

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.021

变电站接地网接地散流与热稳定性仿真计算研究

张建伟¹, 毛惠卿², 安韵竹¹, 高涛², 陈翼², 穆明亮²

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司滨州供电公司, 山东 滨州 256600)

摘要: 柔性石墨复合接地材料作为一种非金属防腐接地材料在输电线路杆塔的接地散流与防腐方面有良好的表现,但在变电站的应用中,柔性石墨复合接地材料在故障电流入地时存在熔断的风险。针对柔性石墨材料在变电站中的应用,文中采用 Comsol Multiphysics 仿真软件搭建仿真模型,对比分析柔性石墨接地网与传统金属接地网的散流特性与温升特性,分析入地电流幅值、土壤特性与入地位置对接地网散流特性与热稳定性的影响。仿真结果表明:在雷击作用时,柔性石墨接地网与传统金属接地网的散流效果相近,雷电流入地时不存在熔断风险,地表电位主要集中在入地点附近;在工频短路电流作用下,土壤参数对柔性石墨接地网温升的影响不明显,入地点越接近接地网边缘温升越高,接地网的引下线部分最高温度接近 300 ℃,超出柔性石墨接地材料的热稳定阈值,因此为保证接地网的安全稳定运行需对引下线进行改进。文中研究结论可为变电站接地网中非金属柔性石墨复合接地材料的应用提供理论参考。

关键词: 柔性石墨复合接地材料; 变电站; 接地网; 散流特性; 热稳定性

Simulation Calculation Study of Ground Dispersion and Thermal Stability for Substation Grounding Grid

ZHANG Jianwei¹, MAO Huiqing², AN Yunzhu¹, GAO Tao², CHEN Yi², MU Mingliang²

(1. Electrical and Electronic Engineering College, Shandong University of Technology, Shandong Zibo 255000, China; 2. State Grid Binzhou Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Shandong Binzhou 256600, China)

Abstract: Flexible graphite composite grounding material, as a non-metallic anti-corrosion grounding material, exhibits good performance in ground dispersion and corrosion protection for transmission line towers. However, when fault current flows into the ground within substation application, it is at risk of fusing. Aiming at the application of flexible graphite materials in substations, in this paper the Comsol Multiphysics simulation software is used to set up a simulation model, the scattering characteristics and temperature rise characteristics of flexible graphite grounding grid and traditional metal grounding grid are compared and analyzed, and the influence of ground current amplitude, soil characteristics and ground entry position on the scattering characteristics and thermal stability of the grounding grid is analyzed. The simulation results show that, in case of lightning strike, the scattering effect of the flexible graphite grounding grid and traditional metal grounding grid is similar, there is no risk of fusing when the lightning current enters into the ground, and the surface potential is mainly concentrated near the entry point. In case of power frequency short-circuit current, the influence of soil parameters on the temperature rise of flexible graphite grounding grid is not obvious. The closer the entry point is to the edge of the grounding grid, the higher the temperature rise, and the maximum temperature of the down conductor part of the grounding grid is close to 300 ℃, exceeding the thermal stability threshold of the flexible graphite grounding materials. Therefore it is necessary to improve the down conductor in order to ensure the safe and stable operation of the grounding grid. The research conclusion in this paper can provide a theoretical reference for the application of non-metallic flexible graphite compos-

收稿日期:2026-01-06; 修回日期:2026-03-17

基金项目:国网山东省电力公司科技项目基金资助(SGTYHT/21JS225)(520615220001)。

Project Supported by Science and Technology Project Fund of State Grid Shandong Electric Power Company(SGTYHT/21JS225)(520615220001).

ites in substation grounding grid.

Key words: flexible graphite composite grounding material; substation; grounding grid; diffusion characteristics; thermal stability

0 引言

变电站接地网^[1-3]作为故障电流及雷电流入地通道,对于电力系统安全稳定运行、保障工作人员安全性的作用不言而喻^[4-9]。现行的电力系统接地网材料常采用扁钢、锌包钢、铜包钢、铜等金属材料,其中除价格较为昂贵的铜接地材料耐腐蚀性能较好之外,其他金属材料的接地网均易遭受土壤的腐蚀^[10-13]。针对金属接地材料存在的易腐蚀问题,一些非金属接地材料应运而生,其中柔性石墨材料由于其耐腐蚀性强、力学结构稳定以及运输方便等优点受到广泛关注^[14-16]。

对于柔性石墨材料接地网在电力系统中的应用,李恒真等人^[17]通过试验对柔性石墨的耐腐蚀能力进行了检测,结果表明在柔性石墨接地体的接头处是接地体防腐的重点并提出了解决方案。文[18]通过对比分析得出高土壤电阻率下接地体流入冲击电流时,柔性石墨复合材料接地体相对镀锌钢有更长的有效长度。肖微等人^[19]通过有限元仿真对比分析了柔性石墨材料的电磁特性,进而改进并制备了扩径石墨复合接地材料,并结合实际案例分析了其可行性。詹清华等人^[20]针对石墨、锰铜和钢3种接地材料进行了仿真建模计算,对比分析了3种接地材料在不同条件下的冲击散流特性。文[21]采用电磁-温度耦合有限元计算方法模拟短路电流作用下接地导体的散流及地中温升过程,而后结合侵蚀算法模拟接地导体的过热失效并给出了降低接地导体端部温升的方法。但是以上研究主要针对柔性接地材料在输电杆塔接地网中的应用与对比分析,而针对柔性石墨材料在变电站等大面积接地网中的应用研究较少,因此有必要对柔性石墨材料在变电站中的应用进行针对性研究。

