

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107125

10 kV 配网用石墨接地材料的性能测试研究

务孔永¹ 张国锋¹ 陈泽鹏² 郭浩² 王森³ 谭波⁴(1.河南四达电力设备股份有限公司 许昌 461500; 2.西安交通大学 电气工程学院 西安 710049;
3.国网陕西省电力公司电力科学研究院 西安 710048; 4.中国电力科学研究院 武汉 430074)

摘要: 针对石墨基柔性接地材料在配电系统接地中的应用问题,构建了有限元仿真模型对一组 10 kV 配电网石墨基柔性接地装置的接地电阻进行计算,并结合石墨基柔性接地材料的固有特性和常用降阻方式,结果发现在城市配电网应优先采用矩形框式的结构以减小接地电阻;对短路故障下和雷击故障下石墨基柔性接地装置在的温升情况进行仿真计算,结果表明测试装置可在短路故障工况下正常运行,而在 30 年一遇雷击故障下局部温升过高。研究结果对 10 kV 城市配电网中石墨基柔性接地装置的设计、选型和应用具有重要参考价值。

关键词: 石墨基柔性接地材料;接地装置;配电系统;接地电阻;温升

中图分类号: TM86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on performance test of graphite grounding material for 10 kV distribution network

Wu Kongyong¹ Zhang Guofeng¹ Chen Zepeng² Guo Jie² Wang Sen³ Tan Bo⁴

(1. Henan STAR Electric Power Equipment Co., Ltd., Xuchang 461500, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xi'an 710048, China; 4. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the application of flexible graphite grounding material in power distribution systems, a finite element simulation model of flexible graphite grounding device is constructed, by which the grounding resistance of a group of 10 kV power distribution system flexible graphite grounding devices is calculated. It is proposed that the rectangular frame structure should be preferentially used in urban distribution networks to reduce grounding resistance by combining with the inherent characteristics of flexible graphite grounding material and common resistance reduction methods. The temperature rise of the flexible graphite grounding device under short-circuit fault and lightning fault has been simulated and calculated. The test device can operate normally under short-circuit fault conditions, but the local temperature rise is over standard under the lightning fault that once in 30 years. The research results have important reference value for the design, selection and application of flexible graphite grounding devices in 10 kV urban distribution networks.

Keywords: flexible graphite grounding material; grounding device; power distribution systems; grounding resistance; temperature rise

0 引 言

配电系统承担着向广大用户供电的任务,是城市建设的重要基础设施,随着我国城市化水平的提升,对配电系统供电可靠性要求也在进一步提升。接地装置长期有效、稳定运行直接影响着配电系统的安全运行^[1-2]。目前国内普遍采用的金属接地材料,如镀锌钢、铜覆钢,均存在易腐蚀、运行寿命短问题,接地装置的腐蚀问题是运维工作需要解

决的重要问题。石墨作为耐腐蚀的新型接地材料正在逐渐替代传统接地材料^[3-4]。

接地电阻是接地装置重要的特征参数之一,配电系统作为向用户供电的最后环节大多处在人口密集、寸土寸金的城市内,相比输电线路地下可开挖面积更小,因此对城市狭小区域的接地装置,需要考虑如何在有限的狭小空间内有效降低接地装置的接地电阻,使其满足工程要求^[5]。

石墨基柔性接地材料具有如下优点:优秀的耐腐蚀性、

收稿日期:2021-07-01

良好的导电性、良好的热稳定性、比金属材料更轻、质软方便运输与施工、与土壤接触电阻更小、生产成本更低等^[6-8]。尽管石墨材料属于良导体,但相比于传统金属材料其电阻率约大 1~2 个数量级,因此在发生故障流过相同故障电流时石墨接地体的发热会更严重。由于柔性石墨接地体生产加工过程中需要加入部分粘合材料,严酷的故障电流引起的热效应会使粘合材料融化、失效,从而影响柔性石墨接地装置的稳定性,对电力系统的安全运行造成隐患。

