

面向超高压交流输电线路过电压分析的多重雷击波形参数评定方法

王正玺^{1,2} 梁涛^{1,2} 郭桐玮^{1,2} 曾宏³ 崔涛³

- (1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049;
2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610041)

摘要 超高压交流电力系统通常采用标准雷电流参数进行外部过电压核算, 而雷电观测数据表明, 80%以上的雷电过程为多重雷击现象, 同标准推荐波形差异明显, 在超高压交流系统多重雷事故频发的背景下, 亟须提出严谨科学的多重雷参数评定方法。因此, 本文以某500kV交流超高压输电系统为对象, 从极端雷击工况及实际故障录波出发, 提出考虑线路暂态特征的多重雷电流波形参数评定方法。分析表明, 故障录波反演法可表征真实多重雷击情况; 极端雷击工况法从线缆耐雷水平出发, 分析了严苛条件下的雷电流参数。本文提出的波形参数评定方法可为多雷区超高压输电系统的过电压分析提供技术方案。

关键词: 多重雷击; 雷电流波形; 故障分析; 电力系统过电压; 金属氧化物避雷器

Multiple lightning waveform parameter evaluation method for overvoltage analysis of ultra-high voltage alternating current transmission lines

WANG Zhengxi^{1,2} LIANG Tao^{1,2} GUO Tongwei^{1,2} ZENG Hong³ CUI Tao³

- (1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041)

Abstract Ultra-high voltage AC power system usually uses standard lightning current parameters to calculate external overvoltage, and lightning observation data show that more than 80% of the lightning process is multiple lightning strikes, which is significantly different from the standard recommended waveform. Under the background of frequent multiple lightning accidents in ultra-high voltage AC system, it is urgent to put forward a rigorous and scientific evaluation method of multiple lightning parameters. Therefore, this paper takes a 500kV AC ultra-high voltage transmission system as the object, and proposes a multiple lightning current waveform parameter evaluation method considering the transient characteristics of the line from the extreme lightning conditions and the actual fault recording. The analysis shows that the fault recording inversion method can characterize the real multiple lightning strikes. Extreme multiple lightning strikes method analyzes the lightning current parameters under harsh conditions from the lightning resistance level of the cable. The waveform parameter evaluation method proposed in this paper provides a technical scheme for overvoltage analysis of ultra-high voltage transmission system in lightning-prone areas.

Keywords: multiple lightning strike; lightning current waveform; fault analysis; power system overvoltage; metal oxide arrester

0 引言

超特高压电力系统是实现远距离能量输送,解决我国能源供给-需求逆向分布的关键技术,近年来发展迅速。电力规划设计总院16日发布的《中国电力发展报告2024》显示,我国持续完善网架结构,建强电网“大动脉”。截至2023年底,我国220kV及以上输电线路长度约92万km,较2013年增长约69.1%,西电东送规模达3亿kW,较上年增长约400万kW,有力促进了电力资源在全国范围内的优化配置^[1]。超特高压跨区域输电线路长度可达数千公里,输电走廊往往跨越高山、丘陵等地形条件复杂且雷击频发的地区,国内外大量运行经验表明,尽管超高压线路绝缘配合由内部过电压决定,但线路雷击、尤其是短时间内的多重连续雷击是导致系统故障的重要诱因^[2],对系统绝缘构成极大威胁^[3]。相较单次雷击,多重雷波形参数复杂多变,尚无标准化依据开展雷电过电压分析,因此针对超特高压线路实际工况,确定多重雷击参数并支撑外部过电压核算,对系统绝缘配合^[4]及设备配置^[5]至关重要,是当前研究的热点和难点。

国内外雷电监测数据表明,超过80%的地面落雷均为多重雷击^[6-7]。目前,国内外学者在多重雷波形特征识别方面已经开展了大量的研究工作。现阶段,国外已通过美国^[8]、南非^[9]、奥地利^[10]、日本^[11]等地设立的观测点取得了雷击波形的众多参数,而国内也在此方面取得诸多进展,武汉大学^[12]、华北电力大学^[13]等高校,以及浙江省电力研究院^[14]、中国电科院^[15]等相关科研机构针对输电线路均开展了大量工作。但是,由于雷电流传感器的采样率、记录时长等因素限制,所捕捉的雷电流往往存在较大的失真现象。基于雷电监测及工程实践,IEEE C62.41.2及GB/T 21714—2015均对雷击波形做出规范^[16],IEC标准采用“波前时间 T_1 /半峰值时间 T_2 ”为10/350 μ s的电流波形作为直击雷的模拟雷电流波形,IEEE则建议10/350 μ s与8/20 μ s两种直击电流波形,除此之外,2.6/50 μ s波形也常常作为自然雷电流的标准波形用于仿真计算。以上参数仅针对单次雷击波形,在多重雷方面,GB/T 21714—2015标准从建筑防雷角度给出了多重雷直击下的建筑雷电流统计结果,规定了首次正极性雷击时间参数为10/350 μ s,首次负极性雷击时间参数为1/200 μ s,后续雷击时间参数均为0.25/100 μ s。然而,标准统计

结果基于直击雷观测数据,针对具体线路,雷击方式、线路衰减等参数直接影响到变电站内的雷电波形,直接采纳该雷电流波形无法正确考核站内避雷器的动态负荷及能量耐受。

此外,电力系统雷击事故具有偶发性,多重雷会导致更复杂的电磁环境和设备响应需求^[17],仅依据单一雷电流标准无法反映真实故障过程的过电压水平,导致对避雷器的动态响应校核误差较高。从具体故障入手,反演多重雷击的实际波形是构建超特高压外部过电压及绝缘配合理论体系的关键。

由此,本文以某500kV交流输电线路为例,从不同角度提出考虑线路暂态特性的多重雷波形参数评定方案。具体而言,极端雷击工况方法依靠线路耐雷水平进行归算,甄别极端情况下的系统过电压;故障录波反演方法则根据实际录波反推,分析实际多重雷击参数。

