

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.11.003

电力系统接地装置腐蚀特性及其诊断技术

旦乙画¹, 张芮漩²

(1. 清华大学电子系, 北京 100084; 2. 国网重庆市电力公司经济技术研究院, 重庆 401121)

摘要: 接地装置是保证电力设备安全稳定运行和人身安全的重要基础。国内接地装置以碳钢等易腐蚀金属材料为主, 随着投运时间增加, 难以避免腐蚀断裂等问题, 容易引发接地装置腐蚀导致的过电压、跳闸等事故。因此, 研究接地装置腐蚀特性及其诊断技术能够有效避免接地装置腐蚀导致的电力事故, 具有重大意义。文中从接地装置腐蚀特性的角度出发, 介绍了碳钢接地材料的腐蚀机理、常用接地材料的腐蚀特性、土壤的腐蚀特性、电流对接地装置腐蚀的影响; 分析了接地装置腐蚀防护措施的特点, 对比了电化学腐蚀诊断方法、电网络分析诊断方法、电磁场分析诊断方法 3 类典型接地装置腐蚀诊断方法的优缺点; 根据接地装置的实际腐蚀情况, 总结了现有研究面临的挑战。建议下一步研究重点围绕解决不同接地材料之间的腐蚀研究、新型耐腐蚀接地材料研究、接地装置实际腐蚀程度量化、接地装置潜在腐蚀故障诊断、接地引下线腐蚀故障快速诊断等关键问题展开, 为准确诊断接地装置的实际腐蚀程度、避免接地装置腐蚀故障导致的电力事故奠定基础。

关键词: 接地装置; 腐蚀特性; 腐蚀防护措施; 腐蚀诊断方法; 实际腐蚀程度

中图分类号: TU856

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)11-026-16

Corrosion characteristics and diagnosis technologies of grounding devices in power systems

DAN Yihua¹, ZHANG Ruixuan²

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Corporation Economic and Technical Research Institute, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: Grounding devices serve as essential foundations to ensure the safe and stable operation of power equipment and personal safety. Typically constructed with corrosive metal materials like carbon steel, domestic grounding devices are prone to issues such as corrosion fractures over time, leading to potential overvoltage and tripping accidents. Therefore, studying the corrosion characteristics and diagnosis technologies of these grounding devices becomes crucial in preventing power accidents caused by corrosion. From the perspective of the corrosion characteristics of grounding devices, in this paper, the corrosion mechanism of carbon steel grounding materials, corrosion characteristics of common grounding materials, soil corrosion characteristics, and effects of current on grounding device corrosion are reviewed. Various anti-corrosion measures for grounding devices are evaluated, and electrochemical corrosion diagnosis methods, electrical network diagnosis methods, and electromagnetic field

收稿日期: 2022-09-28

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2021TQ0165)。

Supported by the China Postdoctoral Science Foundation (2021TQ0165).

作者简介: 旦乙画(1992—), 男, 博士, 主要研究方向为接地技术和接地腐蚀诊断、电磁参数计算、非线性优化、天线及天线罩设计等, (E-mail)microdanyihua@outlook.com。

analysis diagnosis methods are compared, with their pros and cons highlighted. Challenges faced by existing research in dealing with grounding device corrosion are summarized, and it is suggested that future studies focus on exploring corrosion interactions among different grounding materials, developing new corrosion-resistant grounding materials, quantifying actual corrosion levels in grounding devices, diagnosing potential corrosion faults, and swiftly identifying corrosion issues in ground lead conductors to prevent power accidents effectively.

