

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240846

计及高频雷电流下变电站接地网对周边燃气管网系统及新建地网系统阻性耦合影响分析

马成廉¹, 姚新岳¹, 宋萌清¹, 刘春明², 杨茂¹, 孙黎¹

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 针对电网中部分变电站面临的老旧接地网改造升级及周边管网系统安全防护问题, 在工频接地网分析的基础上, 以实际 500 kV 变电站新建接地网改造工程及 220 kV 变电站接地网管道杂散电流干扰防护工程为例进行分析。在应用 ETAP Power Station 及 CDEGS 实际测算的 4 层土壤模型基础上, 结合 CDEGS 接地网仿真软件搭建了新旧地网以及周边金属管道的实际模型。对比分析工频及高频电流下对接地网及其周边构筑的阻性耦合影响, 集中考虑雷电流相较于工频短路电流作用于变电站接地网及周围管网系统时的异同点, 发现变电站接地网在高频雷电流排泄散流过程中的薄弱环节。结果表明, 高频雷电流作用时, 会导致电流入地点处地电位急剧升高, 并且入地电流幅值逐级衰减很快, 对接地网边缘处地电位升影响不大。变电站周边存在金属管道时, 由于瞬态电压的升高, 极易造成管道绝缘层的局部放电, 导致燃气管道绝缘层电位骤降, 造成击穿。

关键词: 变电站; 接地网; 埋地金属管道; 雷击; 阻性耦合

Analysis of the impact of substation grounding network on the resistive coupling of the surrounding gas pipeline system and the newly built grounding system under high frequency lightning currents

MA Chenglian¹, YAO Xinyue¹, SONG Mengqing¹, LIU Chunming², YANG Mao¹, SUN Li¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the analysis of the power frequency grounding network, this paper focuses on the upgrading of the old grounding networks in some substations and the safety protection of the surrounding pipeline systems in the power grid, taking a 500 kV substation's new grounding network renovation project and a 220 kV substation's grounding network pipeline stray current interference protection project as examples. Based on the four-layer soil model calculated using ETAP Power Station and CDEGS, combined with the CDEGS grounding network simulation software, actual models of the new and old grounding networks and surrounding metal pipelines are built. The resistive coupling effects on the grounding networks and its surrounding structures under power frequency and high-frequency currents are compared and analyzed. This paper specifically examines the similarities and differences between the effects of lightning currents and power frequency short-circuit currents on substation grounding networks and surrounding pipeline systems, identifying weak points in the discharge and dispersion process of high-frequency lightning currents. The results show that high-frequency lightning currents cause a sharp increase in the ground potential at the current injection point, with a rapid stepwise decaying of current amplitude, resulting in minimal impact on the ground potential at the edge of the grounding network. When metal pipelines exist around the substation, the sudden rise in transient voltage can easily cause partial discharge in the pipeline insulation layer, leading to a sudden drop in the potential of the gas pipeline insulation layer and resulting in breakdown.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2403000)

Key words: substation; grounding network; buried metal pipeline; lightning strike; resistive coupling

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2022YFB2403000); 吉林省教育厅科学技术研究项目资助(JJKH20230117KJ)

0 引言

随着“双碳”目标的推进,近年来风电、光伏等可再生新型能源发展迅猛,在现代电能中的占比逐渐增大,风电、光伏等可再生能源发电形式逐步发展为我国未来电力系统的主体能源形式^[1-3]。至2023年底,光伏发电装机容量同比增长55.2%;风力发电同比增长20.7%。我国风电、光伏装机总容量约达10.5亿kWh。截至2023年12月底,全国累计发电装机容量约达29.2亿kWh^[4-5]。

新型电力系统构建应以确保安全可靠运行为基本前提,随着新能源比例的逐渐提高,电力系统发电装机容量逐年增大^[6-8],导致很多老旧变电站接地网难以满足现代电力工业的发展,作为保障电力系统安全运行的重要一环,变电站接地网改造工程逐年增多。变电站接地网改造需重点解决改造后地网安全稳定运行问题,以及邻近地下金属管道电磁耦合引发的接地参数变动问题^[9]。

国内外对变电站接地网的研究主要是从对变电站接地网的分析计算开始,文献[10]基于复镜像法模拟多层大地土壤结构,对变电站接地网进行模拟计算。文献[11]基于场路耦合的方法,提出一种不等电位的接地网数值计算方法。在此基础上,文献[12]考虑变电站接地网导体的自感及导体间的互感,并对不等电位数值计算方法进行完善。文献[13]基于矩量法和电路理论提出了一种计算变电站接地网频域性能的新方法。随着研究工作的推陈出新,大量计算变电站接地网数值的新算法、新理论、各种接地计算的商业软件不断完善更迭。到目前为止,CDEGS依然是国内外学者公认的比较完善、精确的接地网数值计算仿真软件,该仿真软件分析相应接地参数(接地电阻、标量电势、接触电压及跨步电压等)的安全限值,对实际工程计算具有一定的参考价值^[14]。

现阶段,由于新能源技术的快速发展,发电装机容量不断刷新历史新高,至今全国累计发电装机容量为29.2亿kWh。变电站接地网作为保障站内设备安全运行的大型散流装置,老旧变电站接地网的更新换代、增容改造已经刻不容缓。在老旧接地网增容改造过程中,有关周边燃气管道、输油管道及新建地网的影响分析,对确定接地网优化改造方案、设置接地网散流导体尺寸、节省绝缘材料、接地网布置面积及整体变电站的经济运行有重要意义。目前,已有一些研究对地下金属管道及新建地网对变电站接地参数的影响进行分析,文献[15]建立接地网及其构筑物的数学模型,并通过电位降法进行测