1 基于极端雷击工况的多重雷波形参数评定

针对特定的输电线路而言,其防雷水平决定了能够沿线传播雷电过电压的最大幅值^[18],因此在缺乏雷击有效参数的情况下,可结合系统内杆塔结构物理参数,核算系统耐雷水平,确定能传播到站内雷电过电压的极限值。根据线路的耐雷水平可归算出多重雷击的最大幅值,直观反映线路在受到最大雷电能涌入时的过电压程度。

本文以某500kV交流输电线路为典型对象,线路全长223.3km,两端分别连接S1变电站及S2变电站,共设463基杆塔,同塔双回部分长59.8km,过电压监测点为靠近S1变电站隔离开关的线路侧,雷击发生时,输电线路B相两端的隔离开关均断开,系统中接有并联电抗器,考虑的多重雷击事件发生在距离S1变电站112.4km的218号杆塔B相。雷击过程下某500kV输电线路结构如图1所示。

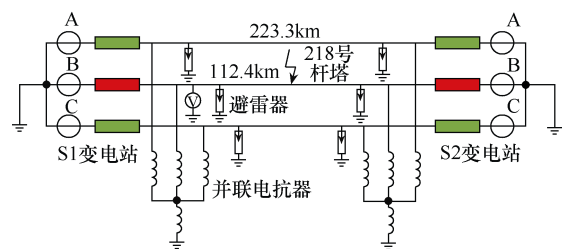


图1 雷击过程下某500kV输电线路结构

雷电流源等效电路如图2所示,采用并联波阻抗的冲击电流源模拟雷击,需确定参数包括波阻抗

Z_0 和雷击电流波形 $i_0(t)$ 。根据 GB 50064, 波阻抗同雷电流幅值相关, 规定雷电通道的波阻抗 Z_0 一般取值范围为 $300 \sim 400 \Omega$ ^[19]。将被击目标等效为波阻抗 Z 时, 流过被击目标的电流 i 满足

$$i = 2i_0 \frac{Z_0}{Z_0 + Z} \quad (1)$$

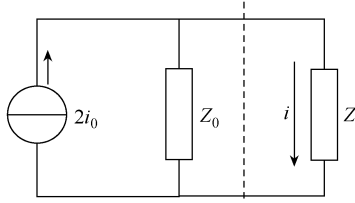


图2 雷电流源等效电路

1.1 雷电流幅值的确定

当线路装有避雷线时, 雷电躲过避雷线的保护击于导线及雷击塔顶两种情况对系统的危害最为突出, 即常被提及的绕击和反击。通过计算线路绕击与反击的耐雷水平, 可获得极端情况下的入侵雷电流幅值, 为多重雷波形参数评定提供关键依据。给定交流输电系统的多重雷波形参数评定流程如图3所示。

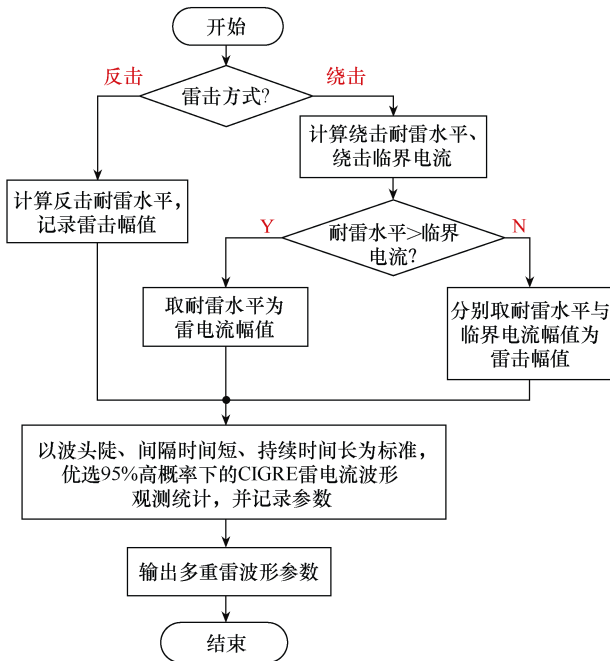


图3 交流输电系统的多重雷波形参数评定流程

1) 反击的最大雷电流幅值

依据 GB/T 311.2—2013, 雷击杆塔耐雷水平 I_1 为

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{(1-k_0k_1) \left[\beta \left(R_{ch} + \frac{L_{gt}}{2.6} \right) + \frac{H_d}{2.6} \right]} \quad (2)$$

式中: $U_{50\%}$ 为绝缘子串 50% 闪络电压, $U_{50\%} = 2445.2kV$; k_0 为导线与避雷线间耦合系数, $k_0=0.22$; k_1 为电晕系数, $k_1=1.28$; β 为杆塔分流系数, $\beta=0.88$; R_{ch} 为杆塔接地电阻, $R_{ch}=5.2\Omega$; L_{gt} 为杆塔电感, $L_{gt}=21.7\mu H$; H_d 为导线平均高度, $H_d=35.5m$ 。据此可计算出雷击点 218 号杆塔 B 相的反击耐雷水平为 $186.33kA$ 。

2) 绕击的最大雷电流幅值

电气几何模型 (electro-geometric model, EGM) 法广泛应用于线路雷击位置的预测, 准确性已得到西欧和美国等地区高压、超高压线路运行数据的验证。本文基于 EGM 击距理论, 分析绕击时雷电流理论最大幅值^[20-21]。图4为线路中雷电流 I (相应击距 r_s) 绕击线路的电气几何模型。对于幅值为 I 的雷电流, 可得相应的击距 r_s 、 r_c 和 r_g 。

$$\begin{cases} r_s = 10I^{0.65} \\ r_c = 1.63 \times (5.015I^{0.578} + U_{ph})^{1.125} \\ r_g = \begin{cases} [3.6 + 1.7 \ln(43 - h_{c.av})] I^{0.65} & h_{c.av} < 40m \\ 5.5I^{0.65} & h_{c.av} \geq 40m \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_s 为雷电对地线的击距; r_c 为雷电对导线的击距; r_g 为雷电对大地的击距; $h_{c.av}$ 为导线对地平均高度; U_{ph} 为导线上工频相电压瞬时值。图4中, 弧 AB 为保护弧, 弧 BD 为暴露弧, DE 平面为大地捕雷面, 不同雷电流幅值 I 所对应的击距 r_s 和 r_c 不同。