Keywords: grounding devices; corrosion characteristics; anti-corrosion measures; corrosion diagnosis method; actual corrosion degree

接地装置泛指变电站接地网、输电杆塔接地极等接地金属设施,是保证输变电系统安全稳定运行的重要一环^[1-3]。发生故障或雷击时,接地装置需将故障电流、雷击电流等快速散入土壤中,保证接地点的电位在工程允许范围内,有效避免反击过电压等电力事故^[4-5]。因此,接地装置的运行状态长期受到运维部门的高度重视。出于资源层面考虑,国内的接地装置以碳钢等易腐蚀金属材料为主^[6]。碳钢类接地装置长期埋在土壤中,容易发生腐蚀断裂等问题,导致电力安全隐患。在碳达峰、碳中和、“十四五”的背景下,电力行业的转型对接地系统的安全性提出了更高的要求^[7-8]。研究电力系统接地装置腐蚀特性及其诊断技术至关重要。

国外接地装置大多采用铜材料,腐蚀情况并不严重。因此,接地装置腐蚀相关研究以国内为主^[6,9]。自 20 世纪 90 年代以来,国内学者在常用接地材料的腐蚀机理及腐蚀特性、土壤的腐蚀特性、接地装置的腐蚀防护措施、接地装置的腐蚀诊断方法等方面开展了大量研究。务孔永等^[10]、李松等^[11]、李扬森等^[12]和张国锋等^[13]研究了碳钢、铜覆钢、不锈钢、石墨基柔性复合接地材料等在土壤中的腐蚀特性及接地性能。曹庆洲等^[14]、高攀^[15]和 Zhang 等^[16]分析了直流电流、交流电流作用下接地极的腐蚀机理及形变规律,并研究了接地极腐蚀过程对接地参数的影响。张万友等^[17]和秦晓霞^[18]分析了影响土壤腐蚀性的环境因素和土壤腐蚀性的评价方法,并将灰色理论、模糊聚类方法、人工神经网络方法等应用于土壤腐蚀性的评价过程中,提高了土壤腐蚀性评价的准确度。陈坤汉^[19]、曹阿林^[20]和闫风洁等^[21]分析了阴极保护、膨润土缓蚀剂、导电防腐涂料、杂散电流排流、导电水泥及沥青等方式在接地装置防腐方面的效果。上述腐蚀防护措施具有不同的特点,实际接地工程中需要针对具体情况选择适合的腐蚀防护方案。向睿^[22]和 Zhang 等^[23]提出了基于相对接地电阻的杆塔接地极腐蚀诊断方法,有效消除了土壤电阻率对诊断结果的影响,具有良好的适应性。梅道珺^[24]和 Zhang 等^[25]基于模糊数学提出了引下线断裂的诊断方法、接地装置腐蚀性综合评估方法及腐蚀接地极的寿命预测方法,试验结果验证了提出方法的有效性。针对大型接地网的腐蚀诊断问题,刘健等^[26]、刘渝根等^[27]、Yu 等^[28-29]提出了基于分层约简模型的诊断方法、基于启发式优化算法的诊断方法和基于瞬变电磁法的诊断方法,上述方法在实际腐蚀诊断过程中取得了良好的测试结果。

整体而言,上述研究已为中国接地领域做出了巨大贡献,明晰了土壤中接地装置的部分腐蚀机理,能够实现一些接地网腐蚀断点的初步判断。然而,接地装置的实际腐蚀情况通常比现有研究中的近似等效更复杂,涉及电化学腐蚀机理、电磁场分析技术、数值计算方法等庞杂的内容。为厘清接地装置腐蚀研究的脉络并分析现有研究面临的挑战,笔者重点从碳钢接地材料的腐蚀机理、常用接地材料的腐蚀特性、土壤的腐蚀特性、电流对接地装置腐蚀的影响等方面介绍接地装置腐蚀特性的研究进展,分析接地装置腐蚀防护措施的特点,分析电化学腐蚀诊断方法、电网络分析诊断方法、电磁场分析诊断方法 3 类典型接地装置腐蚀诊断方法的研究现状,总结现有研究面临的挑战,并对下一步研究方向进行展望。本文内容可为未来接地装置腐蚀相关研究提供方向,为变电站、输电线路的接地设计及接地相关的运维部门提供技术支撑。