量,实验结果表明存在金属管道时会对接地电阻测量及地面电位分布产生影响,对原接地网产生一定的电位降 ΔU ,目前已有部分文献对此现象进行说明,并通过改变电压极放置点等措施加以解决^[16-17],但不同土壤环境下金属管道对接地网接触电压、跨步电压等安全指标参数的研究较少。在此基础上,文献[18]针对城市变电站周围存在大量金属管道的问题,基于场路耦合的数值计算方法,建立接地网及管道的数学模型,考虑金属管道散流、标量电势及接地电阻进行计算分析,并说明存在金属管道时接地电阻测试应需注意的主要问题,以减少对接地电阻测量结果的影响;文献[19]应用CDEGS建立变电站新建地网及金属管道的数学模型,基于工频短路条件下不同规模接地网及金属管道参数,分析城市变电站周边金属管道对站内接地网的影响规律;考虑相应的参数进行仿真计算,提出含管道绝缘隔离、地网拓扑优化及电位均衡控制等防护方案,但并未考虑城市变电站地网对其周边燃气管道的影响;文献[20]应用电磁暂态仿真软件ATP-EMTP,以实际220kV双回输电线路为例,探究雷击高压线路对其周边燃气管道的电磁干扰情况,补充了现实工程中雷击线路对燃气管道的影响因素。

综上所述,现阶段对于变电站地网改造工程的研究,主要集中在应用其数学模型进行分析,与现场实际数据相比缺乏一定的现实意义^[21-23]。并且关于雷电流的研究多为雷击输电线路的分析,对于雷电流经接地网排泄至大地的情况考虑较少。针对上述问题,本文以实际220kV变电站接地网管道杂散电流干扰防护工程和500kV变电站新建接地网改造工程为例,基于变电站运维人员采用Wenner四极法实测的土壤分层数据,建立该地区的分层土壤模型,应用ETAP Power station及CDEGS仿真软件,借助Matlab进行数据处理,针对高频雷电流作用工况,对变电站接地网及其周边构筑物阻性耦合进行分析,定量分析结果表明,实际接地网模型在高频雷电流作用下的各项参数与基于实测数据所构建的数学模型分析结果高度一致。最后,基于高频雷电流波形与工频故障电流的对比分析,揭示了接地网在瞬态/稳态工况下的差异化响应特性,为实际变电站接地网优化升级改造提供了一定的理论参考^[24-26]。

1 接地网分析计算方法

1.1 工频电流下接地网分析计算

工频时接地网周围土壤中任意一点电位是接地网的泄漏电流和周围构筑物的杂散电流在该点产生的电位之和,因此求解接地网接地参数的关键是

计算各个导体段上的泄漏电流分布。由于接地网导体拓扑结构复杂且几何形状不规则, 泄漏电流在土壤中的扩散呈现非对称特性, 采用传统的电磁场解析计算方法进行求解十分困难。矩量法(method of moment, MOM)作为一种高精度的电磁场数值求解方法, 其将导体等效成多个小单元, 并通过离散、选配过程将电磁场的算子方程转化为矩阵方程进行求解, 如图 1 所示, 该方法具有较高的精度。本文基于该方法对接地网及其周围构筑物进行定量计算。



图 1 矩量法求解流程图

Fig. 1 Flowchart for solving the method of moment

接地网是由镀锌扁钢或铜绞线构成的网格型拓扑结构, 依据矩量法原理, 将导体分成若干段直导线(假设接地网被分成 N 段导体, 共包含 M 个节点), 以接地网 k 段导体(如图 2 所示)为例进行计算说明。

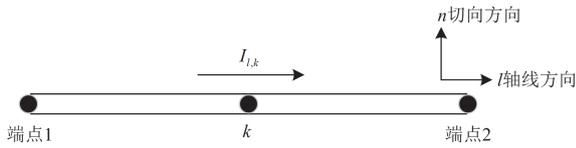


图 2 单段导体

Fig. 2 Single segment conductor

由导体内外电场强度的轴向分量相等, 有

$$Z_{c,k} I_{l,k} = -j\omega \sum_{n=1}^N A_{n,k}^l - \sum_{m=1}^M \nabla \phi_{m,k} \quad (1)$$

式中: $Z_{c,k}$ 为第 k 段导体的内自阻抗; $I_{l,k}$ 为第 k 段导体的轴向电流; ω 为角频率; $A_{n,k}^l$ 为第 n 段导体的轴向电流在第 k 段导体产生的矢量磁位; $\phi_{m,k}$ 为第 m 个节点的漏电流在 k 段导体上产生的电位; $\nabla \phi_{m,k}$ 表示该电位 $\phi_{m,k}$ 的梯度, 反映了 $\phi_{m,k}$ 在空间上的变化情况, 其方向指向电位变化最快的方向, 大小反映电位变化的速率; l 表示导体的轴线方向。对式(1)沿第 k 段导体的端点 1 至端点 2 的轴线方向进行积分, 得到式(2), dl 为沿该轴线方向的微元长度。

$$\int_1^2 Z_{c,k} I_{l,k} dl + \int_1^2 j\omega \sum_{n=1}^N A_{n,k}^l dl + \int_1^2 (\sum_{m=1}^M \nabla \phi_{m,k}) dl = 0 \quad (2)$$

进一步, 设大地的磁导率与空气相同为 μ_0 , 则

$$A_{n,k}^l \text{ 可表示为 } A_{n,k}^l = \frac{\mu_0 I_{l,n}}{4\pi} \left(\int_{l_n} \frac{1}{r} dl_n \right) \cdot \frac{l_k}{l_k}, \text{ 其中 } l_n \text{ 和 } l_k$$

分别为第 n 、 k 段的长度矢量; r 为第 n 段导体上的点和第 k 段导体上的点之间的距离; l_k 为第 k 段导

体的长度; $I_{l,n}$ 为第 n 段导体的轴向电流。由此可得

$$\int_1^2 j\omega \sum_{n=1}^N A_{n,k}^l dl = j\omega \sum_{n=1}^N \left[\frac{\mu_0 I_{l,n}}{4\pi} \int_{l_n} \left(\int_{l_n} \frac{1}{r} dl_n \right) \cdot dl_k \right] \quad (3)$$