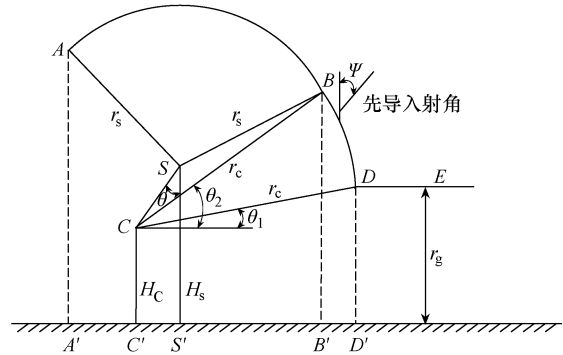


图4 雷电绕击线路的电气几何模型

弧 BD 长度与雷电流幅值密切相关, 雷电流幅值明确超过 I_m 后, 系统不再发生绕击, 在此临界情况下, 存在 $\theta_1 = \theta_2$ 。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin \frac{r_g - H_c}{r_c} \\ \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta - \arccos \frac{r_c^2 + l_{sc}^2 - r_s^2}{2r_c l_{sc}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： θ 为避雷线保护角； H_C 为导线对地高度； l_{sc} 为导线到避雷线距离。

则临界击距 r_{sc} 为

$$r_{sc} = \frac{H_s + H_d}{2 \left[1 - \sin(\theta + \theta_g) \right]} \quad (5)$$

式中： θ_g 为地面倾角； H_s 为避雷线对地平均高度。

依据杆塔布线结构，通过式(3)~式(5)可得雷电绕击线路时的最大绕击电流。计算时取 $H_s=40.6\text{m}$ 、 $H_d=35.5\text{m}$ 、 $\theta=6.5^\circ$ 、 $\theta_g=35^\circ$ ，计算得到临界击距 r_{sc} 为111.6m，临界电流为41.6kA。

绕击情况下，以50%线路绝缘冲击闪络电压为界限，当线路过电压幅值超过此值时，将发生绝缘闪络。在一般的情况下，需选取雷击位置的杆塔进行校验核算，本文选取雷击发生点218号杆塔，计算闪络雷电流幅值为

$$I_{\min} \approx \frac{U_{50\%}}{100} \quad (6)$$

则218号杆塔绕击耐雷水平 $I_{\min}=24.5\text{kA}$ 。

至此，计算得出的临界电流大于绕击耐雷水平，故选取临界电流幅值41.6kA为发生闪络时的最大雷电流，选取耐雷水平24.5kA为不发生闪络时的最大雷电流，相应的雷电通道波阻抗为300Ω，基于此进行两种严苛情况下的归算。

1.2 极端工况多重雷参数确定

根据系统参数可得到极端工况下绕击、反击雷电流的幅值，对于多重雷其他参数，可结合国际大电网会议(international conference on large high voltage electric system, conference international des grands reseaux electriques, CIGRE)对雷电流波形观测统计给出。实际统计结果表明，多重雷的雷击次数多为3~5次^[6]。CIGRE统计的直击雷电流参数见表1。

表1 CIGRE统计的直击雷电流参数

参数	发生概率			雷击类型
	95%	50%	5%	
波头持续时间/ μs	1.80	5.50	18.00	首次负极性雷击
	0.22	1.10	4.50	后续负极性雷击
雷击持续时间/ μs	30.0	75.0	200.0	首次负极性雷击
	6.5	32.0	140.0	后续负极性雷击
时间间隔/ms	7	33	150	多重负极性雷击

统计结果中优选95%高概率下的参数，选取最严苛反击情况下的多重雷击参数见表2，雷击点设置为输电线路218号杆塔处避雷线。

表2 最严苛反击情况下的多重雷击参数

雷击次数	发生时间/ms	波头时间/ μs	波尾时间/ μs	雷击幅值/kA
首次雷击	0	1.80	200	186.33
二次雷击	7	0.22	140	186.33
三次雷击	14	0.22	140	186.33
四次雷击	21	0.22	140	186.33
五次雷击	28	0.22	140	186.33

以闪络与否为判据，分析两种场景下最严苛绕击情况下的多重雷击参数分别见表3和表4，雷击点设置为输电线路218号杆塔附近故障线路。

表3 不发生闪络时最严苛绕击情况下的多重雷击参数

雷击次数	发生时间/ms	波头时间/ μs	波尾时间/ μs	雷击幅值/kA
首次雷击	0	1.80	200	24.5
二次雷击	7	0.22	140	24.5
三次雷击	14	0.22	140	24.5
四次雷击	21	0.22	140	24.5
五次雷击	28	0.22	140	24.5

表4 发生闪络时最严苛绕击情况下的多重雷击参数

雷击次数	发生时间/ms	波头时间/ μs	波尾时间/ μs	雷击幅值/kA
首次雷击	0	1.80	200	41.6
二次雷击	7	0.22	140	41.6
三次雷击	14	0.22	140	41.6
四次雷击	21	0.22	140	41.6
五次雷击	28	0.22	140	41.6

2 基于故障录波反演的多重雷波形参数评定

故障录波反演法从实际雷击观测结果反推，提取录波关键参数，以系统耐雷水平为边界，分析具体雷击过程中的多重雷参数。

2.1 多重雷击时的线路工况

本文所考虑的多重雷击过程发生在某线路B相，受雷击影响，线路B相两侧的出线断路器全部断开，经线路故障巡视，218号杆塔B相串接地端部分悬垂绝缘子有炸裂，横担、钢帽上有明显放电