文中采用柔性石墨材料搭建变电站接地网,通过模拟仿真研究在遭受入侵雷与工频短路电流情况下的散流特性和温升情况,并与相同情况下的扁钢接地网、扁铜接地网进行仿真对比,分析柔性石墨接地网的接地散流特性并计算其在接地散流时的最大温升,以此验证柔性石墨材料的热稳定性,由此分析其应用在变电站接地网的可行性,为之后在实际工程中的应用提供参考。

1 仿真模型及参数

1.1 接地体动热稳定性

在变电站中,接地网材料的选择直接影响着接地网的技术经济指标,特别是在变电站容量和电压等级不断提高,接地短路电流和接地网尺寸越来越大的情况下,合理地选择接地导体材料更加重要^[22]。接地系统的接地网导体、连接线、接地引下线应具有良好的导电性、热稳定性、抗弯折性以及防腐蚀性等性能^[23]。在新型接地材料应用中,需综合考虑多种因素,避免片面采用大尺寸导体^[24]。

在变电站发生雷击或短路故障时,流入接地网的人地电流一般在几kA到几十kA,而且由于持续时间取决于离短路点最近的断路器的主继电器保护装置动作时间与断路器分闸时间之和,一般只有零点几秒,在这样短的时间里产生的热量来不及散入周围土壤介质中,几乎全部热量用来使接地体升温,于是可能导致接地体温度超过允许值,甚至发生熔断。

$$\Delta T = \frac{E}{V\rho C_p} \quad (1)$$

式(1)中: E 为短路电流产生的能量; V 为接地导体的体积; ρ 和 ΔT 分别为导体的电阻率及吸收能量 E 后的温升; C_p 为导体的定压比热。

当接地导体的最高温度超过一定值并在土壤中自然冷却后,接地导体的机械性能就会剧烈下降,特别是在导体之间的连接处,所以若再遇到短时大电力作用,接地导体就会有很大可能遭到破坏。而当短路电流很大,接地导体温度很高,达到接地材料的熔点时,导体将被熔化。这两种情况都有可能使接地网导体发生断裂,接地网发生解体,大大降低了接地网的可靠性^[25]。

1.2 变电站入侵雷电流波形及参数

由于变电站内安装有避雷针等防雷设备,在实际运行中雷直击变电站内设备的概率非常小,因而可将雷电直击变电站的情况忽略不计,在常见的雷击事故中,雷电入侵变电站造成的损害情况最为严重^[26-27]。因此文中将雷击近站线路杆塔发生反击产生的雷电侵入波作为输入电流进行模拟仿真。雷击近站杆塔侵入变电站示意图见图1。

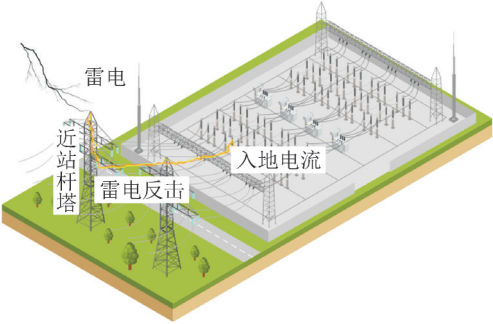


图1 雷击近站杆塔侵入变电站示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lightning strike near the tower intrusion into the substation

根据图1采用ATP-EMTP仿真软件搭建变电站入侵雷电流仿真模型^[28-29],其中雷电流模型采用2.6/50 μs双指数波模拟雷电流

$$i(t)=1.058I_m(e^{-1.5\times10^{-2}t}-e^{-1.86t})$$
 (2)

式(2)中: I_m 为雷电流幅值,在100~200 kA范围变化; t 为时间,经仿真得幅值为100 kA入侵雷电流的入地电流波形见图2。

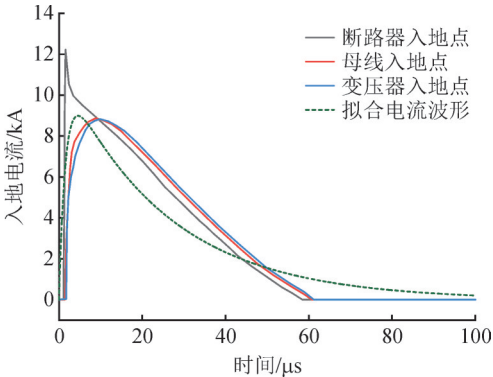


图2 入侵雷电流波形特征

Fig. 2 Waveform characteristics of intrusive lightning current

由图2可得,在断路器入地点的入地电流幅值更高,而且随着雷电流幅值的变化,入地电流的幅值会随之变化,通过拟合函数可以得到拟合曲线如图2中的拟合电流波形所示,经仿真得入地电流的幅值随着雷电流幅值的升高而升高,雷电流幅值在100~200 kA范围变化时,拟合曲线的幅值在10~30 kA范围内变化。

1.3 工频短路电流及参数

在电力系统可能发生的各种故障中,最为严重的是短路故障,一般分为变电站站内短路和站外短路两种类型。与站外短路相比,站内短路对变电站安全运行有更大的危害,更容易引起站内一次高压设备绝缘故障。其中,单相短路接地故障作为一种非对称短路故障,其实际运维工程中发生概率较高^[30]。因此,文中的变电站短路入地电流主要针对单相短

路故障与双相短路故障进行模拟仿真。变电站母线短路示意图见图3。

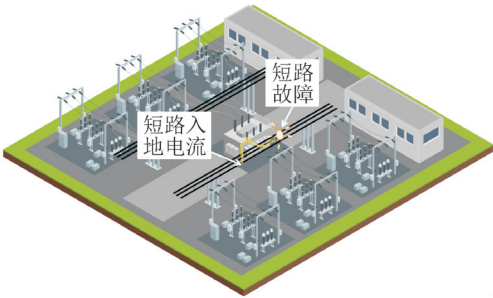


图3 变电站母线短路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of short circuit of substation busbar