式(3)中, 第 n 段导体和第 k 段导体之间的互感为 $L_{n,k}$, $L_{n,k} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_n} \left(\int_{l_n} \frac{1}{r} dl_n \right) \cdot dl_k$, 接地网单段导体的电位差-电流平衡方程表示为

$$Z_{c,k} I_{l,k} + j\omega \sum_{n=1}^N L_{n,k} I_{l,n} + \sum_{m=1}^M (\phi_{m,k_2} - \phi_{m,k_1}) = 0 \quad (4)$$

其中,

$$\phi_{m,k_1} = R_{m,k_1} I_{e,m} \quad (5)$$

$$\phi_{m,k_2} = R_{m,k_2} I_{e,m} \quad (6)$$

式中: ϕ_{m,k_1} 和 ϕ_{m,k_2} 分别为第 m 个节点周围的漏电流在第 k 段导体端点 1 和 2 上产生的电位; $I_{e,m}$ 为第 m 个节点周围的漏电流; R_{m,k_1} 和 R_{m,k_2} 为互电阻, 等于第 m 个节点周围的单位漏电流在第 k 段导体的两个端点 1 和 2 上产生的电位, 可由格林函数计算得到。

由电路定律, 漏电流 $I_{e,m}$ 可表示为

$$I_{e,m} = I_{l,p-1} + I_{l,p-2} + I_{l,p-3} - I_{l,p} \quad (7)$$

式中, $I_{l,p}$ 表示第 p 段导体的轴向电流。第 m 个节点局部泄漏电流分布如图 3 所示。

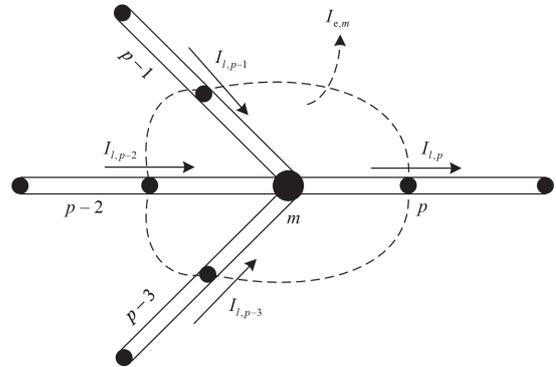


图 3 第 m 个节点局部泄漏电流分布

Fig. 3 Spatial distribution of leakage currents in the vicinity of node m

将泄漏电流表达式代入式(5)和式(6)中得到 ϕ_{m,k_1} 和 ϕ_{m,k_2} , 然后再将其代入相应的电场强度方程, 整理得到一个以轴向电流为未知量的方程 $\sum_{n=1}^N c_{n,k} I_{l,n} = 0$, $c_{n,k}$ 表示第 k 段导体的分段系数, 注入电流用 $I_{i,n}$ ($n=1, 2, \dots, N$) 表示, 置于方程右侧, 最终可得到一个以 N 个轴向电流为未知量的线性方程组, 如式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{i,1} \\ I_{i,2} \\ \vdots \\ I_{i,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{i,1} \\ I_{i,2} \\ \vdots \\ I_{i,N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

对式(8)的矩阵方程进行求解,即可得出泄漏电流的分布情况,由泄漏电流分布即可得到接地网工频参数。

对于实际工程中接地网周边存在金属管网的变电站,其计算过程与接地网单独作用于散流时不同,计算空间任意点的电位应考虑金属管道的分流效应,其值遵循叠加原理,即该点电位为接地网注入电流与金属管道泄漏电流共同作用下的空间电位分布代数和。而对于新建地网与老旧地网的影响,应重点考虑新建地网的注入电流与老旧地网泄漏电流之间的屏蔽效应,其计算过程相对复杂,不能单纯地将新建地网视为与金属管道的电路模型相同。

1.2 高频雷电流冲击下土壤动态电离过程

与工频电流散流过程不同的是,当具有冲击作用的雷电流经接地极入地时,土壤电离区域的形态演变受电场强度梯度分布影响,可将其划分为4个特征性相区:电弧放电区、火花放电、线性区及恒定电导区,雷电流冲击作用下土壤电离划分示意图见图4。

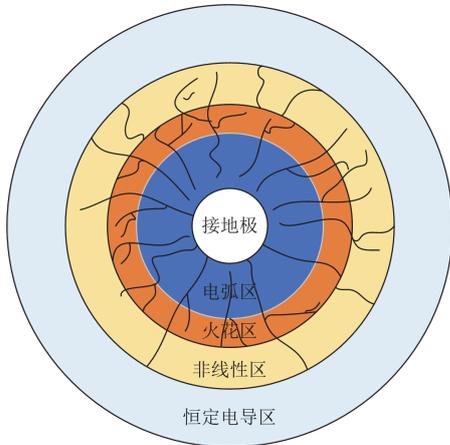


图4 雷电流冲击作用下土壤电离划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of soil ionization division under lightning current impact

1) 电弧放电区

当接地极周围土壤处某一点 o 的场强大于电弧放电场强 E_a 时,在该点的土壤周围会发生电弧放电,此时土壤电阻率将下降至与金属导体电阻率相同的水平。

2) 火花放电区

当接地极周围土壤处某一点 o 的场强处于临界

击穿场强 E_c 和电弧放电场强 E_a 之间($E_c < E < E_a$)时,该点附近土壤会发生火花放电,进而导致土壤电阻率显著降低,此时土壤电阻率可取初始电阻率的7%。

3) 非线性区

当接地极周围土壤处某一点 o 的场强小于临界击穿场强 E_c 时,则该位置周边土壤的电阻率会呈现非线性状态。

综上所述,有关接地网冲击特性的分析中,综合考虑工频电流作用及高频雷电流作用下变电站接地网及其周边构筑物的情况,综合量化了工频接地阻抗与冲击散流特性的交互影响。

2 实际变电站接地网工程模型介绍

2.1 变电站接地网及其周边管网实际模型

本文以实际某220 kV变电站接地网为例进行仿真分析,实际变电站接地网及其周边金属管道模型参数如表1所示。变电站接地网及其周边金属管道相对位置关系如图5所示,该220 kV变电站接地极与燃气管道距离最近的点为两管道连接处,该连接处与接地极的最近距离约为5 m,接地极与燃气管道的并行长度约为20 m。不满足GB50028城镇燃气设计规范中地下燃气管道与220 kV变电站接地体不小于30 m的距离要求。