痕迹,线路中配置的 Y20W—444/1050 避雷器受到严重冲击。

实际事故中,雷击点在输电线路中档,录波装置设置在变电站入口处,距离为 111.68km,多重雷击线路录波如图 5 所示,其中负峰值持续总时间为 8.5ms,正峰值持续时间为 13.2ms。观察其具体电压分布,负极性电压波动具有幅值高、振荡不规律的特点,每一次电压波动都超过避雷器 Y20W—444/1050 的 1mA 参考电压 (610kV);正极性电压幅值更高,波动不大,远高于避雷器的 1mA 参考电压。

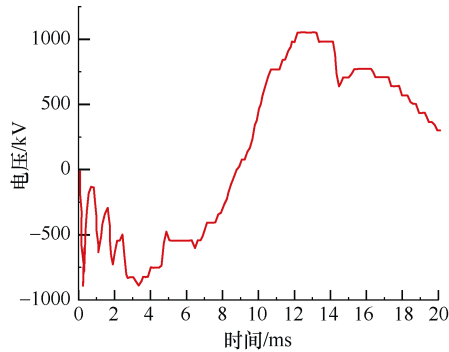


图 5 多重雷击线路录波

首先分析负极性振荡,0~8.5ms 期间,由于此线路 B 相出线断路器已断开,系统不再向输电线路提供能量,故电压振荡全部来自系统外部,显然每次电压突变均是由于新的雷电流注入。突变次数为 4,取突变的相对时间为 0.3ms、1.0ms、1.9ms、2.5ms,对应的电压幅值分别为 -907.4kV、-645.4kV、-716.0kV、-907.4kV,四次雷击均为负极性雷。后续设置 0.3ms、1.0ms、1.9ms、2.5ms、3.2ms 五个时间节点为关键节点,并将对应电压进行对比。

2.2 录波反推多重雷参数确定

多重雷击的参数录波显示,后续雷击均建立在前面雷击的基础上,故对于多重雷波形的还原以四重雷发生的时间顺序进行,对于每次雷击参数的确认,则是按照雷击时间、雷电波头时间、雷击幅值、雷电波尾时间的顺序进行还原。线路中监测装置的数据采集频率为 4kHz,录波间隔为 0.25ms,因为此次四重雷击均为负极性雷,雷击时刻波形骤降,之后再逐渐恢复到工况,故雷击发生时,录波呈现波峰状态,雷击结束后,录波呈现波谷状态,从实际录波所提取的参数定义如下。

第 N 次雷击发生时间:实际录波第 N 次波峰出现的时间。

第 N 次雷击峰值时间:实际录波第 N 次波谷出现的时间。

第 N 次雷击幅值:第 N 次波峰值与波谷值的差值。

第 N 次雷击波尾检测电压:在距离第 N 次雷击峰值时间 0.25ms 后,所检测到的电压值。

其中,雷击发生时间用于确认实际雷击时间,雷击峰值时间用于确定实际雷击波头时间,雷击幅值用于确认实际雷击幅值,雷击波尾检测电压用于确定实际雷击波尾时间。此处以第二次雷击为例,进行雷电参数细节阐述,录波参数分析如图 6 所示,四重雷击的录波参数见表 5。

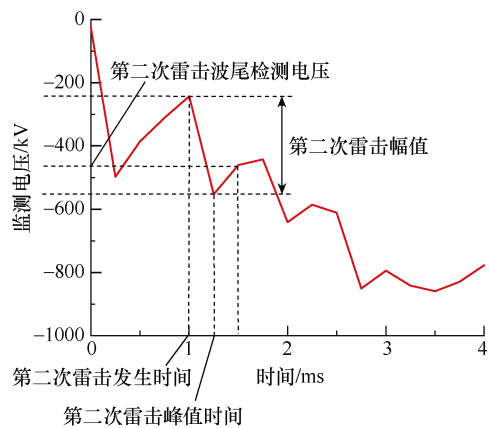


图 6 录波参数分析

表 5 四重雷击的录波参数

雷击次数	发生时间/ms	峰值时间/ms	冲击幅值/kV	波尾检测电压/kV
首次雷击	0	0.25	-473.0	-385.8
二次雷击	1.00	1.25	-309.8	-460.4
三次雷击	1.75	2.00	-198.4	-585.9
四次雷击	2.50	2.75	-239.8	-794.4

综合相关标准及雷电流观测结果,雷电流波头时间调整范围定义为 1~10 μ s,调整步长为 0.1 μ s,若时间调整范围内存在多个符合条件的参数,则以接近标准波头时间 2.6 μ s 为准;半波时间调整范围定义为 20~500 μ s,调整步长为 10 μ s,若调整范围内存在多个符合条件的参数,则以接近标准半波时间 50 μ s 为准;雷电流幅值调整范围定义为 24.5~41.6kA,步长为 0.1kA,以雷击幅值误差最小为准。

四重雷击的参数运算流程如图 7 所示,按照时间顺序对多重雷击进行还原,而参数按照雷击时间、雷电波头时间、雷击幅值、雷电波尾时间的顺序进行还原。录波反演所得雷电流参数见表 6。