根据图3所示的变电站母线短路示意图采用ATP-EMTP软件搭建变电站短路计算模型,其中500 kV高压侧短路点设为d₁,220 kV低压侧短路点设为d₂,经仿真计算得短路电流大小见表1。

表1 短路电流仿真计算结果

短路点	单相短路		两相短路		三相短路	
	总短路	短路入	总短路	短路入	总短路	短路入
	电流	地电流	电流	地电流	电流	地电流
d ₁	21.65	11.39	21.12	13.70	20.22	0.00
d ₂	13.77	2.94	13.63	3.29	12.40	0.00

由计算结果可见,在d₁处短路时总短路电流和入地短路电流较大,其中单相短路时总短路电流最高,其次是两相接地短路。就入地短路电流而言,三相短路由于属于对称型短路,短路入地电流近似于零,两相接地短路时的入地短路电流较单相短路时要高,其中入地短路电流最大为13.7 kA,最小为2.94 kA。

1.4 变电站接地网仿真模型及参数

通过变电站接地网仿真分析柔性石墨材料接地网相对铜接地网与镀锌钢接地网的接地散流特性与温升特性,进而验证柔性石墨接地的热稳定性,3种材料的基础参数见表2^[31]。

表2 材料基本参数

参数	柔性石墨材料	镀锌扁钢	扁铜
电导率/(S·m ⁻¹)	30 769.23	5.90×10 ⁶	5.70×10 ⁷
相对介电常数	12	1	1
恒压热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	710	465	385
导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	127	40	400

文中根据仿真得出的入地电流波形特征,通过Comsol Multiphysics仿真软件,采用50 mm×5 mm扁钢接地材料、50 mm×5 mm铜接地材料和现有φ40 mm柔性石墨接地材料分别搭建的接地网仿真模型,接

地网大小为100 m×100 m,接地网导体等间距布置,间距为10 m,接地网埋深0.8 m,初始温度 T_0 设为20℃,选定接地网中心作为观测线,观测线上距中心点25 m处为观测点,搭建的接地网仿真模型见图4。

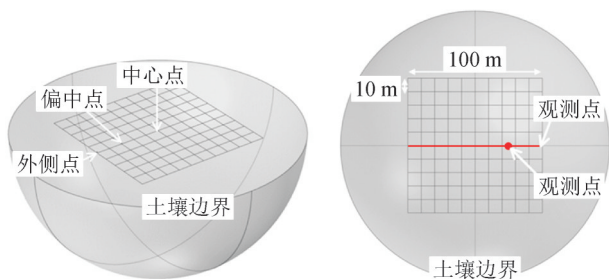


图4 变电站接地网仿真模型

Fig. 4 Schematic diagram of grounding grid in a substation

2 入侵雷电流作用下接地散流及热稳定性分析

为了更直观地阐明不同接地材料对接地网散流特性的影响,引入接地网的分流系数 η 为

$$\eta = \frac{I_r}{I_s} \times 100\% = \frac{J_r \times S}{J_s \times S} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: I_r 为流入接地网的电流,A; I_s 为流入接地网的总电流,A; J_r 为流入接地网的电流密度,A/m²; J_s 为流入接地网引下线的电流密度,A/m²;S为接地网材料的截面积,m²。

2.1 雷电流幅值的影响

为分析雷电流幅值对接地网散流特性及热稳定性的影响,固定土壤电阻率为200 $\Omega \cdot m$,入地点为接地网中心,持续时间设为300 μs 。对仿真结果简单分析可得,引入的分流系数不随电流幅值变化而变化,故当雷电流幅值为10 kA时,沿观测线的分流系数在距中心点0~50 m范围内变化规律见图5。当雷电流幅值在10~30 kA范围内变化时,3种材料的接地网最高温度随雷电流幅值的变化规律见图6。

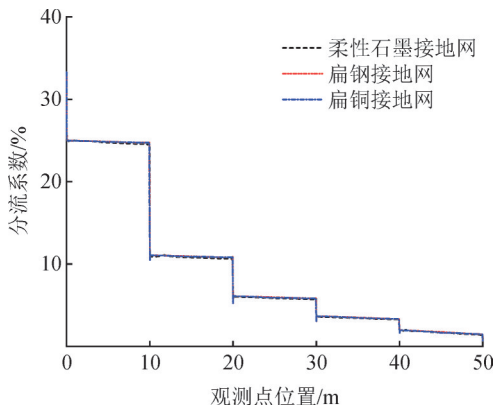


图5 观测线分流系数分布情况

Fig. 5 Distribution of shunt coefficients of observation lines

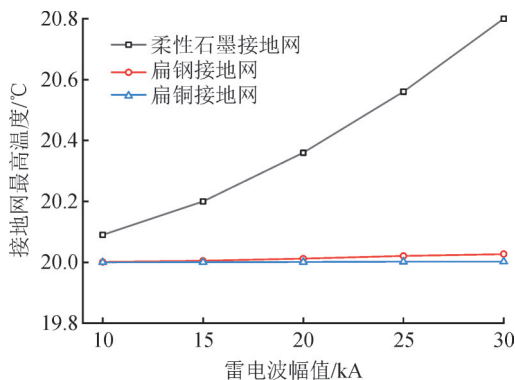


图6 接地网最高温度变化规律图

Fig. 6 The maximum temperature variation law of the grounding grid

由图5的仿真结果可得,在接地网中心点流入入侵雷电流时, $\phi 40$ mm柔性石墨接地网、扁钢与扁铜接地网沿观测线的分流系数变化规律基本一致。在接地网节点处,由于横向接地体分流,分流系数均发生大幅度下降,而在接地网的节点间的导体段的分流系数随着与电流入地点距离的增大而减小,由此可得 $\phi 40$ mm柔性石墨接地网与金属接地网在相同导体段处的散流效率基本相同。