1 接地装置腐蚀特性的研究进展

接地装置埋在土壤环境中,其腐蚀主要受到接地装置的材料、土壤腐蚀性、外加电流 3 方面的影响。

1.1 常用接地材料的腐蚀特性

接地材料的腐蚀特性指在土壤环境中接地材料自身腐蚀的主要特点。接地装置常用材料主要分为金属

接地材料和非金属接地材料两大类。

1.1.1 碳钢接地材料的腐蚀机理

接地装置的腐蚀问题主要针对碳钢等易腐蚀金属接地材料。本节分析主要以碳钢为例。土壤中的水分覆盖在碳钢接地材料表面,形成微观腐蚀电池,促进局部腐蚀发生。针对碳钢材料和土壤组成的腐蚀系统,碳钢材料表面同时发生阴极反应和阳极反应。其中,阳极反应为^[15]



阴极反应分为2种情况:在氧气充足区域,碳钢材料表面的阴极(吸氧)反应为



在缺氧或酸性环境下,碳钢材料表面的阴极(析氢)反应为

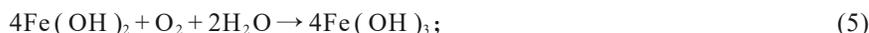


其中, H^+ 尺寸较小,容易渗入碳钢材料腐蚀缺陷部位。式(3)表明,在缺氧或酸性环境下,大量渗入的 H^+ 会在碳钢材料腐蚀缺陷部位反应生成 H_2 ,并在 H_2 的聚集部位产生巨大的膨胀效应,导致氢脆,破坏碳钢接地材料的结构。

根据式(1)~(3)可知,碳钢接地材料表面的生成物会进一步发生如下反应:



式中, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 并不稳定,在潮湿的土壤中容易发生水解反应:



在较为干燥的土壤中,容易发生脱水反应:



在缺氧的土壤中, Fe^{2+} 容易聚集在碳钢材料附近,发生如下反应^[16]:



综上所述,不同土壤环境中碳钢接地材料的腐蚀产物成分主要包括 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeOOH 。其中, FeOOH 主要包括 α - FeOOH 和 γ - FeOOH ^[15]。

式(1)~(7)为无外加激励作用下碳钢接地材料的自然腐蚀机理。实际工程中,接地材料通常受到接地装置中交流电流、直流电流和土壤中杂散电流的影响,上述电流的影响主要表现在对式(1)~(7)中化学反应过程的促进或抑制。各电流分量对接地材料腐蚀的影响在章节1.3进行详细介绍。

1.1.2 金属接地材料

接地装置材料以金属为主,不同金属在土壤环境中的腐蚀机理及速率不同。金属接地材料主要包括铜、碳钢、镀锌钢、镀铜钢、锌包钢等。

1) 铜材料。欧美国家的接地材料以铜为主。IEEE80-2013标准文件中关于接地设计中的材料选择均以铜材料为主^[9]。采用铜作为接地材料,主要具有以下优点:a)导电性能好,纯铜电阻率为 $17.5 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$,约为铜电导率的8倍,能够快速将电流散入大地,保证接地装置的接地性能;b)不容易腐蚀,铜化学性质更加稳定,使用寿命达50年以上。铜的腐蚀生成物 CuO 和 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 能够有效抑制进一步腐蚀。铜材耐腐蚀性是普通钢材的10倍以上,是镀锌钢的3倍以上。主要缺点为:a)铜为有色金属,资源短缺,造价高昂;b)铜为重金属,埋在土壤中容易污染土壤及地下水,存在环境污染问题。

2) 碳钢材料。国内杆塔接地极、变电站接地网等接地装置主要采用碳钢接地材料^[30]。常见形式有圆钢、扁钢、角钢等。采用碳钢作为接地材料,其主要优点是容易制造加工,经济性好,导电性能较好,电阻率约为 $170 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$,与铜材电导率相差一个数量级^[31],但能够基本满足接地装置的电气需求;主要缺点是容易腐蚀。碳钢在土壤中易发生点腐蚀、局部腐蚀,腐蚀部位易出现起层、变脆、断裂等情况,导致接地电阻增加,存在潜在电力安全隐患。

3) 镀铜钢、不锈钢、镀锌钢等其他金属材料^[11-12]。为充分利用钢材在造价等方面的优势,并解决钢材在耐腐蚀性方面的不足,大量学者提出了采用基于钢合金材料的解决方案。常见的合金接地材料有镀铜钢、不

