 Impact of reactor configuration on the overvoltage of equipment within the station

由图 8 可知，当站内未配置电抗器，即 L=0 mH 时，L1 点和 L2 点对地电位相同。配置电抗器后，由于其对高频雷电波具有较强的正反射作用，电抗器架空线侧(L1)的雷电过电压幅值上升，而海缆侧(L2)受到电抗器对高频电流的抑制作用，过电压幅值显著降低，下降幅度为 13%~28%。对比不同雷电流波形发现，雷电流波形陡度越高，电抗器的阻尼作用越显著。因此，0.25/100 μs 雷电流冲击下，电抗器进线侧设备过电压最大，而 10/350 μs 雷电流的波头陡度较低且波尾持续时间较长，电抗器对其低频分量反射较小，导致电抗器后的海缆侧设备过电压最高。图 8(b)表明，随着电抗值的增加，电抗器海缆侧设备过电压幅值逐渐减小，且当电抗器增大至 4 mH 时，海缆侧设备过电压的下降趋势趋于平缓，防护效果趋于饱和。

针对反极性雷电流绕击进线段，图 9 的仿真结果表明，配置 4 mH 电抗器能够有效将海缆处的反极性过电压抑制在 384 kV 及以下，绝缘裕度提高至 65%，海缆绝缘安全水平显著提升。从经济角度看，单台 4 mH 电抗器成本约 50 万元，远低于海缆几十亿的投资及每次昂贵的维修费用。综上所述，同极性和反极性雷电侵入波过电压仿真结果均表明，在转换站串联配置 4 mH 电抗器以降低海缆雷电过电压，具有较好的技术经济可行性。

为校核串接 4 mH 电抗器后转换站内所有设备所承受的最大雷电冲击过电压，仿真分析幅值为 40 kA、波形分别为 0.25/100 μs 和 10/350 μs 的 2 种雷电流绕击进线段时转换站内各设备的过电压，结果如图 10 所示。电抗器海缆侧设备及海缆接入点过电压被有效抑制至 885 kV，绝缘裕度提高为 33%。然而，电抗器架空线侧设备雷电过电压幅值显著上升，L1 处的过电压幅值最高为 1 475 kV，避雷器 DL1 的残压最大为 1 087 kV，超出保护水平 1 050 kV。因此，需进一步结合多重雷击下避雷器的电气应力提出避雷器配置优化方案。

4 多重雷电侵入波下站内避雷器配置方案

多重雷击侵入波下，站内避雷器在短时间内遭受多次雷电冲击，吸收能量 W 快速积累，如式(1)所示，容易造成能量过载而引发避雷器热崩溃或侧闪击穿。

$$W=\int(u(t)\cdot i(t))\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：$u(t)$和 $i(t)$分别为避雷器两端电压和放电电流瞬时值；t 为雷击持续时间。上述电压、电流及能量在电磁暂态仿真中可直接测量和计算。

仿真结果表明，在实测多重雷电流波形冲击下(首次回击 5.63/77.5 μs、后续回击 0.36/18 μs)，架空线侧避雷器 DL1 承受的电气应力最大。当雷电流幅值为 35 kA 时，DL1 的最大放电电流为 21 kA，已超出其标称放电电流 20 kA；当雷电流幅值增至 40 kA 时，DL1 累计吸收能量为 2 430 kJ，仍低于其额定吸收能量。

考虑到避雷器应力受雷电流脉宽影响显著，波尾时间越长，所累积的吸收能量就越高。为分析极端条件下各设备过电压水平和避雷器能量，本文依据前述分析，选取首次回击波形为 10/350 μs，后续回击波形为 0.25/100 μs 的正极性多重雷电流作为最严苛工况。在转换站原配置方案(图 1)以及配置 4 mH 电抗器方案(图 7)下，分析承受应力最大的避雷器 DL1 在不同雷击次数下所吸收的总能量，结果如图 11 所示。

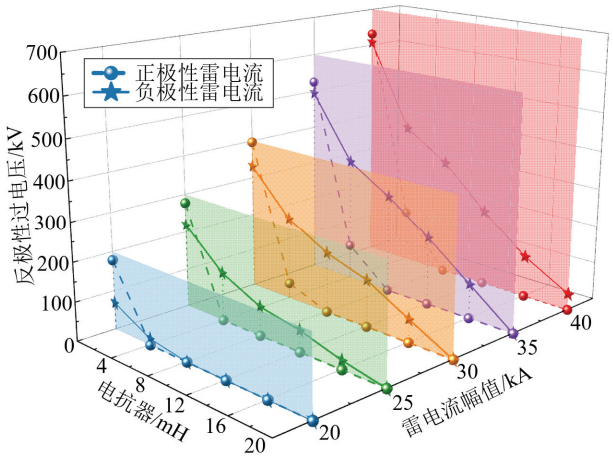


图 9 配置电抗器后海缆接入点的反极性过电压

Fig.9 Reverse-polarity overvoltage at the submarine cable access point after the reactor configuration