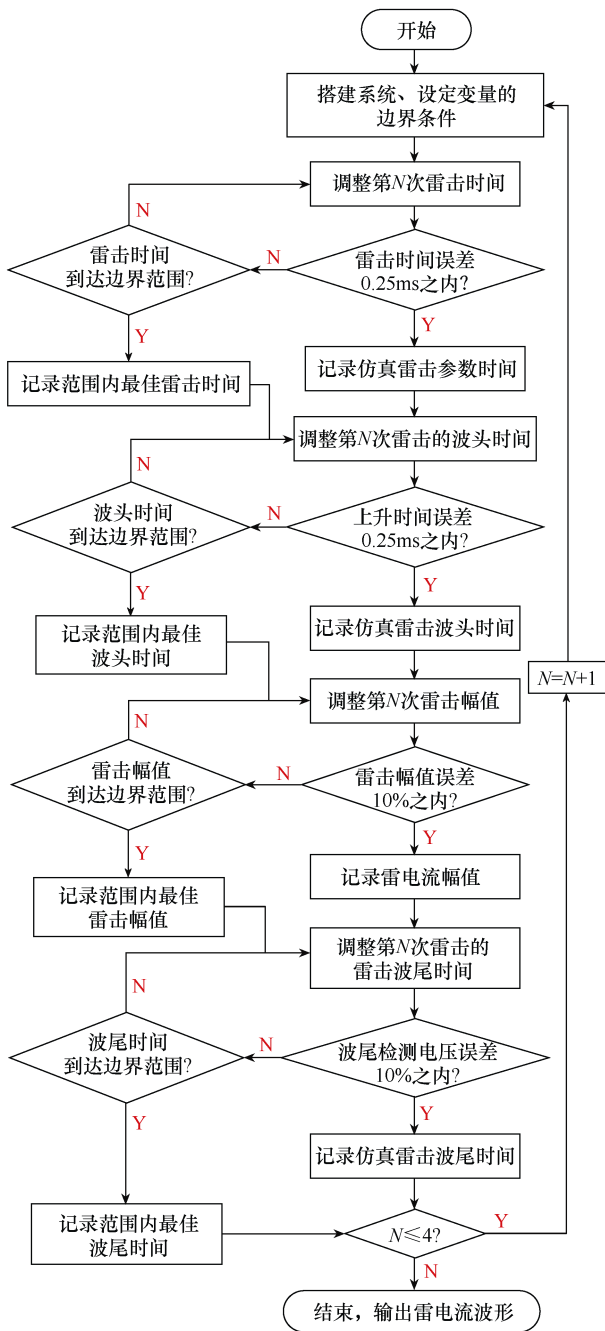


图7 四重雷击参数运算流程

表6 录波反演雷电流参数

雷击次数	发生时间/ms	波头时间/ μ s	波尾时间/ μ s	雷击幅值/kA
首次雷击	0	2.6	70	41.6
二次雷击	0.54	2.6	220	27.5
三次雷击	1.53	2.6	240	28.6
四次雷击	2.13	2.6	280	39.1

最终, 得到关键时间节点的电压对比见表7。由此可见, 录波反推多重雷击参数与实际多重雷击参数相似, 在多个数据点上均有较高的契合度。

表7 关键时间节点的电压对比

时刻/ms	实际电压值/kV	仿真电压值/kV	误差/%
0.3	-907	-887	2.20
1.0	-645	-656	1.71
1.9	-716	-718	0.02
2.5	-800	-882	10.20
3.2	-858	-846	1.40

3 多重雷作用下的系统过电压响应分析

3.1 多重雷激励下电容式电压互感器节点过电压水平

1) 最严苛多重雷击下的系统过电压

结合表1的CIGRE统计规律, 优选95%高概率下的参数, 最严苛反击多重雷参数设置为五重雷击, 雷击间隔为7ms, 首次雷击波形参数为1.8/200 μ s, 后续雷击参数设置为0.22/140 μ s, 雷击幅值均为186.3kA; 最严苛绕击多重雷参数设置为五重雷击, 雷击间隔为7ms, 首次雷击波形参数为1.8/200 μ s, 后续雷击参数设置为0.22/140 μ s, 闪络情况下, 雷击幅值均为41.6kA, 不闪络情况下, 雷击幅值均为24.5kA。对照组雷电波形设置为单次雷击, 雷击波形参数设置为2.6/50 μ s, 根据CIGRE统计规律, 雷击幅值取统计中位值20kA。基于以上参数进行仿真, 得到电容式电压互感器 (capacitor voltage transformer, CVT) 所记录的反击条件、绕击条件、对照组的过电压波形分别如图8~图10所示。