锈钢、镀锌钢等。其中,镀锌钢存在造价较高的问题。不锈钢材料容易发生点蚀,由于不锈钢的合金含量较高,导电能力存在一定下降。镀锌钢是目前接地领域采用较多的合金材料,具备工艺简单、价格低廉、导电性能好等优点。然而,镀锌钢是以镀锌层作为牺牲阳极,形成氧化膜,保护内部的碳钢。镀锌层的腐蚀速率和碳钢相当,且和土壤环境相关,在酸性土壤中耐腐蚀性差。因此,镀锌层破坏或腐蚀殆尽后,镀锌钢接地极的耐腐蚀性会显著下降。为提高镀锌层的耐腐蚀性,周开颜等^[32]提出采用 Zn-Mg 镀层的方式。整体而言,镀锌材料及大部分合金镀层方式能够一定程度延长碳钢接地极的寿命,但其可持续性不足,并非一种一劳永逸的解决方案。

1.1.3 非金属接地材料

非金属接地材料^[10,13]主要指石墨类接地材料和导电防腐涂料等。石墨类接地材料主要包括石墨金属复合材料、柔性石墨复合材料、石墨导电混凝土、石墨接地模块等。石墨材料具有热稳定性好、导电性能好、耐腐蚀性好等优点。在腐蚀过程中,石墨电解速度比多数金属缓慢,表现出比多数合金更好的耐腐蚀性^[33]。但石墨材料质地较脆,运输过程中容易导致损坏。因此,石墨接地材料主要作为现有接地方式的补充,有助于提高现有接地装置的导电性能及耐腐蚀性^[34]。导电防腐涂料是一种外加式防腐方法,主要分为本征型涂料(非添加型)和复合掺杂型涂料(添加型)^[35]。本征型涂料通过直接合成导电高分子聚合物,并制备成涂料,其各方面性能整体不如复合掺杂型涂料。因此,接地装置防腐涂料以复合型导电防腐涂料为主,比如石墨烯复合型涂料、碳纳米管复合型涂料、石墨烯/碳纳米管复合型涂料等^[36-37]。整体而言,大多导电防腐涂料仍存在成本高、容易破损、破损后容易加速接地装置局部腐蚀等问题。

1.2 土壤腐蚀性

土壤腐蚀性主要指金属材料在土壤中发生腐蚀的难易程度。接地装置埋设在土壤中,直接受到土壤腐蚀性的影响。土壤是一个由气、液、固三相物质构成的复杂多孔介质,具有电解质的特征。实际工程中土壤环境非常复杂,仅国内就有多达 40 余种土壤类型^[38]。

1.2.1 土壤腐蚀性的主要影响因素

按照《国家材料环境腐蚀野外科学试验网站材料土壤腐蚀试验规程》,土壤包含 28 种环境因素,文中重点介绍以下 7 种对土壤腐蚀性影响较大的参数:含水量、含氧量、含盐量、微生物含量、孔隙度、pH 值和电阻率^[38]。

1) 含水量。土壤含水量^[39]升高,含盐量和腐蚀电流增加,土壤腐蚀性增强。然而,当土壤含水量过高时,氧气的扩散效应受到阻碍,土壤腐蚀性减弱。当土壤含水量小于 10% 时,含盐量减小,土壤电阻率增加,土壤腐蚀性降低。

2) 含氧量。土壤中含氧量^[20]不同容易造成浓差电池腐蚀,增加土壤腐蚀性。土壤含氧量较少时,金属材料通常作阳极运行,容易腐蚀。土壤含氧量较多时,金属材料通常作阴极运行,不易腐蚀。土壤含氧量和土壤含水量、土壤孔隙度密切相关。土壤含水量较低(干燥)或孔隙度较大(稀疏)时,氧气容易通过,土壤中氧气含量较高,土壤腐蚀性通常较弱。土壤含水量较高(湿润)或土壤孔隙度较小(密实)时,氧气难以通过,土壤中氧气含量较低,土壤腐蚀性通常较强。