由图6仿真结果可得,3种材料的接地网的最高温度均随着雷电流幅值的增大而升高,其中金属接地网的温升很小,几乎不发生变化,而柔性石墨接地网相对金属接地网的温升更大,但是由于雷电流作用时间极短,在雷电流流过柔性石墨接地网时在接地引下线处产生的热量有限,所以实际温度变化很小,最高温度仅为20.8℃,由此可以确定柔性石墨接地网不存在因入侵雷电流幅值过大发生熔断的风险。

2.2 土壤参数的影响

在实际情况中,接地网所在土壤的参数并不固定,为分析土壤电阻率对雷电入侵波的散流特性的影响,固定雷电流幅值为10 kA,入地点为接地网中心点,当土壤电阻率在100~2 000 $\Omega \cdot m$ 范围内变化时,接地网的接地电阻变化规律见图7。在观测点处,不同土壤电阻率的接地网的分流系数变化见图8。

由图7可得,随着土壤电阻率的增大,3种材料接地网的接地电阻均随之升高,接地电阻与土壤电阻率近似呈线性关系。当土壤电阻率为2 000 $\Omega \cdot m$ 时,柔性石墨接地网的接地电阻为5.74 Ω ,扁钢与扁铜接地网的接地电阻为5.64 Ω ,相差仅为0.1 Ω ,即在相同土壤电阻率情况下,柔性石墨接地网的接地电阻与扁钢扁铜等金属接地网的接地电阻相差不大且变换趋势相同。

由图8可得,随着土壤电阻率的升高,柔性石墨接地网的分流系数上升,当高于1 000 $\Omega \cdot m$ 后趋于

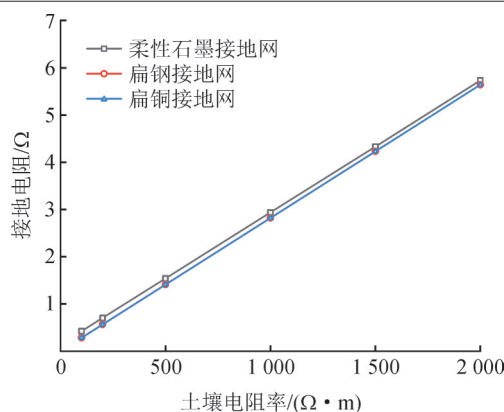


图7 接地网接地电阻变化规律

Fig. 7 Grounding resistance change law of grounding grid

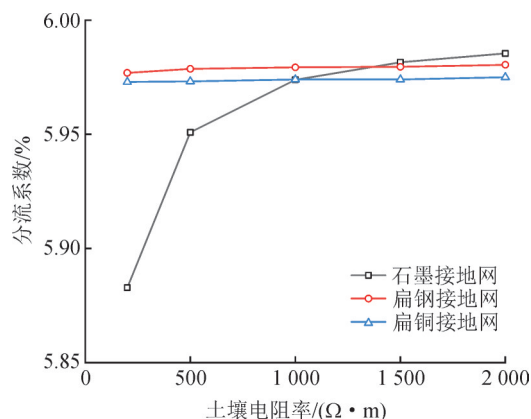


图8 观测点分流系数变化规律

Fig. 8 The law of change of shunt coefficient at observation point

平稳并略高于金属接地网,主要是因为柔性石墨接地网的有效长度相对金属接地网更长,相对趋肤效应弱,有效利用面积大^[32],所以在低土壤电阻率时的散流效果较好且受土壤电阻率的影响较大,当土壤电阻率高于 $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 时,由于土壤电阻率较高并且柔性石墨接地网的接地电阻略高于金属接地网,所以柔性石墨接地网的分流系数高于金属接地网。

2.3 电流入地点的影响

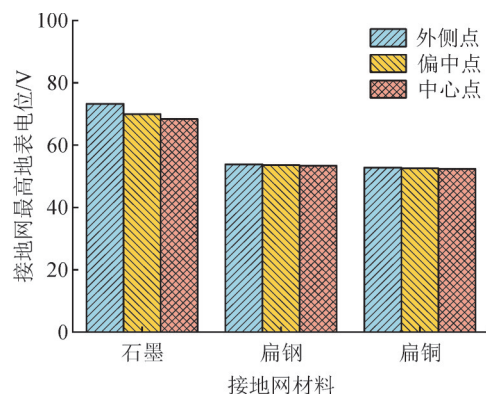
在发生雷电入侵变电站时,雷电侵入波的入地位置并不固定在接地网的中心点。为分析电流入地位置对接地网散流特性的影响,固定入地雷电流幅值为 $10\,\text{kA}$,土壤电阻率为 $200\,\Omega\cdot\text{m}$,不同入地点的接地网接地电阻见表3,不同入地点的接地网电位变化与分布情况见图9。

由表3可得,随着电流入地点向接地网边缘移动,扁铜接地网接地电阻基本保持不变,柔性石墨接地网与扁钢接地网的接地电阻上升,但上升幅度很小,且接地电阻均小于 $1\,\Omega$,所以电流的入地点并不会对接地网的接地电阻造成显著影响。