为此,本文针对柔性石墨接地体选取了几种配电系统常用的接地装置形式,通过仿真计算,分析对比了不同结构下柔性石墨接地装置的接地电阻,研究了不同结构对接地装置接地电阻的影响。在通过严酷故障电流时,从石墨基柔性接地装置的接地电阻和发热温升两方面研究了在配电网应用的适应性,获得的研究结论对配电系统石墨基柔性接地装置的选型、优化及设计具有重要参考价值。

1 仿真模型的构建与测试

由于计算机软件功能日益强大,有限元数值分析方法在接地装置特性研究方面的应用显著^[9-11],本文通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件构建石墨基柔性接地装置的仿真模型。接地装置散流过程中电流的大小影响着接地装置周围的电场强度,电场强度的表达式为:

$$E = \rho J \tag{1}$$

式中: E 为电场强度, ρ 为土壤电阻率, J 为电流密度。

接地装置周围电场强度与电流密度以及土壤电阻率成正比。电流密度增大时,接地装置周围的电场强度随之增大,同时会影响土壤电阻率,使得土壤电阻率下降^[12]。土壤中电场强度增大,其电阻率非线性地减小,当电场强度增大到临界击穿场强时,土壤发生击穿,即产生火花效应,而当电场强度继续增大到某一值时,土壤成为良好的导体,发生电弧放电。在对接地装置散流过程进行计算时通常可将周围的散流区域近似看成两部分,即靠近接地装置的击穿区和相对更远的非击穿区^[13-14]。Liu 等^[15]经过多次试验研究,分析得出如下结论:杆塔接地装置周围的击穿区土壤电阻率可取其原始电阻率的 7%,未击穿区的土壤电阻率随电场强度非线性变化,故障电流泄放过程中电场强度为时变值,因此土壤电阻率也为时变值。根据 ABDUL M 研究发现,土壤临界击穿场强约为 $300 \text{ kV/m}^{[16]}$,土壤电阻率随电场强度的变化规律如图 1 所示,图中 ρ_0 为初始土壤电阻率。

为了验证仿真模型的准确性,在土壤电阻率 $\rho = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 条件下对图 2 所示的两种结构接地极进行建模仿真计算工频接地电阻,与 GB/T 50065-2011 提出的均匀土壤中垂直接地极与水平接地极的工频接地电阻经验公式进行比对,结果如表 1 所示^[17]。计算值与理论值误差不超过 5%,认定为该模型能够满足工程的需要,准确地对接地装置工频接地电阻进行仿真分析。

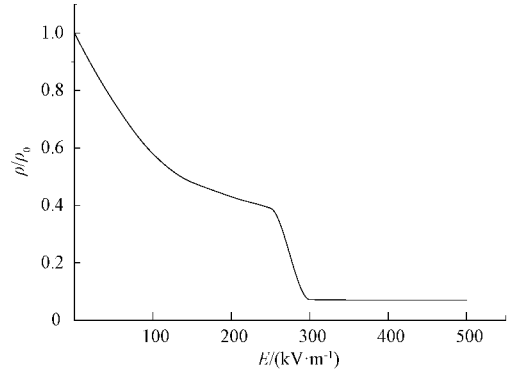


图 1 土壤电阻率曲线

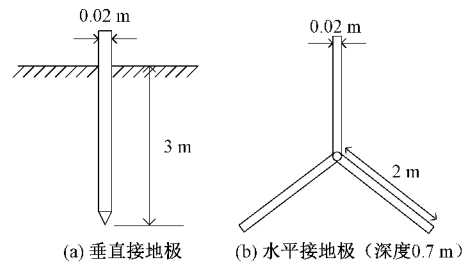


图 2 接地极布置方式

表 1 工频接地电阻仿真计算值与理论计算值对比

接地极	电阻值	
	理论值/ Ω	仿真值/ Ω
垂直接地极	28.63	28.09
水平接地极	18.99	18.06

为了验证冲击接地电阻计算模型的准确性,对文献[18]中试验选取的长 1.5 m,直径 12 mm 垂直接地装置进行仿真计算,土壤电阻率为 $35 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$,冲击电流幅值分别 197、478、817 和 1 024 A。仿真计算结果与试验测量结果如表 2 所示,计算值与试验值误差最大不超过 7%,认为所建模型能够满足工程需要,准确地对接地装置冲击接地电阻进行仿真分析。