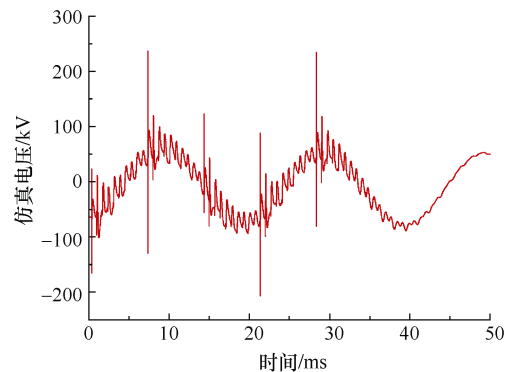


图8 最严苛反击多重雷下母线CVT过电压仿真波形

极端多重雷击下线路不同时刻过电压的对比见表8。由此可见, 反击情况下, 虽然雷电流幅值较大, 能量较高, 但直接雷击点为避雷线, 能量仅靠

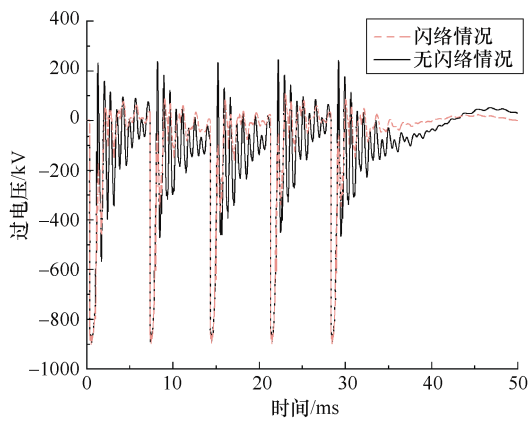


图 9 最严苛绕击多重雷下母线 CVT 过电压仿真波形

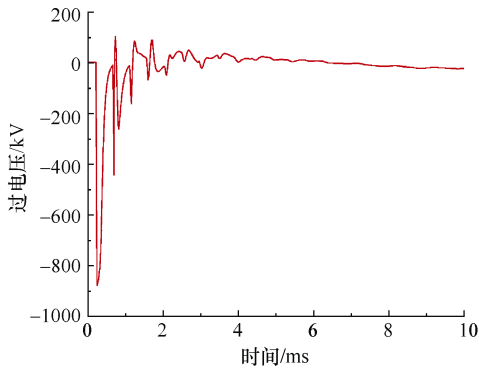


图 10 标准 2.6/50 μ s 雷电作用下母线过电压仿真波形
耦合方式侵入变电站, 仿真过电压幅值并不高, 而绕击多重雷与标准单次雷均使过电压幅值上升至约 880kV。最严苛绕击多重雷与标准单次雷过电压波形对比如图 11 所示, 可见最严苛绕击引发的过电压持续时间较长, 能量远大于标准单次雷所引发的过电压。

表 8 极端多重雷击下线路不同时刻过电压对比

时刻/ms	最严苛多重雷反击过电压/kV	最严苛多重雷绕击(闪络)过电压/kV	最严苛多重雷绕击(无闪络)过电压/kV	标准单次雷过电压/kV
0.3	-125	-886	-893	-873
1.0	-62	-778	-769	-130
1.9	-57	-163	-180	74
2.5	-10	-4	-283	64

2) 故障反演多重雷的母线过电压水平

故障反推多重雷参数设置为四重雷击, 雷击节点为 0ms、0.54ms、1.53ms、2.13ms, 四次雷击波形参数依次为 2.6/70 μ s、2.6/220 μ s、2.6/240 μ s、2.6/280 μ s, 雷击幅值依次为 41.6kA、27.5kA、28.6kA、

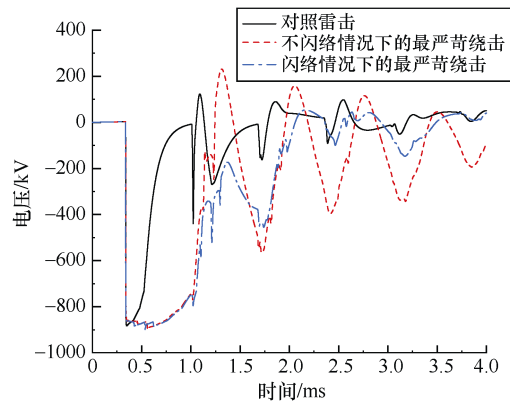


图 11 最严苛绕击多重雷与标准单次雷过电压波形对比
39.1kA。故障反演多重雷作用下的过电压波形如图 12 所示。

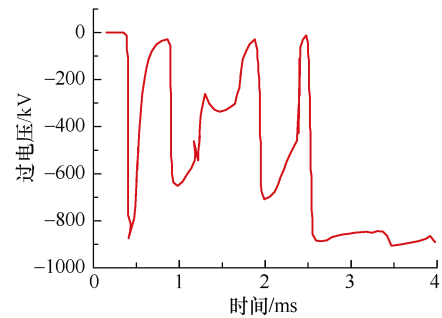


图 12 故障反演多重雷作用下的过电压波形

对比图 6 与图 12 发现, 两者差异较大, 这是因为 CVT 实际录波频率为 4 000Hz, 采样时间间隔为 0.25ms, 而运行时为了尽量还原波形, 均将步长设置到 μ s 级, 若将步长设置为 0.25ms, 则仿真波形如图 13 所示。

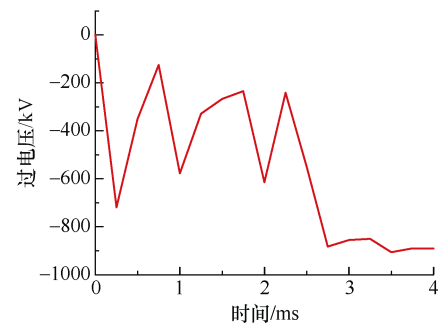


图 13 采样间隔为 0.25ms 的仿真波形

对比图 6 和图 13 可见, 此次仿真波形与实际监测波形趋势一致, 两图的波形参数对应度较高, 关键节点吻合度较高, 因此可以认为仿真电压与录波电压基本吻合。

通过对比图 11 和图 13 发现, 故障反演多重雷与标准单次雷均使过电压幅值上升到约 880kV, 但

故障反演多重雷所引发的过电压持续时间较长，能量远大于标准单次雷所引发的过电压。

3.2 多重雷作用下的出线避雷器动态负荷对比

运行数据表明，多重雷击可导致变电站出线避雷器损伤。为此，考虑 S1 站母线并联出线避雷器(型号为 Y20W—444/1050)，分析多重雷下的避雷器能量吸收。其中，避雷器的参考电压为 610kV，设置其吸收能量与温升之间的关系为 $\Delta Q=68.8\Delta t$ ，环境温度及避雷器初始温度均设置为 25℃。

1) 极端多重雷击下的避雷器负荷

根据 Y20W5—420/1046W 避雷器的伏安特性曲线，设置雷击为线路最大耐受雷水平，无闪络与有闪络情况下，最严苛绕击多重雷击下避雷器的能量吸收过程如图 14 所示。