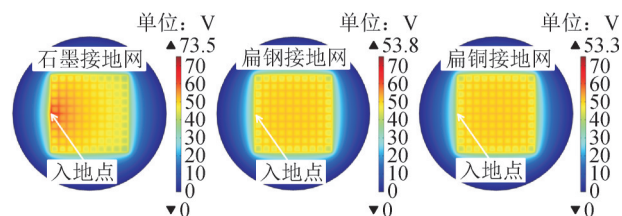
表3 不同入地点的接地网接地电阻

Table 3 Grounding resistance of the ground grid at different entry points

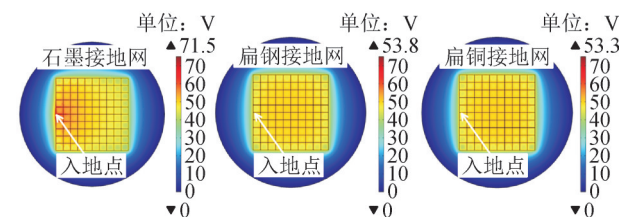
接地网材料	接地电阻		
	中心点	偏中点	外侧点
柔性石墨	0.708	0.720	0.780
扁钢	0.566	0.567	0.569
扁铜	0.562	0.563	0.563



(a) 不同入地点的接地网最高电位变化情况



(b) 相同入地点地表电位分布情况



(c) 相同入地点接地网电位分布情况

图9 接地网电位变化与分布情况

Fig. 9 Potential change and distribution of grounding grid

由图9(a)的仿真结果可得,在相同的电流入地点处,柔性石墨接地网的地表最高电位总是高于金属接地网,而扁钢接地网与扁铜接地网的最高地表电位基本相同;随着电流入地点从接地网中心点向接地网边缘偏移,扁钢与扁铜接地网的最高地表电位几乎不发生变化,而柔性石墨接地网的地表最高电位随之升高,最高为 $73.5\,\text{V}$,集中在接地引下线附近。

由图9(b)接地网地表电位分布情况可得,在相同的电流入地点,柔性石墨接地网的地表最高电位集中在电流入地点的附近,随着与入地点距离的增

加不断减小,而金属接地网的地表电位沿接地网均匀分布,此外当入地点在接地网边缘时,柔性石墨接地网的地表电位变化较大,容易导致跨步电压过大发生触电事故。由图9(c)可得,在相同电流入地点处,扁钢与扁铜接地网的高电位主要集中在接地体上,周围土壤的电位变化较均匀,而柔性石墨接地网的接地网电位分布受电流入地点位置的影响较大,高于金属接地网的电位主要集中在电流入地点的接地体与土壤中,由此导致地表电位分布不均匀。

3 工频短路作用下热稳定性仿真分析

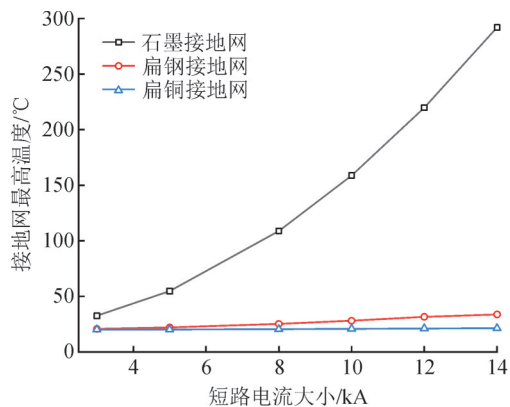
3.1 短路电流幅值的影响

由于短路故障电流持续时间相对更长,所以对接地网的热稳定性要求更高。为保证变电站在发生短路故障时接地网能安全稳定散流并长久稳定运行,通过搭建短路电流热稳定仿真模型,对比分析不同短路电流幅值下不同材料接地网的温升及其热稳定性。

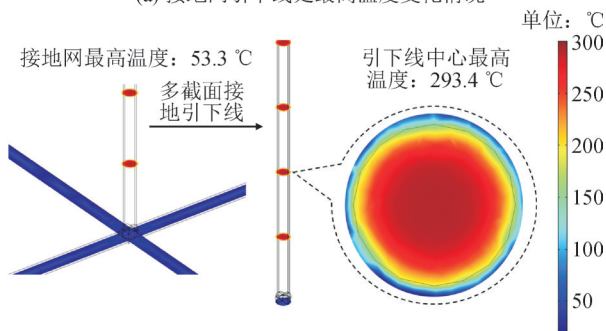
设定土壤电阻率为 $200\ \Omega\cdot\text{m}$,短路电流入地点为接地网中心,短路电流持续时间为 $0.2\ \text{s}$,初始温度为 $20\ ^\circ\text{C}$,当短路电流在 $3\sim 14\ \text{kA}$ 范围内变化时,3种材料的接地网最高温度变化曲线和不同短路电流大小的柔性石墨接地引下线的温度分布图见图10。

由图10(a)、(b)可得,随着工频短路电流幅值的增大,柔性石墨3种材料的接地网的最高温度随之升高,其中扁铜与扁钢等金属接地网的温升相对较低,金属接地网的最高温度为 $35.9\ ^\circ\text{C}$,柔性石墨接地网的埋地水平接地体上的最高温度为 $53.3\ ^\circ\text{C}$,接地引下线上的最高温度为 $293.4\ ^\circ\text{C}$ 。由此可得在工频短路电流作用下,柔性石墨接地网的温升远高于金属接地网且产生的热量主要集中在接地引下线上,由此导致接地引下线温度远高于水平接地体温度。由图10(b)、(c)可得,柔性石墨接地引下线的温度随着短路电流的增大而逐渐升高,热量主要集中在接地引下线的中心,温度自引下线的中心向外降低。主要原因是柔性石墨的导热系数相对较低,散热速率相对较慢导致热量聚集在引下线中心,进而导致引下线内部温度较高。