表 2 冲击接地电阻仿真计算值与试验值对比

冲击电流幅值/A	试验值/ Ω	仿真值/ Ω
197	17.76	18.76
478	16.18	17.40
817	16.05	16.35
1024	15.37	15.87

2 石墨基柔性接地装置接地电阻测试研究

接地电阻是接地装置的重要参数,根据 GB/T 50065-2011 相关要求,对工处于不接地、高电阻接地、谐振接地系统下向 1 kV 及以下低压电气设备供电的高压配电电气装

置,其保护接地的接地电阻不应大于 $4\ \Omega$, $6\ \text{kV}$ 及以上无地线线路钢筋混凝土杆塔宜接地,金属杆塔应接地,接地电阻不宜超过 $30\ \Omega$ 。通常情况下配电网线路杆塔的自然接地即可满足 $\leq 30\ \Omega$ 的要求,但对于装有配电设备的杆塔则需要采用人工接地装置以满足 $\leq 4\ \Omega$ 的要求。

图 3 所示为一组用于不同土壤电阻率条件下的 $10\ \text{kV}$ 石墨基柔性接地装置,分别由石墨基柔性接地带 1、石墨基柔性降阻模块 2 和石墨基柔性引下线 3 构成,不同电阻率条件下对应的尺寸大小有所不同,利用所构建的有限元模型分别计算其工频接地电阻与冲击接地电阻。

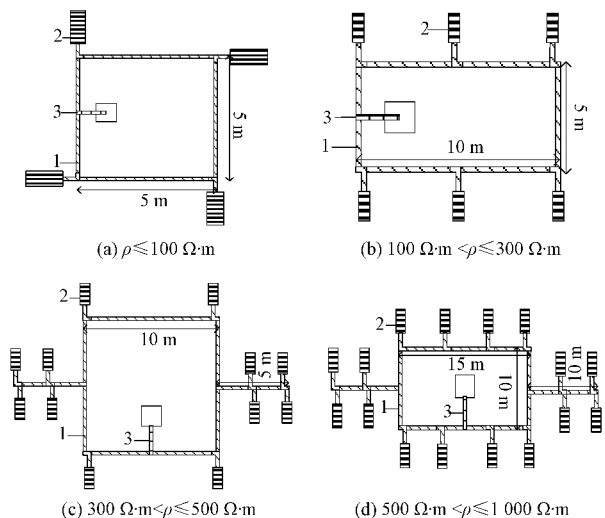


图 3 石墨基柔性接地装置

以装置 a 为例,计算工频接地电阻时终端电流与终端电压波形如图 4 所示,电流幅值 $550\ \text{A}$,电压幅值 $3\ 535\ \text{V}$,工频接地电阻 $6.43\ \Omega$,接地装置电势分布情况如图 5 所示。