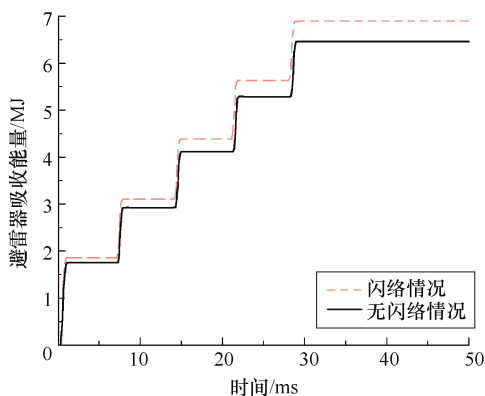


图 14 最严苛绕击多重雷击下避雷器能量吸收过程

无闪络时，避雷器吸收能量为 6.47MJ，此时避雷器有明显的温升效应，温升为 94.0K。最严苛绕击多重雷击避雷器放电电流波形如图 15 所示，结合图 15 中实线（黑色）来看，在此过程中，避雷器明显动作 4 次，流过的最大电流幅值依次为 5 916A、5 726A、5 544A、5 613A、5 730A。

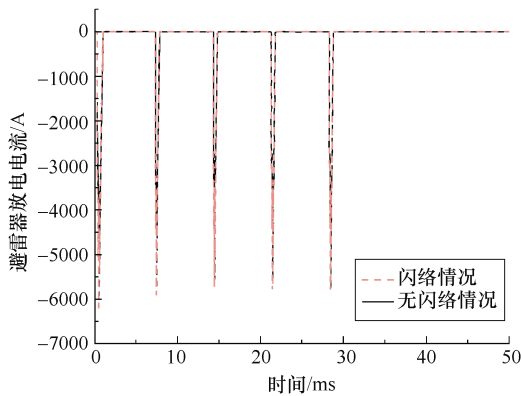


图 15 最严苛绕击多重雷击避雷器放电电流波形

闪络时，避雷器吸收能量为 6.89MJ，此时的避雷器有明显的温升效应，温升为 100.1K。结合图 15 中虚线（红色）所示故障避雷器放电电流波形，在此过程中，避雷器明显动作 4 次，流过的最大电流依次为 6 175A、5 878A、5 679A、5 767A、5 778A。

最严苛反击条件下的多重雷过电压未达到避雷器的动作电压，此时避雷器不动作，故避雷器在此情况下无明显能量积累，温度几乎不升高。

2) 基于故障录波反演的避雷器动态负荷

调整雷击为故障录波反演多重雷波形，计算得到避雷器的能量吸收过程如图 16 所示。

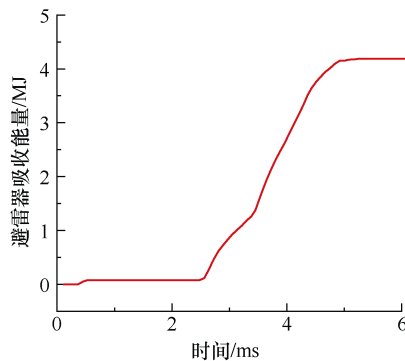


图 16 录波反演多重雷击下避雷器能量吸收过程

避雷器吸收能量为 4.2MJ，温升为 60.6K，温升效应明显。结合图 17 所示故障避雷器放电电流波形，在此过程中，故障避雷器明显动作 4 次，后续 3 次动作时间接近，无法完全分开，因此将避雷器泄放电流的过程分为两次，第一次为 0.3ms，流过避雷器的最大电流值为 2 500A，第二次为 2.5~5.2ms，流过避雷器的最大电流值为 3 387.9A。

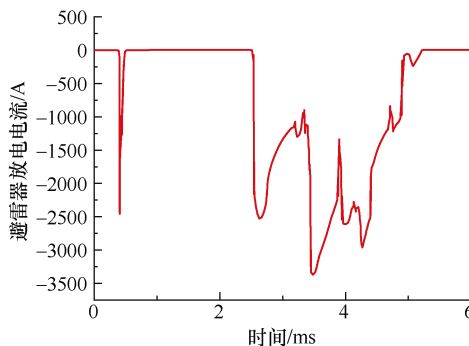


图 17 故障避雷器放电电流波形（录波反演多重雷）

线路遭受标准单次幅值为 20kA 的 2.6/50μs 标准雷击后，过电压波形如图 18 所示。

可见，相较本文所建议的多重雷波形，标准单次雷击所蕴含的能量不大，仅考虑标准单次雷击作为避雷器的选型及设计依据，难以满足多重雷击的

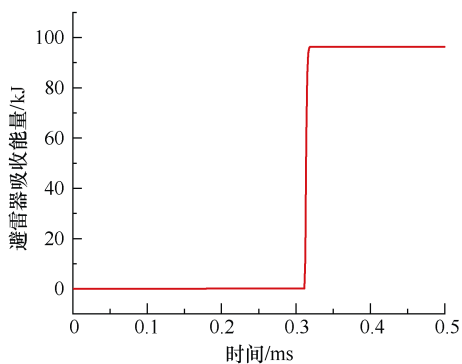


图 18 故障避雷器针对单次标准雷击的放电电流波形防护需求,也可能是引发多起有记录超高压避雷器损伤事故的关键原因。

3.3 小结

第 3 节对极端雷击工况法和故障录波反演法进行了对比论证。从分析结果可见,极端雷击工况法基于工程实际及统计数据,所总结出的雷电参数条件严苛,有效地界定了系统在多次雷击条件下的过电压分析范围;故障录波反演法具有更强的理论依据,仿真过电压与实际过电压关键节点吻合度较高。两种方法各有优势,适用于不同的应用场景。

4 结论

本文提出了面向超高压交流输电线路过电压分析的多重雷波形参数评定方法——极端雷击工况法,综合了线路实际情况及多重雷观测统计结果,为系统的多重雷过电压分析给出了合理边界,同线路参数结合,适用于设计阶段的系统绝缘配合设计;故障录波反演法,参考了每次具体事故的特殊性,通过抓取录波关键数据,将多重雷参数的确定问题转化为最优化方程求解问题,可为阐释偶发事故中的多重雷波形提供依据。