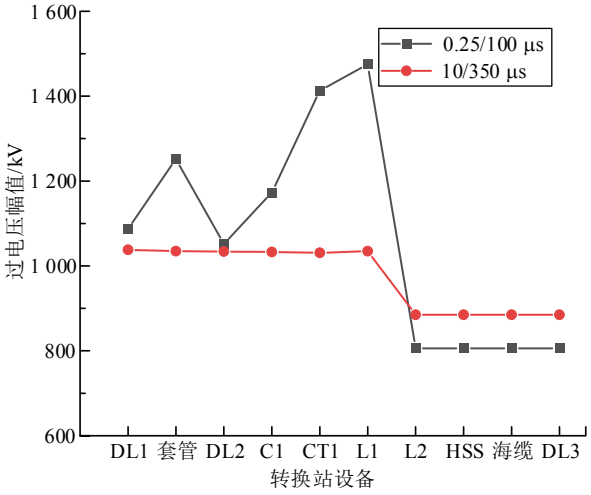
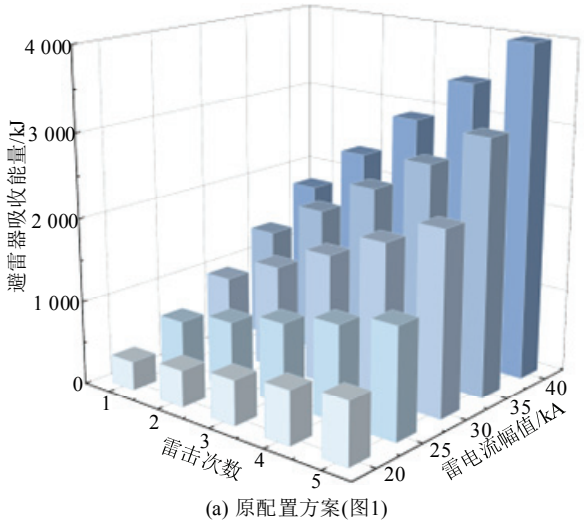
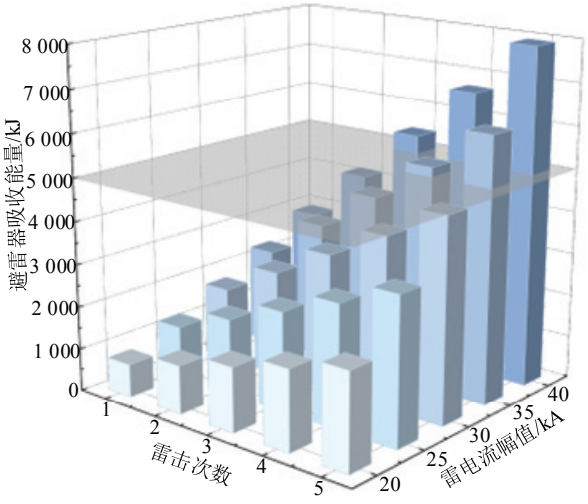


图 10 0.25/100 μs 和 10/350 μs 的站内设备过电压

Fig.10 Overvoltage of equipment in the transition station under 0.25/100 μs and 10/350 μs lightning impulse



(a) 原配置方案(图1)



(b) 配置4 mH电抗器方案(图7)

图 11 首次 10/350 μs、后续 0.25/100 μs 正极性多重雷电流波形冲击下 DL1 避雷器吸收能量

Fig.11 Energy absorbed by DL1 surge arrester under multiple lightning impulse: 10/350 μs for the first stroke and 0.25/100 μs for subsequent strokes

由图 11 可知，当进线段甚至全线的最大绕击电流及耐雷水平低于 30 kA 时，避雷器 DL1 吸收能量均在额定范围内，最大为 3 999 kJ，表明原转换站避雷器配置方案(图 1)能够有效防护多回击雷电侵入波。而针对更高幅值雷电流绕击侵入站内所提出的 4 mH 电抗器配置防护方案(图 7)，当雷电流幅值增加至 35 kA 时，DL1 吸收能量在 4 次雷电流冲击下已累积至 5 222 kJ，超出其额定吸收能量 5 000 kJ。