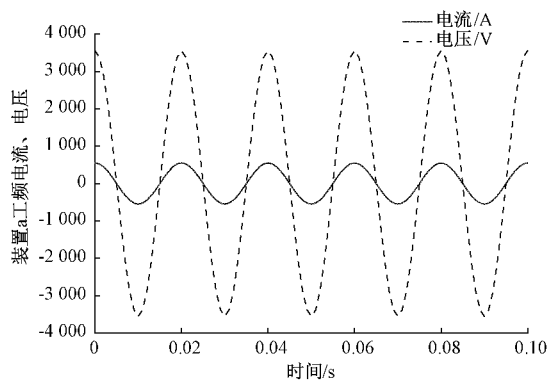


图 4 装置 a 工频电流、电压波形

计算冲击接地电阻时,雷电流源采用 $2.6/50\ \mu\text{s}$ 标准等值双指数波,考虑故障的严酷性,雷电流强度为标准雷暴日地区 30 年一遇的雷电流。装置 a 冲击接地电阻计算过程中终端电流与电压波形如图 6 所示,电流峰值 $-136.1\ \text{kA}$,电压峰值 $-767.0\ \text{kV}$,冲击接地电阻 $5.64\ \Omega$,接地装置电势分布如图 7 所示。

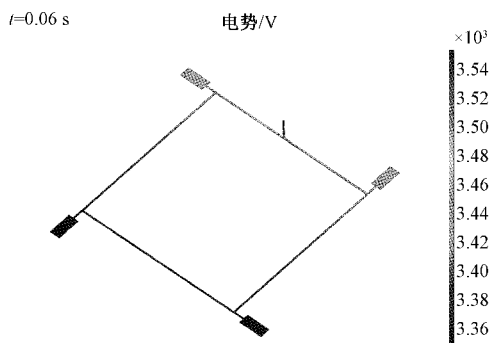


图 5 工频电流下装置 a 电势分布

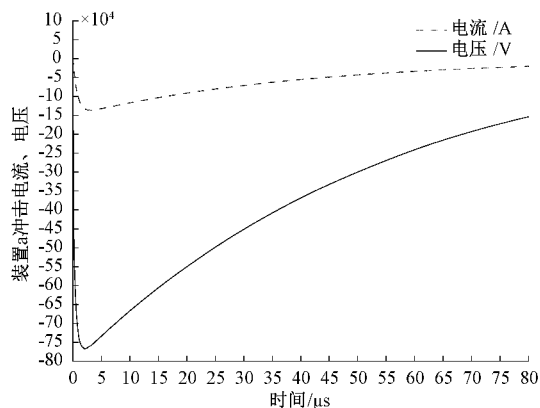


图 6 装置 a 冲击电流、电压波形

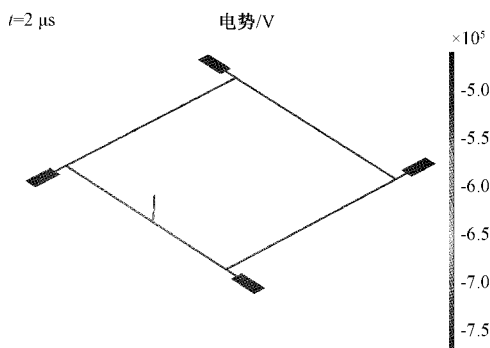


图 7 冲击电流下装置 a 电势分布

该组接地装置工频接地电阻与冲击接地电阻仿真结果如表 3 所示。可以发现,4 组装置的工频接地电阻相比国标要求值 $4\ \Omega$ 均有不同程度的超标,且土壤电阻率越大超标越多,考虑火花效应的情况下冲击接地电阻始终小于工频接地电阻,冲击系数的变化并无明显规律,因此认为 $10\ \text{kV}$ 配电网石墨基柔性接地装置的结构设计应优先考虑工频接地电阻是否满足相关标准规定。

处于人口密集、寸土寸金的城市配电系统相比于输电线路在铺设人工接地装置时,可能会遇到如管道、光纤等城市设施的阻碍,可利用的面积受限。尤其是带有配电设备的杆塔对接地电阻要求更高,因此在狭窄区域内合理布置

表 3 石墨基柔性接地装置接地电阻仿真结果

装置	土壤电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	工频接地 电阻/ Ω	冲击接地 电阻/ Ω	冲击 系数
a	100	6.43	5.64	0.877
b	300	14.61	11.12	0.761
c	500	17.46	14.02	0.803
d	1 000	26.83	19.38	0.722