参考文献

- [1] 丁怡婷. 截至去年底我国 220 千伏及以上输电线路长约 92 万公里较 2013 年增长约七成[N]. 人民日报, 2024-07-17(2).
- [2] 胡毅. 输电线路运行故障的分析与防治[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 1-8.
- [3] 秦锋, 王旭桐, 陈伟, 等. 强电磁脉冲下线路绝缘子闪络特性试验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3640-3650.
- [4] 王婷婷. 超/特高压输电线路雷电屏蔽性能方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [5] 杜勇, 黄良灿, 金哲, 等. 基于 EGM 模型的输电通道雷电绕击风险数字化评估现状与展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3900-3909.
- [6] 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.
- [7] AREVALO L, COORAY V. 'The mesh method' in lightning protection standards-revisited[J]. Journal of Electrostatics, 2010, 68(4): 311-314.
- [8] HAGENGUTH J H, ANDERSON J G. Lightning to the empire state building-part III [includes discussion][J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1952, 71(3): 641-649.
- [9] MCCANN G D. The measurement of lightning currents in direct strokes[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1944, 63(12): 1157-1164.
- [10] DIENDORFER G, PICHLER H, MAIR M. Some parameters of negative upward-initiated lightning to the gaisberg tower (2000—2007)[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(3): 443-452.
- [11] TAKAMI J, OKABE S. Observational results of lightning current on transmission towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 547-556.
- [12] 周文俊, 汪涛, 喻剑辉. 架空输电线路雷电流波形实时监测系统[C]//08 全国电工测试技术学术交流会, 中国, 杭州, 2008.
- [13] 张达天. 多通道雷电流测量装置的研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [14] 孙萍, 郑庆均, 吴璞三, 等. 220kV 新杭线 I 回路 27 年雷电流幅值实测结果的技术分析[J]. 中国电力, 2006, 39(7): 74-76.
- [15] 李志军, 尹宜宜, 戴敏, 等. 特高压交流输电线路雷电流监测[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3338-3346.
- [16] IEEE recommended practice on characterization of surges in low-voltage (1000V and less) AC power circuits: IEEE C62.41.2—2002[S].
- [17] 蔡力, 田纳鑫, 魏俊涛, 等. 连续冲击电流脉冲下避雷器阀片电气性能研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(增刊 1): 168-176.

征提取分析,易受现场复杂工况的影响,故障定位准确度不高,而本文所提方法不受系统运行方式、拓扑结构、中性点接地方式的影响,故障定位准确率和故障处置效率更高,工程实用性更好。

4 结论

为解决传统接地故障处置方法接地选段能力不足的问题,本文提出了一种基于外施信号法的级差型接地故障处置方法,通过检测外施信号发生装置的特征电流波形序列数量,形成开关动作策略,实现接地故障的快速隔离。通过案例验证了所提方法的有效性,验证结果表明该方法具有较高的定位准确率,能够快速准确地隔离故障,并有效减少接地故障点上游跳闸开关数量,缩小故障停电范围,具有较大的工程应用前景。

参考文献

- [1] 郭王勇. 智能配电网概论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2024.
 - [2] 徐丙垠, 薛永端, 冯光, 等. 配电网接地故障保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 1-7.
 - [3] LI Jiansheng, LIANG Jun. 10kV straight line fault location based on "signal injection method"[C]//2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, Wuhan, China, 2011: 512-515.
 - [4] 姜健, 鲍光海. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 电气技术, 2015, 16(12): 1-5.
 - [5] 薛永端, 汪洋, 徐丙垠. 小电阻接地系统高灵敏度阶段式零序过电流保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6217-6226.
 - [6] 王建元, 朱永涛, 秦思远. 基于方向行波能量的小电流接地系统故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4085-4096.
 - [7] 龙毅, 欧阳金鑫, 熊小伏, 等. 基于零序功率变化量的配电网单相高阻接地保护[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3687-3695.
 - [8] 杨帆, 金鑫, 沈煜, 等. 基于零序导纳变化的灵活接地系统接地故障方向判别算法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 88-94.
 - [9] 栾晓明, 武守远, 贾春娟, 等. 基于改进零序导纳法的单相接地故障选线原理[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 353-360.
 - [10] 王康, 高伟, 杨耿杰. 基于高频分量的配电网高阻接地故障识别[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 61-66.
 - [11] 罗立波, 高阳, 谷彩连, 等. 基于 S 变换和可信度决策的谐振接地系统故障选线新方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 84-90.
 - [12] 黄劼, 汪逸帆, 林叶青, 等. 基于 K 均值聚类算法的谐振接地系统故障区段定位方法[J]. 电气技术, 2024, 25(3): 24-31.
 - [13] 林骏捷, 林佳壕, 郭谋发. 基于多暂态特征量聚类的配电网接地故障区段定位方法[J]. 电气技术, 2023, 24(5): 16-22.
 - [14] 配电线路故障指示器通用技术条件: DL/T 1157—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
 - [15] 张聪. 基于 FTU 的配电网馈线故障区段定位系统分析[J]. 电子技术, 2024, 53(4): 130-131.
-
- 收稿日期: 2024-07-18
修回日期: 2024-09-23
- 作者简介**
张光儒(1989—), 男, 甘肃省武威市人, 硕士, 主要从事主动配电网和新能源调度、运行控制技术研究工作。
-
- (上接第 22 页)
- [18] 郭巍, 汪德军, 赵江, 等. 镇宁地区 110kV 架空线路雷击跳闸分析及防雷策略研究[J]. 电气技术, 2024, 25(7): 56-61.
 - [19] 施围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
 - [20] 袁涛, 王肖田, 司马文霞, 等. 山区输电线路雷击跳闸预警的融合算法研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2528-2540.
 - [21] 李林, 王永平, 黄志岭, 等. 三峡-常州±500kV 直流输电工程控制保护系统改造[J]. 电气技术, 2022, 23(12): 38-43, 51.
-
- 收稿日期: 2024-08-02
修回日期: 2024-09-19
- 作者简介**
王正奎(2000—), 男, 重庆万州人, 硕士研究生, 主要从事电力系统过电压与绝缘配合。