2.2 新建变电站接地网与老旧地网实际模型

500 kV变电站原接地网与新建地网相对关系示意图如图6所示,原变电站接地网采用“L”形

表1 接地网及周边金属管网模型参数

Table 1 Model parameters of grounding grid and surrounding metal pipe network

项目	参数	取值
接地导体	埋深/m	0.5
	材料	圆钢
	电阻率/($\Omega \cdot m$)	1.7×10^{-7}
	导体半径/m	0.01
	相对磁导率	636
垂直接地极	长度/m	2.5
	材料	铜镀钢棒
地极	直径/m	0.02
	幅值/kA	15
入地电流	波形/ μs	2.6/50
		标准雷电流波形
周边天然气管道参数	埋深/m	1.2
	材料	螺旋缝焊接钢管
	直径/mm	529
	壁厚/mm	8
	设计压力/Mpa	0.4

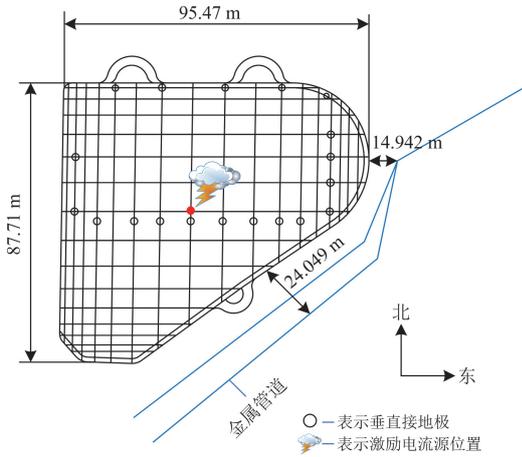


图5 某 220 kV 变电站接地网及其周边燃气管道位置关系
Fig. 5 Position relationship between the grounding network and surrounding gas pipelines of a 220 kV substation

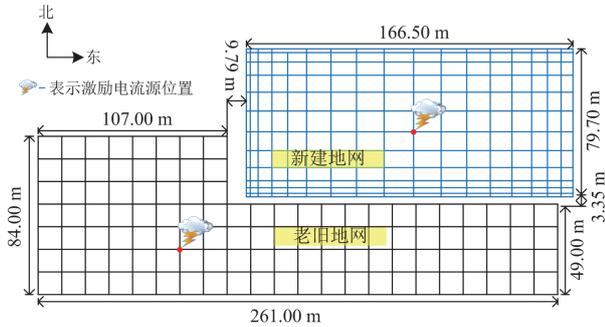


图6 500 kV 变电站原接地网与新建地网相对关系示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the relative relationship between the original grounding network and the new grounding network of a 500 kV substation

等间距接地网，拟在其东北方向新建一个长为 166 500 mm、宽为 79 700 mm 的长方形不等间距接地网。新建地网距原接地网最近距离为 3350 mm，最远距离为 9793 mm。

3 高频雷电流作用下变电站周边管网对变电站接地网阻性耦合影响

3.1 高频雷电流对金属管道与变电站接地网之间的耦合影响

3.1.1 高频雷电流作用下原接地网影响分析

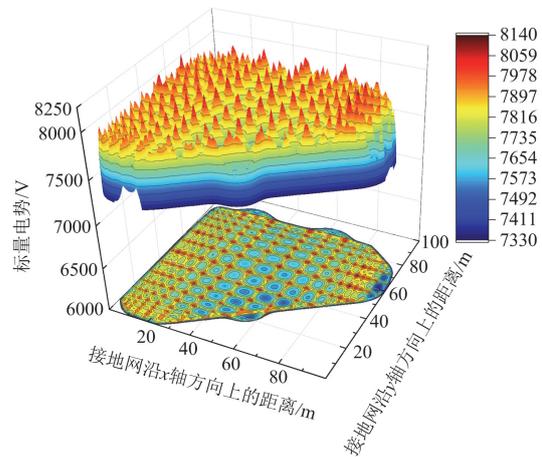
本节以 2.1 节实际 220 kV 变电站接地网模型为例，采用通用计算仿真软件 CDEGS 分析不同频率雷电流对原变电站接地网接地电阻、接触电压和跨步电压等接地参数的影响，并考虑当电站周边存在天然气管道时，对比分析工频短路电流及高频雷电

流对两者接地参数的影响。

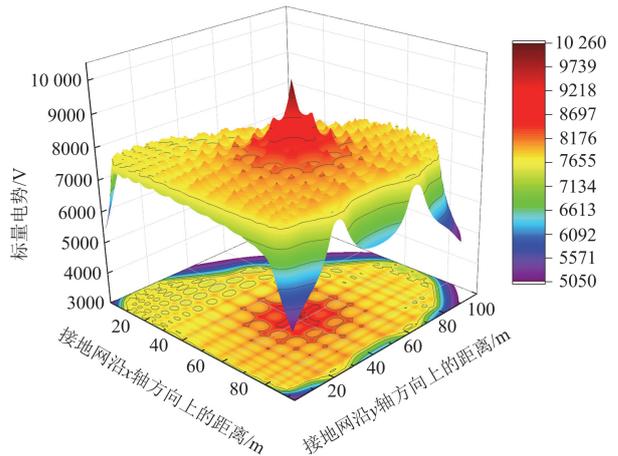
在均匀土壤环境下，变电站接地网的仿真计算模型如图 5 所示。从接地网中心处注入入地电流，电流幅值设置为 15 kA。由于雷电流波形经傅里叶变换可得到相应频谱及能量函数，且能量主要集中在 1~20 kHz 区间，因此本文分别选取入地电流的工频(50 Hz)和雷电流频谱中的主要频率成分(1~20 kHz)开展对比分析。