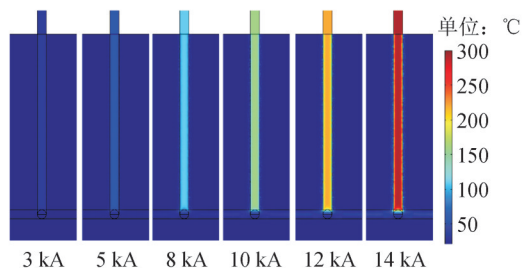
由文[33]的研究结果表明:在 $-40\ ^\circ\text{C}$ 低温及 $200\ ^\circ\text{C}$ 高温下的温升循环试验中,柔性石墨复合接地材料及连接点结构稳定;在短路冲击耐受试验中,在峰值约为 $26\ \text{kA}$,波长时间约 $23\ \text{ms}$ 的短路电流多次冲击作用后,接地体温度达到了 $210\ ^\circ\text{C}$,已经在一定程度上影响了接地体原有的致密性。而模



(a) 接地网引下线处最高温度变化情况



(b) 引下线横截面温度分布情况



(c) 引下线纵截面温度分布情况

图10 接地网的温度变化与分布情况

Fig. 10 Temperature change and distribution of grounding grid

拟仿真结果表明,在工频短路电流作用下,柔性石墨接地网引下线的最高温度为 $293.4\ ^\circ\text{C}$,超过其温升循环试验的最高温度与短路试验中的最高温度,因此接地引下线的结构会受到影响,所以不满足热稳定性的要求。

对于柔性石墨引下线不满足热稳定性要求的问题,可以针对柔性石墨接地网的接地引下线进行改进,如采用金属材料作为接地引下线而柔性石墨材料作为接地体等。此外,据研究可得柔性石墨接地材料的电阻率呈负温度特性^[34],故不存在接地网发热导致接地电阻大幅升高进而影响接地散流的问题。

3.2 土壤参数的影响

为分析土壤参数对接地网的热稳定性的影响,固定短路入地电流大小为 $10\ \text{kA}$,入地点为接地网

中心点,不同土壤电阻率的接地网最高温度变化情况见图11。

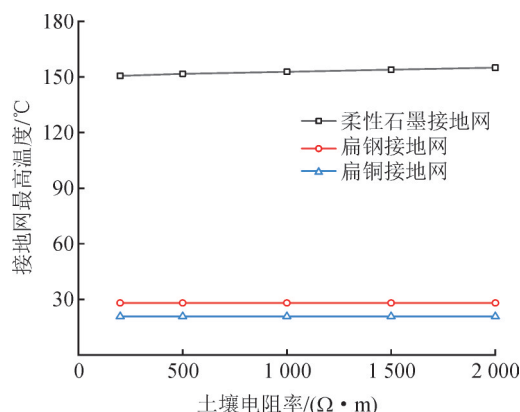


图11 不同土壤电阻率的最高温度变化情况

Fig. 11 Maximum temperature variation of different soil resistivity

由图11可得,在相同土壤电阻率时,柔性石墨接地网的最高温度远高于扁钢与扁铜接地网,而随着土壤电阻率的升高,扁钢与扁铜接地网的最高温度基本保持不变,柔性石墨接地网的最高温度变化也不明显。分析其原因,主要是因为流入短路电流时,接地网温度最高点主要集中在接地引下线上,而入地电流经过引下线时几乎不向周围土壤中散流,故土壤电阻率对引下线的散流影响微乎其微,由此导致接地引下线中的电流几乎不变进而导致接地网的最高温度变化不明显。

3.3 电流入地点的影响

在实际变电站内发生短路时,短路电流的入地点不仅仅在接地网中心点,为分析短路电流入地点位置与接地网最高温度的关系,固定短路入地电流大小为10 kA,土壤电阻率为200 Ω·m,接地网中心点、偏中心点和外侧点3种电流入地点的接地网最高温度见图12。

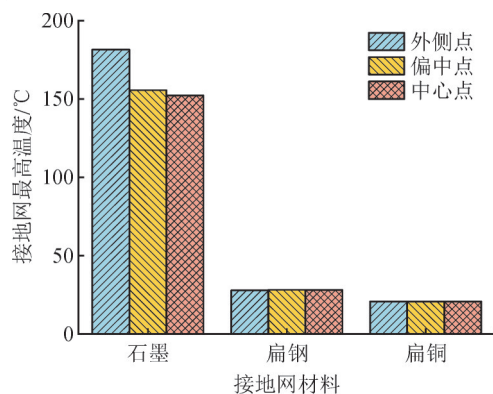


图12 不同入地点的接地网最高温度

Fig. 12 Maximum temperature of the ground grid at different entry points

由图12可得,在电流入地点相同时,石墨接地网的最高温度远高于金属接地网,随着电流入地点

接近接地网的边缘,柔性石墨接地网温度随之增高,扁钢与扁铜接地网的温度几乎保持不变。对于石墨接地网,外侧入地点的接地网最高温度为181.5 °C,中心点最高温度为152.3 °C,外侧入地点与中心点相差29.2 °C,而偏中点与中心点相差较小,仅为3.3 °C。分析其原因,主要是因为外侧点的入地电流的分流方向相对减少,分流效果较差导致接地导体中的分流电流相对变大,进而导致接地网温度较高。

4 结论

通过 Comsol Multiphysics 仿真软件对变电站接地网在入侵雷与短路作用下的散流特性与热稳定性分析,可得出以下结论:

1)φ40 mm 柔性石墨接地网与常见的扁钢、扁铜接地网的接地散流效果相近,柔性石墨接地网的接地电阻与金属接地网相差很小,在低土壤电阻率下散流表现较好。

2)相对金属接地网,柔性石墨接地网地表电位主要集中在入地点附近,随着电流入地点向接地网边缘偏移,地表电位略微升高,电位分布变化不明显,但需特别注意的是在边缘入地点时易发生跨步电压触电事故。

3)在短路电流作用下,柔性石墨接地网接地引下线上的最高温度远高于水平接地体上的最高温度,产生的热量主要集中分布在接地引下线上导致接地引下线的温度不满足柔性石墨的热稳定性要求,所以需要对接地网的引下线进行改进,如采用金属接地引下线替代石墨引下线等。

4)改变土壤电阻率对石墨接地网的温度影响不明显;而随着电流入地点接近接地网边缘,接地网最高温度随之升高,因此在判断热稳定性时应将接地网边缘入地点的温度作为参考。

文中仿真计算结果可以为柔性石墨材料在变电站接地网中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 徐良德,郭挺,卢洵,等.基于改进海鸥算法的终端变电站接地网腐蚀诊断研究[J]. 电力科学与技术学报,2025,40(3):275-282.
Xu Liangde, Guo Ting, Lu Xun, et al. Research on corrosion diagnosis for grounding grid based on improved seagull optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 275-282.
- [2] 曹志伟,贾文达,王继豪,等.变电站二次等电位接地网连接方式对接地网特性的影响[J]. 电力工程技术,2026,45(2):101-109.
Cao Zhiwei, Jia Wenda, Wang Jihao, et al. The impact of

- substation secondary equipotential grounding grid connection methods on grounding grid characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45(2): 101-109.
- [3] 胡海敏, 赵茜, 王学东, 等. 变电站接地网接地电阻短距测量误差补偿研究[J]. 电子设计工程, 2025, 33(4): 101-104.
Hu Haimin, Zhao Qian, Wang Xuedong, et al. Research on error compensation for short distance measurement of ground resistance of grounding network in substation[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(4): 101-104.
- [4] 李谦, 文习山. 基于安全性的大型接地网均压优化策略[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 177-183.
Li Qian, Wen Xishan. Voltage grading optimization strategy for large grounding grid based on security[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 177-183.
- [5] 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.
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.
- [6] 王磊, 程杨, 江伟建, 等. 基于改进交替方向乘子法的大规模接地网腐蚀评估方法[J]. 电瓷避雷器, 2025(6): 69-78.
Wang Lei, Cheng Yang, Jiang Weijian, et al. Large-scale grounding system corrosion assessment method based on improved alternating direction multiplier method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025 (6): 69-78.
- [7] 马成廉, 宋萌清, 尹波, 等. 结合 IEEE std 80-2000 和 CDEGS 的变电站新建接地网优化设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 131-139.
Ma Chenglian, Song Mengqing, Yin Bo, et al. Optimizing the design of a new substation grounding network by combining IEEE std 80-2000 and CDEGS[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 131-139.
- [8] 王玥, 张卫欣, 王崇, 等. 基于多重网格剖分技术的智能变电站接地网电磁响应数值模拟研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 97-103.
Wang Yue, Zhang Weixin, Wang Chong, et al. Study on numerical simulation of electromagnetic response of intelligent substation grounding grid based on multi-grid partitioning technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 97-103.
- [9] 李友才, 李晓龙, 罗周维, 基于改进灰狼算法的接地网腐蚀诊断方法等[J]. 电瓷避雷器, 2024(5): 100-109.
Li Youcai, Li Xiaolong, Luo Zhouwei, et al. Corrosion diagnosis method of grounding grid based on improved gray wolf algorithm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(5): 100-109.
- [10] 黄涛, 丁志锋, 朱小龙, 等. 电力系统接地材料的耐蚀性[J]. 电镀与环保, 2018, 38(5): 52-55.
Huang Tao, Ding Zhifeng, Zhu Xiaolong, et al. Corrosion resistance of grounding materials used in electric system[J]. Electroplating & Pollution Control, 2018, 38(5): 52-55.
- [11] 高智悦, 姜波, 樊志彬, 等. 典型接地材料在碱性土壤模拟液中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 191-196.
Gao Zhiyue, Jiang Bo, Fan Zhibin, et al. Corrosion behavior of typical grounding materials in artificial alkaline soil solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1): 191-196.
- [12] 刘蕊, 李庆军, 薛峰, 等. 碳纤维改性硅酸盐对含氯环境下接地材料的腐蚀防护特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 48-53.
Liu Rui, Li Qingjun, Xue Feng, et al. Corrosion protection properties of carbon fiber modified silicates for grounding materials in chlorine-containing environments[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 48-53.
- [13] 刘欣, 周宇, 李志美, 等. 接地材料在模拟溶液与现场埋片的腐蚀及相关性研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 104-108.
Liu Xin, Zhou Yu, Li Zhimei, et al. Research on corrosion and correlation of grounding materials in simulated solution and metal specimens buried in underground[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 104-108.
- [14] 张国锋, 李景丽, 李孟. 金属引下线与柔性石墨接触腐蚀特性研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 16-21.
Zhang Guofeng, Li Jingli, Li Meng. Study on contact corrosion characteristics of metal down lead and flexible graphite[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(3): 16-21.
- [15] 王湘汉, 范冕, 何慧雯, 等. 新型石墨碳纤维柔性复合接地材料制备与性能研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(4): 98-105.
Wang Xianghan, Fan Mian, He Huiwen, et al. Preparation and properties of a new graphite carbon fiber flexible composite grounding material[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(4): 98-105.
- [16] 孟晓明, 王利民, 陈思敏, 等. 电力工程接地材料研究现状及展望[J]. 化工新型材料, 2016, 44(9): 10-12.
Meng Xiaoming, Wang Limin, Chen Simin, et al. Research status and prospect of grounding material in power engineering[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(9): 10-12.
- [17] 李恒真, 阮江军, 陈荆洲, 等. 柔性石墨接地体耐腐蚀试验及应用技术研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(4): 98-101.
Li Hengzhen, Ruan Jiangjun, Chen Jingzhou, et al. The research on corrosive resistance and application technology of flexible graphite composite electrical grounding material[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(4): 98-101.
- [18] 张昌, 甘艳, 邹建明, 等. 高土壤电阻率地区柔性石墨复合接地材料与圆钢接地材料的有效长度对比研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(1): 58-63.
Zhang Chang, Gan Yan, Zou Jianming, et al. Comparative study on the effective length between flexible graphite composite grounding material and round steel grounding material in high soil resistivity[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(1): 58-63.
- [19] 肖微, 胡元潮, 阮江军, 等. 柔性石墨复合接地材料及其接地特性[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 85-94.
Xiao Wei, Hu Yuanchao, Ruan Jiangjun, et al. Flexible graphite composite electrical grounding material and its grounding application features[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 85-94.
- [20] 詹清华, 阮江军, 龙明洋, 等. 柔性石墨接地体与金属接地体散流特性对比[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 66-70.
Zhan Qinghua, Ruan Jiangjun, Long Mingyang, et al. Comparison study on current dispersing characteristic of flexible graphite