因此，针对 40 kA 雷电流绕击入侵转换站工况，根据防护需求对避雷器的配置提出以下 3 种方案的优化：方案 1，保持原转换站内避雷器的位置不变，在进线侧 DL1 加并一柱避雷器 DL1′；方案 2，在方案 1 的基础上，在电抗器架空线路侧增设避雷器 DL4，以抑制电抗器侧的过电压幅值；方案 3，考虑到加装线路避雷器可抑制雷电侵入波过电压[24-25]，保持原转换站内 DL1 和 DL3 避雷器位置和数量不变，在电抗器架空线路侧增设避雷器 DL4，并在进线杆塔装设无间隙线路避雷器 DL5。各方案下的避雷器配置如图 12 所示，仿真不同避雷器配置方案下站内设备的多重雷电侵入波过电压，结果如图 13 所示，各避雷器的最大应力如表 5 所示。

由图 13 和表 5 可知，方案 1 通过增加进线侧避雷器 DL1 的并联柱数，可显著降低单柱避雷器的能量吸收水平，从而提升整体通流能力。该方案下

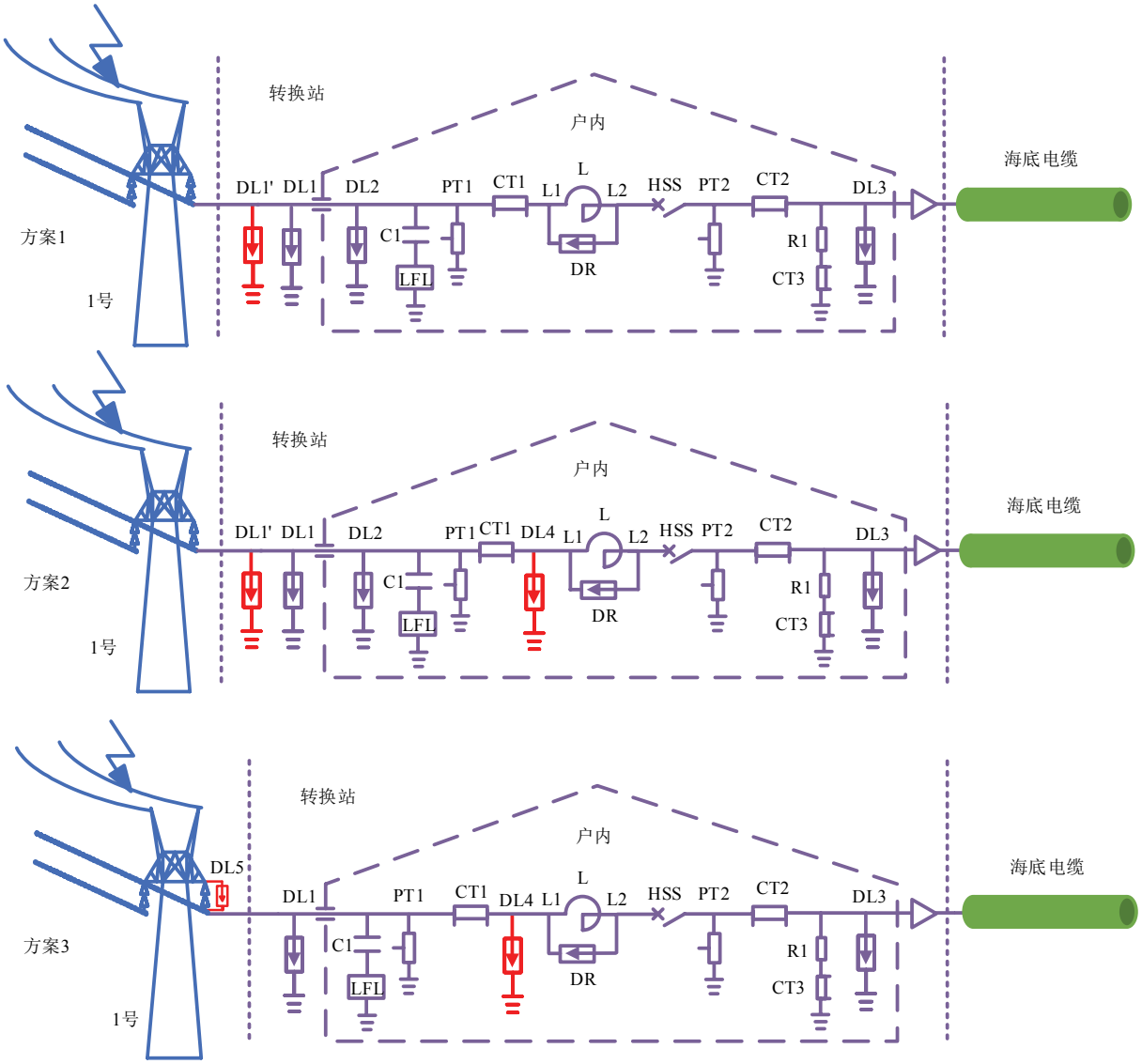


图 12　避雷器配置优化方案示意图

Fig.12　Schematic diagram of the optimized surge arrester configuration

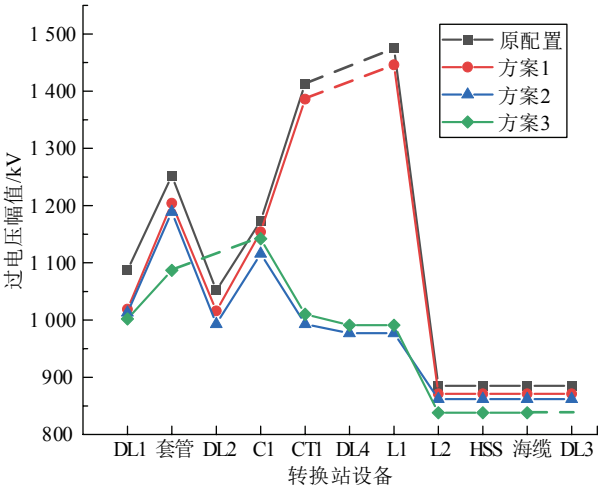


图 13　不同避雷器配置方案下设备过电压

Fig.13　Equipment overvoltage under different surge arrester configurations

站内设备的雷电过电压略有降低，其中电抗器处的过电压幅值最大，达到 1 446 kV，相比原方案降低了 1.9%，海缆接入点过电压为 871 kV，未超过海缆雷电冲击耐受电压。然而，在多次雷电流冲击叠加条件下，避雷器 DL1 和 DL2 吸收的能量仍超出了其额定值。