考虑到仿真实验结果的工程等效性，在 220 kV 变电站接地网几何中心注入标准雷电流波形(波前时间 $T_1 = 2.6 \mu s$ 、半峰值时间 $T_1 = 50 \mu s$)，并与工频(50 Hz)短路电流工况进行对比，分析地电位升(GPR)特性，数据分析结果见图 7。

相比工频电流下接地网地表电势的分布，10 kHz 雷电流对接地网地表电势的影响主要集中在接地电



(a) 50 Hz注入电流



(b) 10 kHz注入电流

图7 雷电流对某 220 kV 变电站接地网地表标量电势影响
Fig. 7 Influence of lightning current on surface scalar potential of grounding grid in a 220 kV substation

流注入点处, 通过分析导出数据发现, 对于该 220 kV 变电站接地网而言, 接地电流注入点处标量电势幅值最高达 10 264 V, 较工频(50 Hz)短路电流工况的最大 GPR 提升 26.09%, 但该电势值沿电流注入点向四周发散后急剧下降, 入地电流周围 5 m 范围内标量电势下降最快, 最高下降速率达 349 V/m。当远离入地电流 25 m 处时, 标量电势下降速率已经很小, 高频雷电流对变电站接地网地电位升高的影响基本上可以忽略不计, 说明雷电流在大地中的扩散、衰减较快。

高频雷电流对 220 kV 变电站接地网地表接触电压的影响如图 8 所示。与标量电势分析结果类似, 注入电流中心处的雷击接地网频率较高、幅值较大, 导致接地网最大接触电压由工频的 880 V 增大到 10 kHz 高频下的 3500 V, 与此同时, 入地电流逐级衰减很快。在距离雷击点 25 m 以外的区域, 雷电流产生的地表电位梯度已衰减至安全阈值以下。需要特别指出的是, 对于面积为 10 000 m² 的接地网,

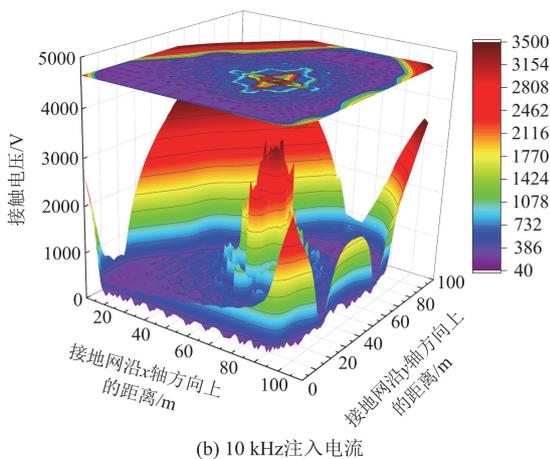
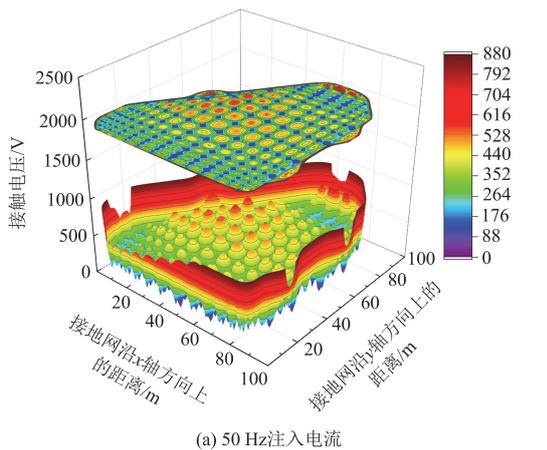


图 8 雷电流对某 220 kV 变电站接地网地表接触电压影响
Fig. 8 Influence of lightning current on surface contact voltage of grounding grid in a 220 kV substation

雷电流在其中心处约 625 m² 范围内对接地网接地参数的影响最大, 导致接触电压增大到大约原来的 3 倍, 超出此范围后雷击接地网与工频短路电流接地时的接地参数差异较小。

为进一步研究高频电流注入对变电站接地网的影响, 沿变电站接地网对角线处布置覆盖全站观测线, 并加入工频 50 Hz 到高频 200 kHz 的入地电流, 数据分析结果见图 9。

由图 9 可知, 在接地电流注入点处, 频率升高对接触电压的影响较大, 这是由于高频大电流在极短时间内注入接地系统, 通过阻性耦合机制引发地电位显著抬升。对此模型的影响范围主要集中在沿对角线方向 40~70 m 范围内, 即在电流注入点周围 15 m 以内影响显著, 而对接地网两端的接触电压影响较小。入地电流频率在 1000 Hz 及以下时接触电压的影响不大, 与工频作用下接地网接触电压的计算值非常接近, 此时高频电流对接触电压的影响可以忽略不计。

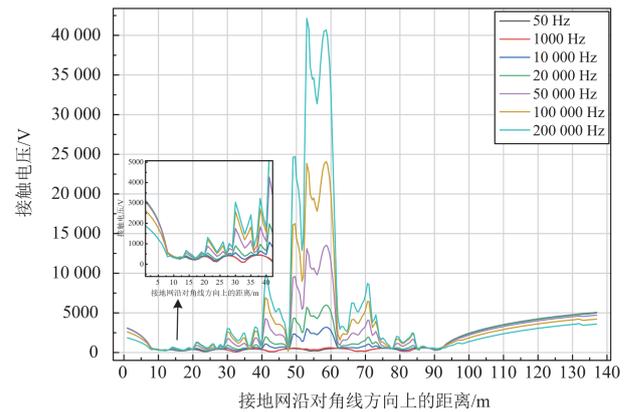


图 9 不同频率电流沿接地网对角线上接触电压分布情况
Fig. 9 Contact voltage distribution of different frequency currents along the diagonal of the grounding grid

3.1.2 高频雷电流对变电站周边燃气管道的影响

某 220 kV 城市变电站周边埋地天然气管道参数如表 1 所示。埋地金属管道特性参数如图 10 所示, 管道建设时采用 3 层 PE 防腐层, 阴极保护采用镁合金牺牲阳极的方式。以该处管道模型参数为例, 建立模型分析变电站泄漏电流对燃气管道阻性耦合的影响。