接地装置降低接地电阻是一个需要研究的优化方向。接地装置通常的布置方式包括矩形布置、星型布置、矩形布置周围加装射线等^[19-21],以石墨接地材料为主材的接地装置具有与土壤贴合度高、柔性可弯曲等特点,因此可使用在水平接地体正下方铺设砂纸状的石墨基柔性降阻布来减小接地电阻。为了探究不同布置方式对石墨基柔性接地装置工频接地电阻的影响,提出城市狭小地区石墨基柔性接地装置的优化设计方案,对图 8 不同布置方式的接地装置,在土壤

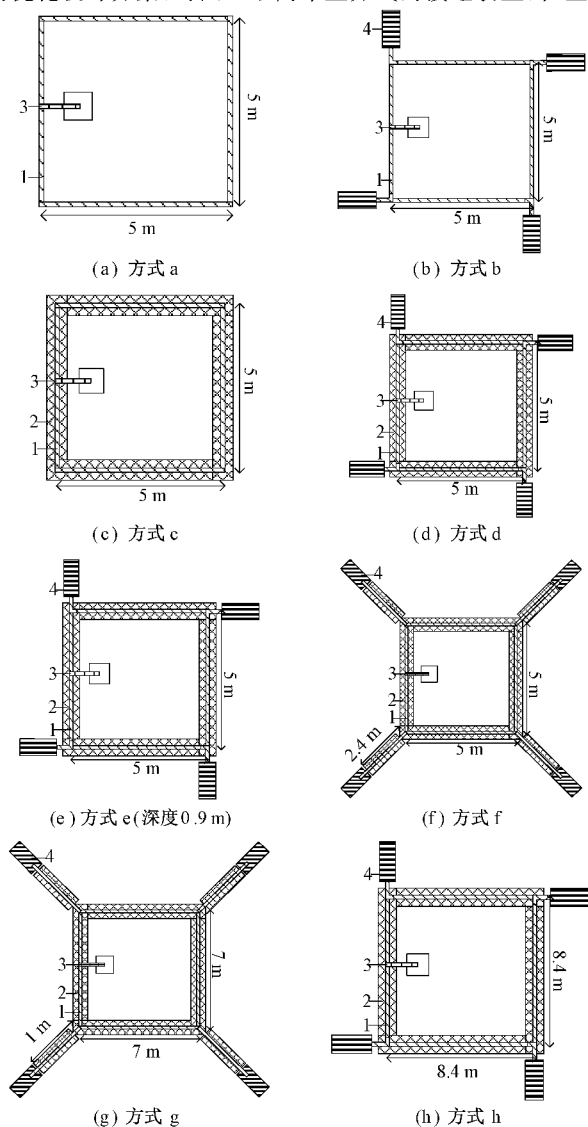


图 8 石墨基柔性接地装置

电阻率 $100 \Omega \cdot m$,埋设深度为 $0.6 m$ 的条件下计算其工频接地电阻,结果如表 4 所示。该组接地装置分别由石墨基柔性接地带 1、石墨基柔性降阻布 2、石墨基柔性引下线 3 和石墨基柔性降阻模块 4 构成。