方案 2 中，受到电抗器架空线路侧避雷器 DL4 的限制，电抗器及其附近设备的过电压显著降低。此时，站内过电压最大出现在套管处，为 1 189 kV，海缆接入点过电压降低至 862 kV，均低于其绝缘耐受水平，且所有避雷器的电气应力均在耐受范围内，整体绝缘裕度显著提升。

方案 3 则通过加装线路避雷器 DL5，使得大部分雷电流在入站前由进线杆塔线路避雷器吸收，从

表 5 不同配置方案下避雷器电气应力

Table 5 Electrical stress of surge arresters under different configuration

配置方案	套管架空线路侧避雷器 DL1(单柱)			套管站内侧避雷器 DL2			海缆接入点避雷器 DL3			电抗器侧避雷器 DL4			线路避雷器 DL5		
	电压/kV	电流/kA	能量/kJ	电压/kV	电流/kA	能量/kJ	电压/kV	电流/kA	能量/kJ	电压/kV	电流/kA	能量/kJ	电压/kV	电流/kA	能量/kJ
原配置	1 087	27.2	7 923	1 052	20.4	7 816	885	2.45	756						
方案 1	1 019	15.5	5 313	1 016	15.1	5 299	871	1.91	227						
方案 2	1 013	14.5	4 092	993	10.3	4 015	862	1.54	488	1 033	8.6	3 401			
方案 3	996	12.2	4 570				864	1.61	511	992	10.23	4 363	1 109	31	3 529

而减小对站内设备的冲击影响。相比于方案 1，该方案下的套管过电压显著降低至 1 087 kV，海缆接入点为 838 kV，均处于安全范围内。但由于 DL5 所承受的最大放电电流已超出其标称放电电流，因此需考虑增加并联线路避雷器以降低其电气应力至安全耐受范围内。然而，由于线路避雷器的安装与维护难度远高于站内避雷器，因此建议综合考虑各方案的防护效果及工程实施性，推荐方案 2 作为最终配置方案。