通过分析图 11 中不同电流频率下管道电位峰值的变化发现, 当工频 50 Hz 电流入地时, 管道承受的电压峰值最小为 4.54 kV, 此时防腐层耐压峰值为 5.33 kV; 随着入地电流频率增大至 50 kHz, 管道电位峰值增大 20.53%, 在 10~50 kHz 频段内增幅显著; 同样在该频段内, 管道涂层电位峰值显著下

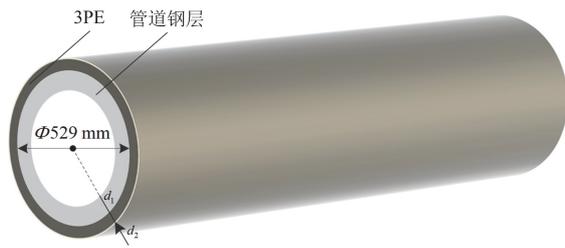


图 10 埋地金属管道特性参数

Fig. 10 Characteristic parameters of buried metal pipelines

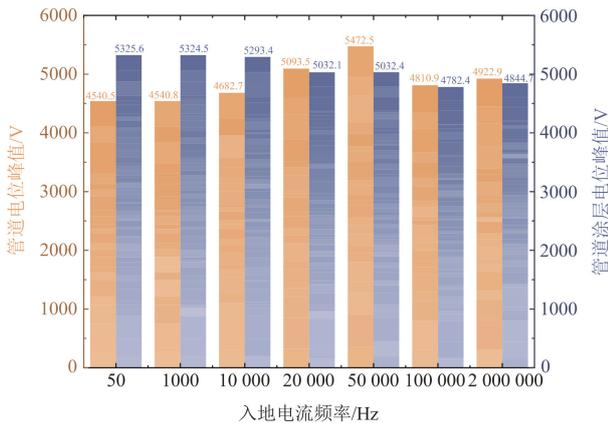


图 11 管道峰值电位随入地电流频率的变化关系

Fig. 11 Relationship between the peak potential of the pipe and the frequency of the incoming current

降，从工频下的 5.32 kV 下降到高频 50 kHz 的 5.03 kV。变电站接地网对地下燃气管道的电磁影响包括：感应耦合影响、阻性耦合影响和容性耦合影响。因短时间内燃气管道受到接地网高频散流电流作用，以阻性耦合为主的传导机制导致其电位峰值显著抬升。由于阻性耦合作用时间短、瞬间电压高，极易造成管道绝缘层的局部放电，导致燃气管道绝缘层电位骤降，造成击穿。

3.2 高频雷电流时新建变电站地网与原接地网之间耦合影响

3.2.1 某 220 kV 老旧地网土壤建模

为使分析数据更具现实意义，本节根据该地区变电站现场 Wenner 法实测勘察数据，结合 ETAP Power station(简称 ETAP)以及 CDEGS 接地仿真平台，建立该地区分层土壤电阻率模型，模型数据对比见表 2。

据现场实测数据，由以上两个软件的分析结果可知，计算值与测量值之间的均方差均在 13%左右，但根据 IEEE Std.80-2000 标准，通常均方值在 10%以内为计算误差偏移允许范围。出现此类误差的原因主要是土壤分层数不合理，因此双层土壤模型的

等效模型可能无法反映该地区实际的土壤情况。

表 2 CDEGS 和 ETAP 双层土壤模型数据对比

Table 2 Comparison of data from CDEGS and ETAP

two-layer soil models				
计算方法	层数	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	厚度/m	均方差/%
ETAP	1	443.19	36.31	13.57
	2	5961.82	∞	
CDEGS	1	435.41	31.21	13.48
	2	4241.01	∞	

为解决此类误差，结合实测勘察数据绘制了土壤电阻率-极间距的关系曲线，该曲线可大致判断土壤的分层结构，不同土壤结构对应的电阻率-极间距的关系曲线有明显区别，分析发现该地区的土壤测试曲线有两个峰值，可能更加贴近 4 层土壤结构的模型，采用 CDEGS 反演算法构建目标区域 4 层土壤结构模型，各层分层厚度及电阻率情况如表 3 所示，对比表 2 发现，4 层土壤模型有效降低了计算值与测量值之间的均方差，使其由原来的 13.57% 降为 6.02%，满足国际标准 10% 以内的要求。

表 3 CDEGS 4 层土壤模型建立

Table 3 Establishment of CDEGS four-layer soil model

层数	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$	厚度/m	均方差/%
1	302.16	1.06	6.02
2	815.26	3.33	
3	303.61	18.90	
4	4195.77	∞	

3.2.2 高频雷电流对某 500 kV 新建变电站接地网的影响

基于表 3 所得到的 4 层水平分层土壤环境，在 CDEGS 中建立 220 kV 变电站老旧接地网及新建 500 kV 变电站接地网模型。注入 10 kHz 雷电流进行分析，并计算该地区接地网 GPR 分布情况。由图 12 可见，当幅值为 15 kA 的 50 kHz 高频电流入侵时，最大标量电势点均在两接地网接地电流注入点处，新建 500 kV 变电站地面最大电势为 4280 V，220 kV 老旧变电站地面最大电势为 4190 V。相较于工频电流下接地网最大电势(3595 V)提高 19.05%。

为了分析不同频率电流作用下新建地网电势的变化情况，在变电站新建地网图 6 所示对角线方向上布置观测线。从图 13 可以看出，当雷电流频率在 1000 Hz 以下时，对接地网的地表电势分布影响较小，可着重优化雷电流入地点处的接地导体布置，如在电流注入点布置垂直导体，相比于密集的水平导体设置，在电流注入点布置垂直导体能更好地减小导体之间的屏蔽效应；当雷电流频率从 10 kHz 上升到 200 kHz 时，对接地网接触电压的影响主要