- grounding material and metal grounding material[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(3): 66-70.
- [21] 吴泳聪, 阮江军. 接地导体地中短路温升特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 52-58.
- Wu Yongcong, Ruan Jiangjun. Research on underground short-circuit temperature rise characteristic of grounding conductor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 52-58.
- [22] 张波, 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2569-2582.
- Zhang Bo, He Jinliang, Zeng Rong. State of art and prospect of grounding technology in power system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2569-2582.
- [23] 陈范娇. 接地技术的国内外标准对标及分类设计研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(1): 165-171.
- Chen Fanjiao. Comparison of domestic and foreign standards for grounding technology and classification design[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1): 165-171.
- [24] 李扬森, 张成炜, 柳松, 等. 新型热铸铜覆钢复合金属材料在变电站接地系统中的应用研究[J]. 电气工程学报, 2021, 16(1): 77-82.
- Li Yangsen, Zhang Chengwei, Liu Song, et al. Research on the application of new hot cast copper clad steel composite metal material in substation grounding system[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(1): 77-82.
- [25] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- He Jinliang, Zeng Rong. Grounding technology of power system[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [26] 刘晓航, 高宇, 薛锋, 等. 雷电入侵波冲击下电力变压器绕组变形对绕组电压分布的影响研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(3): 86-93.
- Liu Xiaohang, Gao Yu, Xue Feng, et al. Study on effects of winding deformation of power transformer on voltage distribution in windings under impact of lightning invasion wave[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 86-93.
- [27] 李景丽, 栗超超, 冯鹏. 基于ATP-EMTP的某变电站雷击事故仿真研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(2): 6-11.
- Li Jingli, Li Chaochao, Feng Peng. Simulation study on lightning accident of a substation based on ATP-EMTP[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2019, 40(2): 6-11.
- [28] 田金虎, 刘渝根, 赵俊光. GIS升压站雷电侵入波过电压计算及其影响因素分析[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 74-82.
- Tian Jinhu, Liu Yugen, Zhao Junguang. Calculation and influence factors analysis of lightning intruding overvoltage in GIS step-up station[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 74-82.
- [29] 廖玉琴, 屈路, 杨跃光, 等. 面向环保接地施工的杆塔分支式外延接地网接地特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 1-11.
- Liao Yuqin, Qu Lu, Yang Yueguang, et al. Research on grounding characteristics of tower branch epitaxial grounding grid for environmental protection grounding construction[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 1-11.
- [30] 周宁, 张树春, 王旭明. 变电站接地网综合性安全校核分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(3): 119-124.
- Zhou Ning, Zhang Shuchun, Wang Xuming. Comprehensive safety check analysis of substation grounding grid[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(3): 119-124.
- [31] 黄士君, 黄涛, 周咏, 等. 输电线路杆塔接地网典型接地材料散流特性研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 178-182.
- Huang Shijun, Huang Tao, Zhou Yong, et al. Research of typical grounding material current release characteristic in transmission tower grounding grid[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(9): 178-182.
- [32] 张国锋, 余飞宏, 尹李健, 等. 基于有限元分析的石墨基柔性接地体冲击接地特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(5): 128-134.
- Zhang Guofeng, Yu Feihong, Yin Lijian, et al. Impact grounding characteristics of flexible graphite grounding body based on finite element method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(5): 128-134.
- [33] 胡元潮, 阮江军, 肖微, 等. 柔性石墨复合接地材料及其相关性能试验研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1879-1889.
- Hu Yuanchao, Ruan Jiangjun, Xiao Wei, et al. Study on flexible graphite composite material for electrical grounding and its correlation experiments[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1879-1889.
- [34] 胡元潮, 赵文龙, 安韵竹, 等. 柔性石墨复合接地模块接地特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 21-27.
- Hu Yuanchao, Zhao Wenlong, An Yunzhu, et al. Research on grounding characteristics of flexible graphite composite grounding module[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 21-27.

张建伟(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统过电压及其防护、电工新材料及其应用技术、电磁兼容等。

安韵竹(1988—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为介质放电、电力系统防灾减灾、电磁兼容等领域(通信作者)(E-mail: anyunzhu2006@163.com)。