表 4 8 种石墨基柔性接地装置工频接地电阻仿真结果

布置方式	工频接地电阻/ Ω
a	7.62
b	6.43
c	6.21
d	5.69
e	5.36
f	4.94
g	4.60
h	4.23

其中方式 a 由 $5 m \times 5 m$ 的石墨基柔性接地带构成,工频接地电阻 7.62Ω 。对比方式 a 与 b 的结果,采用在矩形接地装置角落加装接地模块的方式可有效降低工频接地电阻;对比方式 a 与 c 的结果,采用在接地装置下方铺设降阻布的方式可有效降低工频接地电阻,对比方式 b 与 c 的结果,铺设降阻布的降阻效果略好于加装接地模块的降阻效果;对比方式 d 和方式 a、b、c 的仿真结果,结合使用接地模块和降阻布的方式可获得更好的降阻效果;对比方式 c 和 d 的仿真结果,通过加深接地装置的埋设深度可在一定程度上减小工频接地电阻;对比方式 f 和 d 的仿真结果,通过在矩形接地装置四角外沿射线的方式可降低工频接地电阻,降阻效果明显;方式 f、g 和 h 的布置方式有所不同,但是需要开挖的面积相同,均为 $8.4 m \times 8.4 m$ 矩形,对比方式 f、g 和 h 的仿真结果可以得出规律:采用水平矩形框为主体结构的接地装置,在可开挖面积一定时,矩形框的面积大小为工频接地电阻的主要影响因素,采用的矩形框面积越大,工频接地电阻越小,正如方式 h(矩形边长 $8.4 m$ 无射线) $<$ 方式 g(矩形边长 $7 m$ 射线长 $1 m$) $<$ 方式 f(矩形边长 $5 m$ 射线长 $2.4 m$)。

因此可以得出结论,对于 $10 kV$ 配电系统在开挖面积狭窄的情况下,为了有效降低工频接地电阻可采用不带射线的矩形框结构,辅助以敷设降阻布,外接接地模块的方式,若工频接地电阻仍不能满足要求可在四角加装射线等方式进一步降低工频接地电阻。

3 石墨基柔性接地装置温升测试研究

石墨基柔性材料的电阻率相比金属材料更大,在通过相同故障电流时发热更严重,为了研究石墨基柔性接地装置在通过严酷故障电流时温升特性,故障电流产生的热效应是否会造成石墨基柔性接地装置参数变异失效,从可能引起接地装置严重发热的严酷故障工况出发,考虑 $10 kV$

配电系统不同的中性点接地方式和可能出现的严酷故障形式,使用 EMTP-RV 软件对 10 kV 配电系统进行仿真建模,线路长度 15.4 km,输送容量 7.5 MVA,仿真计算分析不同中性点接地方式和故障方式下 10 kV 配电系统杆塔接地装置的入地电流特性。

可能引起 10 kV 配电系统杆塔接地装置严重发热的故障形式包括单相接地短路故障、两相接地短路故障、雷击故障等^[22]。经过仿真研究,中性点经低电阻接地的 10 kV 系统,柱上变压器 10 kV 侧对外壳发生单相接地短路故障时流过杆塔接地装置的工频故障电流最大,可能引起的温升最高。雷击故障下杆塔接地装置的入地电流受系统中性点接地方式影响不大,主要由雷电强度决定。短路故障下经接地装置泄放的最大电流波形如图 4 中电流所示,30 年一遇雷击故障下经接地装置泄放的电流波形如图 6 中电流所示。

短路故障下考虑继电保护措施拒动的情况,设置故障时间持续 0.5 s,雷击故障持续时间 150 μ s。图 3 中 4 组接地装置温升情况如表 5 所示。

表 5 4 组种石墨基柔性接地装置温升仿真结果 $^{\circ}\text{C}$

装置	短路故障最大温升	雷击故障最大温升
a	51.13	25 492
b	51.09	29 272
c	50.77	39 099
d	50.66	53 670

根据已有研究,石墨基柔性接地装置的极限温升约为 260 $^{\circ}\text{C}$,因此从仿真结果来看短路故障下的最大温升不会造成设备损毁,而仿真过程在仅考虑热量积累的情况下,雷击故障时接地装置局部最大温升明显超标。以装置 c 为例,短路故障和雷击故障下最大温升处局部图如图 9、10 所示。