5 结论

1）雷电绕击转换站进线段时，雷电流的波形参数对站内设备过电压影响显著。雷电流幅值越高、波前时间越短，靠近架空线侧的设备过电压幅值就越高；波尾越长，海缆接入点的过电压越大。因此，转换站的绝缘设计需充分考虑雷电流波形的影响。

2）当进线段甚至全线直流架空线路的最大绕击电流及绕击耐雷水平限制在 30 kA 以内时，多重雷击下的海缆过电压和避雷器的电气应力明显低于额定值，转换站可采用传统防护方式；而当 40 kA 雷电流绕击进线段侵入转换站时，海缆接入点处的最大雷电反极性过电压高达 631 kV，绝缘裕度仅为 3%。配置电抗器能够有效降低海缆侧过电压，且抑制效果随电抗值增大而增强并趋于饱和，4 mH 电抗器可将反极性过电压降至 384 kV，安全裕度提升至 33%。

3）由于电抗器对高频雷电过电压存在反射作用，架空线侧避雷器的残压升高且超出保护水平。针对 40 kA 最严苛多重雷击条件下的设备过电压与避雷器电气应力，提出了 3 种避雷器配置方案。对比分析表明，方案 2(进线侧并联避雷器，且在电抗器架空线路侧增设避雷器)能有效降低转换站内关键设备及海缆的雷电侵入波过电压，并保证所有避雷器的电气应力均在耐受范围内。

参考文献 References

[1] 李 岩，冯俊杰，卢毓欣，等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.

[2] 刘吉臻，马利飞，王庆华，等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学，2021，23(1)：149-159.
LIU Jizhen, MA Lifei, WANG Qinghua, et al. Offshore wind power supports China’s energy transition[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149-159.

[3] 肖晃庆，甘慧辰，黄 莹，等. 远海风电轻型化直流送出技术综述[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2702-2719.
XIAO Huangqing, GAN Huichen, HUANG Ying, et al. Review of lightweight DC transmission technology for offshore wind power[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2702-2719.

[4] 阳岳希，贺之渊，彭 程，等. 海上风电柔性直流外送系统主动支撑技术综述[J]. 高电压技术，2025，51(6)：2720-2733.
YANG Yuexi, HE Zhiyuan, PENG Cheng, et al. Review on grid support control for VSC-HVDC connecting offshore wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2720-2733.

[5] 司马文霞，袁 涛，刘亚坤，等. 多重雷击对电力系统雷电防护的影响与挑战[J]. 高电压技术，2025，51(8)：3992-4005.
SIMA Wenxia, YUAN Tao, LIU Yakun, et al. Effects of multiple lightning strokes on power system protection and associated challenges[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3992-4005.

[6] 韩永霞，张 杰，赵宇明，等. 基于柔性直流的±10 kV 配电网雷电侵入波过电压仿真[J]. 高电压技术，2018，44(8)：2533-2540.
HAN Yongxia, ZHANG Jie, ZHAO Yuming. Simulation on the lightning intruding overvoltage of the ±10 kV DC distribution network based on VSC-DC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2533-2540.

[7] GOERTZ M, WENIG S, BECKLER S, et al. Overvoltage characteristics in symmetrical monopolar HB MMC-HVDC configuration comprising long cable systems[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106603.

[8] 厉天威，刘大鹏，雷园园，等. 柔性直流换流站雷电侵入波过电压[J]. 中国电力，2015，48(2)：55-58.
LI Tianwei, LIU Dapeng, LEI Yuanyuan, et al. Research on lightning invasion wave overvoltage in flexible DC converter station[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 55-58.

[9] LIAO Z M, HAN Y X, LI L C, et al. Statistical analysis of the spatio-temporal characteristics of multiple return strokes cloud-to-ground

lightning parameters in Guangdong Province, China[J]. Atmospheric Research, 2025, 323: 108170.

[10] 廖民传，蔡汉生，吴小可，等. 多重雷击对线路避雷器的冲击影响研究[J]. 电瓷避雷器，2019(3)：153-158.
LIAO Minchuan, CAI Hansheng, WU Xiaoke, et al. Study on impact of multiple lightning strikes on transmission line arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 153-158.

[11] 周利军，魏仁伟，刘 聪，等. 多重雷击下氧化锌避雷器的冲击老化特性[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3507-3516.
ZHOU Lijun, WEI Renwei, LIU Cong, et al. Impact aging characteristics of zinc oxide arrester under multiple lightning strikes[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3507-3516.