集中在距电流注入点 40 m 范围内, 呈现高电位、高幅值和高场强的特点, 并以此向两侧迅速下降, 接近接地网边角处近似为等电位, 并且随着电流频率的增大, 该现象更为明显。因此可依据此特点, 根据现场实际土壤条件由雷电流入地点自接地网边缘, 按垂直接地导体长度依次递减的方式布置垂直接地极, 其长度设置可依据不同距离处雷电流衰减幅值来确定, 避免高频雷电流冲击时出现站内接触电压骤增的现象, 保障站内设备及运行工作人员的人身安全。

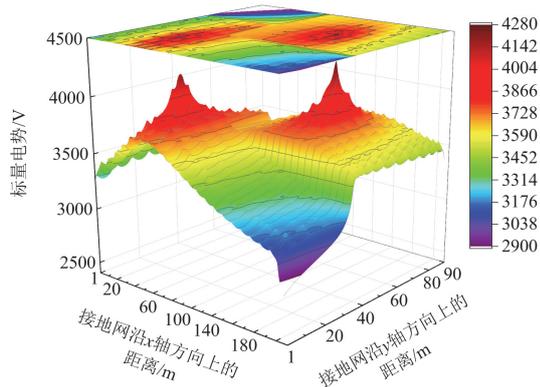


图 12 50 kHz 电流作用下变电站新建地网及老旧地网 GPR
Fig. 12 GPR of new ground grid and old ground grid in substation under 50 kHz current

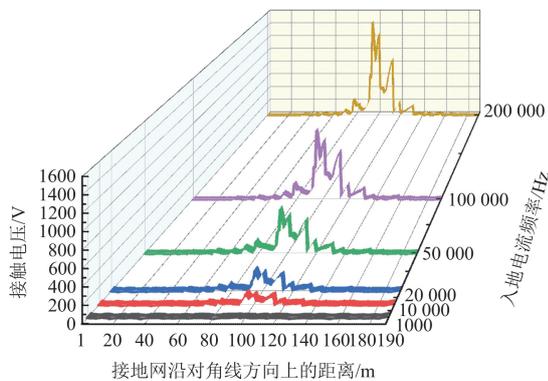


图 13 新建地网接触电压分布情况
Fig. 13 Contact voltage distribution of the newly built ground network

图 14 为新建变电站接地网对角线上电场强度的分布情况, 当频率为 1 kHz 以上时, 每段观测线上都会出现电位峰值, 该分布规律与其接触电压分布规律相似, 电场强度分布中心接地电流注入点处电场强度高, 远离接地电流注入点的电场强度逐步下降, 并且随着电流频率的升高, 其电场强度下降较快。总体来看, 随着高频率大幅值的雷电流入地,

更应该做好接地网接地极处的散流分布及接地网优化设计散流方案, 用以应对雷暴天气下的雷电流散流, 降低雷电流短时冲击带来的高电位峰值、高场强, 以免造成站内重要电气设备的损坏及保障站内运行工作人员的安全。

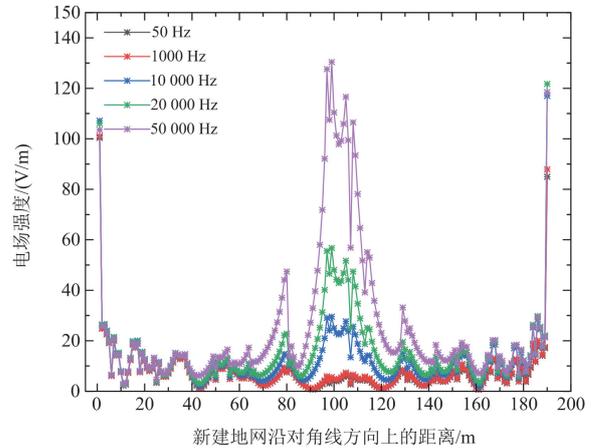


图 14 新建变电站接地网电场分布情况
Fig. 14 Distribution of electric field in grounding grid of newly built substation

4 结论

结合实际工程, 集中考虑高频雷电流作用对接地网及其周边构筑的阻性耦合影响, 对比工频短路电流对接地网的影响, 分析得出接地网在高频雷电流泄放散流过程中的薄弱部位, 得到如下结论。

- 1) 相较于工频接地网的分析计算方法, 鉴于电场强度的急剧攀升, 具有冲击作用的高频雷电流, 土壤电离过程需作为重点考量因素。
- 2) 对于本文 220 kV 变电站接地网管道杂散电流干扰防护工程, 应主要考虑接地网散流作用对金属管道阻性耦合的影响, 由于阻性耦合作用时间短、瞬间电压高, 极易造成管道绝缘层的局部放电, 导致燃气管道绝缘层电位骤降, 造成击穿。随着雷电流频率的增大, 管道电位峰值也随之增大, 其中在 10~50 kHz 频段内增幅显著。

3) 对于本文 500 kV 新建变电站接地网工程而言, 当雷电流频率在 1000 Hz 以下时对接地网的地表电势分布影响较小; 分析发现高频雷电流对新建接地网接触电压的影响主要集中在距电流注入点 40 m 范围内, 可集中优化设计该范围内的接地网布置, 以应对季节性多发雷暴天气的影响, 保证站内运行人员及重要电气设备的安全。