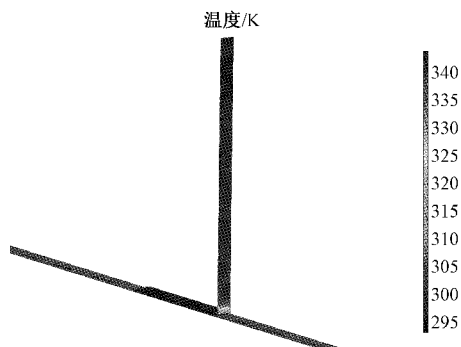


图 9 装置 c 短路故障下最大温升局部

短路故障和雷击故障下温升最大处均出现在引下线上,但具体情况有所不同。短路故障下最大温升处在引下线首端,不难理解的是,引下线首端属于地面以上部分,该段流过全部故障电流,直至地下部分再由土壤散流,所以首

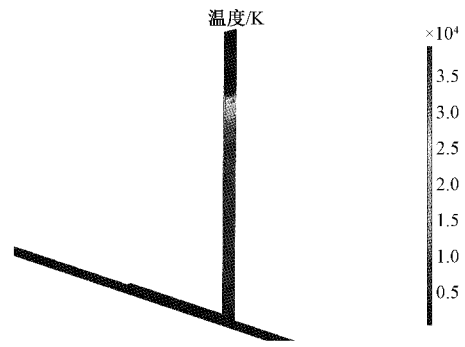


图 10 装置 c 雷击故障下最大温升局部

段温升最高。而雷击故障下引下线与土壤交界部分温升最大,通过对图 11 所示两种故障情况下引下线局部的电流密度分析可以发现,短路故障下引下线电流密度自上而下均匀分布,而雷击故障下引下线电流密度分布不均,在刚进入土壤部分明显大于其余部分。通过前文对土壤散流过程中火花效应的分析,土壤电阻率与周围场强有关,雷击故障时,引下线通过高频大电流,周围土壤场强增大,当达到临界击穿场强时,土壤发生击穿,而当场强进一步增大时,土壤发生电弧放电成为良好的导体,电阻远小于引下线因此可以理解中现象产生的原因,即原本在引下线首端均匀分布的电流在进入土壤后迅速通过引下线表面向突然散流,造成局部电流密度骤增,从而造成温升过大。

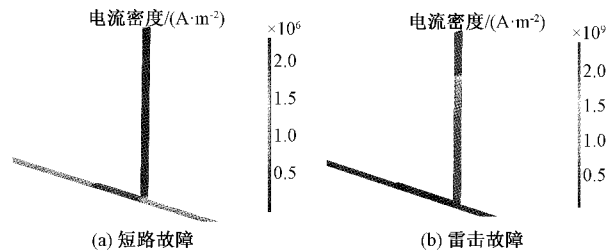


图 11 装置 c 引下线电流密度

根据工频短路故障和雷击故障下石墨基柔性接地装置可能出现的最大温升,认为石墨基柔性材料的极限耐受温升满足 10 kV 配电系统工频短路故障下的温升要求,但在 30 年一遇雷击故障下,引下线局部温升超标,会对接地装置的稳定运行造成影响。

4 结 论

为了研究石墨基柔性接地材料在配电系统中的应用前景,本文基于有限元仿真的方法建立了接地装置的仿真模型,并通过国标中的经验公式和相关文献的实验结果对模型的准确性进行了验证。对一组 10 kV 配电网杆塔石墨基柔性接地装置的接地电阻进行了计算,其工频接地电阻较标准要求值偏大,冲击接地电阻始终小于工频接地电阻,认为 10 kV 配电网石墨基柔性接地装置的结构设计应优先考虑工频接地电阻是否满足相关标准规定。

通过对比常用的不同型式接地装置工频接地电阻,针对城市配电系统可能面临的狭小区域提出了优先满足接地装置工频接地电阻要求的优化设计方向,在有限的空间中优先使用矩形框式的接地装置,辅助以铺设降阻布、加装接地模块、外接射线的降阻方式。