[12] 杨海涛，王 川，杨建俊，等. 一起 110 kV 线路避雷器爆炸事故分析[J]. 电瓷避雷器，2019(4)：151-154，160.
YANG Haitao, WANG Chuan, YANG Jianjun, et al. Analysis of the 110 kV line arrester explosion accident[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4): 151-154, 160.

[13] OKABE S, TAKAMI J. Evaluation of improved lightning stroke current waveform using advanced statistical method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2197-2205.

[14] 赵晓凤，杨 雷，李 谦，等. 基于雷电定位系统和实测的多回击地闪雷电流参数及模型分析[J]. 广东电力，2023，36(8)：97-103.
ZHAO Xiaofeng, YANG Lei, LI Qian, et al. Analysis of lightning current parameters and model based on lightning location system and measured multi-return stroke of cloud-to-ground lightning[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(8): 97-103.

[15] SCHOENE J, UMAN M A, RAKOV V A, et al. Characterization of return-stroke currents in rocket-triggered lightning[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, 114(D3): D03106.

[16] 黄健宁，韩永霞，廖志铭，等. 多回击地闪下变电站雷电侵入波的仿真建模及防护[J]. 广东电力，2022，35(12)：66-75.
HUANG Jianning, HAN Yongxia, LIAO Zhiming, et al. Simulation modeling and protection of lightning intrusion wave in substation under multiple return strike cloud-ground flashes[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(12): 66-75.

[17] 蔡希鹏，邹常跃，彭发喜，等. 超大规模海上风电海陆一体直流输电技术探讨[J]. 电网技术，2024，48(7)：2895-2901.
CAI Xipeng, ZHOU Changyue, PENG Faxi, et al. Discussion on HVDC transmission technology for super-large scale offshore wind power under offshore-onshore integration[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2895-2901.

[18] 杨 雷，韩永霞，廖志铭，等. 基于雷电定位系统的雷电多回击地闪参数统计及影响因素分析[J]. 广东电力，2023，36(7)：115-123.
YANG Lei, HAN Yongxia, LIAO Zhiming, et al. Parameter statistics and influencing factor analysis of lightning multiple return ground flashover based on LLS[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7): 115-123.

[19] YAMADA T, MOCHIZUKI A, SAWADA J, et al. Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 393-402.

[20] HARA T, YAMAMOTO O. Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis[J]. Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(3): 283-289.

[21] 甘 艳，顾德文，张 昌，等. 500 kV 架空线路雷电过电压与冲击接地电阻关系[J]. 中国电力，2018，51(9)：118-125.
GAN Yan, GU Dewen, ZHANG Chang, et al. Relationship between lightning overvoltage and impulse grounding resistance of 500 kV transmission line[J]. Electric Power, 2018, 51(9): 118-125.

[22] LIAO Z M, ZHANG J, HAN Y X, et al. Study on factors influencing the impulse withstand capacity of zinc oxide varistors[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 243: 111421.

[23] HAN C L, DU B X, LI J, et al. Investigation of charge transport and breakdown properties in XLPE/GO nanocomposites part 2: effect of polarity reversal[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1213-1221.

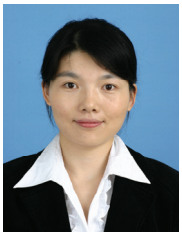
[24] 黄志都，邓雨荣，吴 彪，等. 110 kV 绝缘杆塔输电线路雷电侵入波过电压研究[J]. 南方电网技术，2017，11(1)：45-51.
HUANG Zhidu, DENG Yurong, WU Biao, et al. Research on lighting intruding wave overvoltage of 110 kV insulated tower transmission line[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(1): 45-51.

[25] 李 雍，周 悦，李建明，等. 特高压 GIS 变电站雷电过电压防护研究[J]. 高压电器，2016，52(7)：37-44.
LI Yong, ZHOU Yue, LI Jianming, et al. Research on protection of UHV GIS substation against lightning intruding over-voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 37-44.



何少敏
1999—，女，博士生
主要从事电力系统防雷、长间隙放电等方面的研究工作
E-mail: 1426271605@qq.com

HE Shaomin
Ph.D. candidate



韩永霞(通信作者)
1982—，女，博士，教授，博导
主要从事电力系统电磁暂态分析及防护、电力系统防雷、大数据分析及人工智能技术等研究工作
E-mail: epyxhan@scut.edu.cn

HAN Yongxia
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-07-11 在线出版日期 2025-12-01 编辑 何秋萍