参考文献

[1] 张启龙, 陈湘潭. 考虑风电消纳多向量流系统的遗传

- 优化方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 115-121.
ZHANG Qilong, CHEN Xiangping. Genetic optimization method for multi-vector flow system considering wind power consumption[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 115-121.
- [2] 朱慧敏, 苑舜, 李春来. 含储能环节的光伏电站虚拟同步发电机控制策略与分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 45-50.
ZHU Huimin, YUAN Shun, LI Chunlai. Control strategy and analysis of virtual synchronous generator of photovoltaic power plant with energy storage link[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 45-50.
- [3] 袁庆伟, 吴扣林, 谢晔源, 等. 不平衡电网下风电并网逆变器直接正负序功率控制[J]. 供用电, 2023, 40(1): 88-96, 104.
YUAN Qingwei, WU Koulin, XIE Yeyuan, et al. Direct positive and negative sequence power control of wind power grid-connected inverter under unbalanced grid condition[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(1): 88-96, 104.
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL]. [2022-01-30]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.
- [5] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2024-01-26]. http://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
National Energy Administration. National Energy Administration releases 2023 national power industry statistics[EB/OL]. [2024-01-26]. http://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
- [6] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [7] 马成廉, 赵宇, 宋萌清, 等. 基于新能源发电品质量化与负荷时序匹配的功率品质划分模型研究[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(2): 42-50, 78.
MA Chenglian, ZHAO Yu, SONG Mengqing, et al. Research on power quality segmentation model based on new energy power generation quality quantification and load timing matching[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(2): 42-50, 78.
- [8] 何磊, 唐宝锋, 薛林, 等. 新型电力系统背景下智慧配电网物联网云主站建设与应用[J]. 供用电, 2023, 40(7): 25-32.
HE Lei, TANG Baofeng, XUE Lin, et al. Construction and application of intelligent power distribution internet of things cloud aster station under the background of new power system[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(7): 25-32.
- [9] CASSOLA F, BURLANDO M. Wind speed and wind energy forecast through Kalman filtering of numerical weather prediction model output[J]. Applied Energy, 2012, 99: 154-166.
- [10] 李中新, 袁建生, 张丽萍. 变电站接地网模拟计算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 76-79.
LI Zhongxin, YUAN Jiansheng, ZHANG Liping. Numerical calculation of substation grounding systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 76-79.
- [11] 李中新, 袁建生, 张丽萍. 变电站接地网不等电位模型数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 1-3.
LI Zhongxin, YUAN Jiansheng, ZHANG Liping. Calculation of substation grounding grids with unequal-potential model[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 1-3.
- [12] 鲁志伟, 文习山, 史艳玲, 等. 大型变电站接地网工频接地参数的数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 92-96.
LU Zhiwei, WEN Xishan, SHI Yanling, et al. Numerical calculation of large substation grounding grids in industry frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 92-96.
- [13] 张波, 崔翔, 赵志斌, 等. 计及导体互感的复杂接地网的频域分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 81-84, 122.
ZHANG Bo, CUI Xiang, ZHAO Zhibin, et al. Analysis of the complex grounding grids in frequency domain considering mutual inductances[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 81-84, 122.
- [14] 王小凤. CDEGS 软件在电力系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [15] 何金良, 余绍峰, 曾嵘, 等. 变电所附近地下构筑物对接地电阻测量的影响[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 1-2.
HE Jinliang, YU Shaofeng, ZENG Rong, et al. Influence of neighboring underground metal object on measurement of substation grounding resistance[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(1): 1-2.
- [16] 李渊博. 大型变电站接地网接地电阻短距测量方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [17] 李哲. 地下金属管道对变电站接地网接地电阻及其测量的影响[J]. 自动化应用, 2023, 64(10): 71-73.
LI Zhe. Influence of underground metal pipeline on

- grounding resistance of substation grounding grid and its measurement[J]. Automation Application, 2023, 64(10): 71-73.
- [18] 张海峰, 王丰华, 金之俭, 等. 地下金属管道对变电站接地网接地电阻及其测量的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 134-140.
ZHANG Haifeng, WANG Fenghua, JIN Zhijian, et al. Impacts of underground metal pipelines on grounding resistance of substation grounding grid and its measurement[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 134-140.
- [19] 马成廉, 姚新岳, 王乐天, 等. 变电站周围管网及新建地网系统对原接地网特性参数的影响[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 1-9, 21.
MA Chenglian, YAO Xinyue, WANG Letian, et al. Impacts of the pipe network around the substation and the new grounding system on the characteristic parameters of the original grounding grid[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 1-9, 21.
- [20] 史志强, 张浩, 熊肖容, 等. 雷击高压输电线路对邻近输气管道的电磁影响[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 178-183, 189.
SHI Zhiqiang, ZHANG Hao, XIONG Xiaorong, et al. Electromagnetic effect on the adjacent gas pipeline of the lightning strike on HV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 178-183, 189.
- [21] BHOSALE M J, KARANDIKAR P B, KULKARNI N R. An optimal design for grounding grid configuration with unequal conductor spacing[J]. Advances in Engineering Software, 2023, 176.
- [22] 陈伟伟, 吕盼, 纪凤坤, 等. 基于多维度检测与Petri网的变电站接地故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 152-159.
CHEN Weiwei, LÜ Pan, JI Fengkun, et al. Risk assessment of substation grounding fault based on multidimensional detection and Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 152-159.
- [23] PERMAL N, OSMAN M, ARIFFIN A M, et al. Effect of non-homogeneous soil characteristics on substation grounding-grid performances: a review[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16).
- [24] 陈志峰, 沈娜, 王珏, 等. 高渗透率水电接入的变电站备自投逻辑优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 157-164.
CHEN Zhifeng, SHEN Na, WANG Xuan, et al. Logic optimization of a transformer substation busbar automatic transfer switch with high penetration of hydropower[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 157-164.
- [25] 耿新, 马文恒, 武琼, 等. 新能源大规模并网环境下变电站防孤岛技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 161-171.
GENG Xin, MA Wenheng, WU Qiong, et al. Islanding prevention technology for substations in the context of large-scale grid connection of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 161-171.
- [26] 王艳婷, 莫文斌, 白明远, 等. 基于电压行波波形特征的柔性直流输电线路雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 31-44.
WANG Yanting, MO Wenbin, BAI Mingyuan, et al. Lightning interference identification method based on voltage traveling wave waveform characteristics for flexible DC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 31-44.

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-08-21

作者简介:

马成廉(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为含直流输电的电力系统稳定与控制、能源互联网与柔性电网络、电力装备与智能运行控制; E-mail: 13014320646@163.com

姚新岳(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统接地技术; E-mail: 18189795496@163.com

孙黎(1983—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电技术。E-mail: sunlinedu@163.com

(编辑 许威)