基于 EMTP-RV 电磁暂态仿真软件计算获得 10 kV 配电系统杆塔接地装置可能面临的严酷工频短路电流和雷击故障电流波形,短路故障下,石墨基柔性接地装置最高温升约为 50 °C,不会对接地装置造成损害;30 年一遇的雷击故障下,引下线泄放高频大电流时,原本在引下线首端均匀分布的电流进入土壤范围后,通过引下线表面迅速向土壤散流,局部电流密度骤增,导致温升超标,影响接地装置的稳定运行。

研究结果为石墨基柔性接地材料在配电系统下的设计、选型和应用提供了参考。

参考文献

- [1] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 1991.
- [2] 曾嵘, 何金良. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 李红岩, 李红梅, 耿星河. 杆塔接地体的选择及应用[J]. 科技与企业, 2015, 174(18): 196-196.
- [4] 张昌, 甘艳, 邹建明, 等. 柔性石墨垂直接地体在杆塔中的应用研究[J]. 电瓷避雷器, 2017, 10(5): 54-58.
- [5] 刘建. 电力系统 10kV 配电网接地方式分析[J]. 设备管理与维修, 2018, 70(23): 128-129.
- [6] 黄道春, 陈家宏, 谷山强, 等. 石墨基柔性接地材料特性及其在防雷接地中的应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1766-1773.
- [7] 胡元潮, 阮江军, 龚若涵, 等. 柔性石墨复合接地材料及其在输电线路杆塔接地网中的应用[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2851-2857.
- [8] 张国锋, 吕坤阳, 张明磊, 等. 石墨基柔性接地体动热性能优化试验研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(16): 17-21.
- [9] 司马文霞, 唐妍, 袁涛, 等. 土壤介电频变特性对接地极冲击散流的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1512-1518.
- [10] 杨财伟. 接地装置冲击特性的模拟试验及有限元分析方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [11] 黄欢, 郭洁, 魏琪, 等. 杆塔冲击接地阻抗的有限元分析[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 217-222.
- [12] HABJANIC A, TRLEP M. The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 867-870.
- [13] MELIPOULOS A, MOHARAM M G. Transient analysis of grounding systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(2): 389-399.
- [14] LIEW A C, DARVENIZA M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers IET Digital Library, 1974, 121(2): 123-135.
- [15] LIU Y, THEETHAYI N, GONZALEZ R M, et al. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2003: 794-799.
- [16] MOUSA A M. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1669-1677.
- [17] 国家市场监督管理总局. 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065-2011 [S]. 北京: 水利水电出版社, 2011.
- [18] 王建国, 夏长征, 文习山, 等. 垂直接地体冲击电流作用下接地电阻的测量[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 45-47.
- [19] 杨会民, 陈珺, 刘波. 影响接地电阻的因素及减小接地电阻的方法[J]. 中国测试, 2009, 35(2): 106-108.
- [20] 李景禄, 杨廷方, 周羽生. 接地降阻应用及存在问题分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 65-66.
- [21] 黄飞龙, 巩晶, 唐超, 等. 输电系统设备接地模块降阻效果研究[C]. 重庆市电机工程学会学术会议, 2008: 335-338.
- [22] 孔祥禄. 浅谈 10 kV 配电线路常见故障及防范措施[J]. 甘肃科技, 2013, 29(8): 62-63.

作者简介

务孔永, 学士, 主要研究方向为电气设备的防雷接地、接地测量技术、高电压测量技术等。

E-mail: 386580363@qq.com

张国锋, 学士, 主要研究方向为石墨接地材料的开发与应用。

E-mail: zgf604hh@sina.com

陈泽鹏, 硕士, 主要研究方向为石墨基柔性接地材料在配电网中的应用。

E-mail: w610844419@stu.xjtu.edu.cn

郭洁, 研究员, 主要研究方向为电压防护设备的设计和试验技术。

E-mail: Jguo0510@mail.xjtu.edu.cn