3) 含盐量。土壤电解质中阳离子有 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 等,阴离子有 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等^[40]。一般来说,土壤含盐量越大,电阻率越低,土壤腐蚀性越强。另一方面, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在非酸性土壤中可生成氧化物和盐的保护层, SO_4^{2-} 和土壤中 Pb^{2+} 可生成 $PbSO_4$ 保护层,保护层附着在接地金属材料表面,能够一定程度上降低土壤腐蚀性。

4) 微生物含量。土壤中的微生物^[41]有厌氧的硫酸盐还原菌、硫杆菌和好氧的铁杆菌。在大多土壤环境条件下,多种微生物共存,对土壤腐蚀性产生更复杂的影响。微生物主要通过以下方式影响土壤腐蚀性:a) 微生物新陈代谢会产生无机酸、有机酸、硫化物、氨等产物,上述代谢产物均具有腐蚀作用;b) 微生物会改变接地金属材料附近的氧浓度、含盐量、酸度等,形成局部浓差腐蚀电池;c) 微生物容易破坏接地金属材料表面保护层的稳定性;d) 微生物可促进接地金属材料腐蚀的阴极去极化过程。

5) 孔隙度。孔隙度^[42]是土壤结构参数之一,和土壤含水量、含氧量相关。其中,含水量和含氧量是影响

土壤腐蚀性的重要因素。孔隙度较大,可为土壤中渗透更多氧气及水分奠定基础。另一方面,孔隙度较大的土壤容易促进接地金属材料生成具有保护能力的腐蚀产物层。孔隙度较小的区域,氧浓差腐蚀电池容易导致接地金属材料的阳极反应区域发生严重腐蚀。

6) pH值。pH值^[43]表征土壤酸碱性。pH在3.0到6.0之间的土壤为酸性土壤(腐殖土和沼泽土),pH在6.0到7.5之间的土壤为中性土壤,pH在7.5到9.5之间的土壤为碱性土壤(砂质黏土和盐碱土)。一般来说,土壤腐蚀性随pH减小而增强。因为酸性条件能够促进氢的去极化过程,导致土壤腐蚀性增强。此外,当土壤中含有大量有机酸时,即使土壤pH值接近中性,仍具有较强腐蚀性。土壤酸度的来源复杂,包括酸性矿物质、微生物活动产生的有机酸和无机酸、工业污染等。因此,通常通过测定土壤总酸度(酸性物质含量)来评估土壤腐蚀性。

7) 电阻率。土壤电阻率^[38]和土壤孔隙度、含水量及含盐量等相关,可视为综合体现土壤腐蚀性的一个参数。大多数情况下,土壤电阻率越小,腐蚀性越强;反之,腐蚀性越弱。

1.2.2 土壤腐蚀性的评价方法

土壤腐蚀性主要通过土壤中金属样品的腐蚀速率判断,主要包括失重法、电化学测试分析法、单一指标评价法、多指标综合评价法^[44]。

1) 失重法。将接地金属材料样品放置在土壤试样中一段时间,按一定周期对样品进行清洗、除锈、干燥、称量等处理,确定接地金属材料样品在土壤中的腐蚀失质量率和腐蚀速率。该方法能够准确反映土壤腐蚀性,常作为参考标准。但失重法耗时长、工作量大,存在测量效率不足等问题^[45]。

2) 电化学测试分析法。土壤中的接地金属腐蚀是一个复杂的电化学腐蚀过程。通常可采用电化学测试分析法(极化曲线分析法、电化学阻抗谱分析法)对土壤的腐蚀特性进行分析。

极化曲线分析法主要包括 Tafel 直线外推法、线性极化法和弱极化区极化曲线法^[46]。Tafel 直线外推法需要测量土壤样品中接地金属的极化曲线,通过外推强极化区的直线,求得 Tafel 斜率等参数。然而,金属在土壤中的电化学腐蚀通常存在多对腐蚀反应,Tafel 区可能并不明显。因此,该方法通常误差较大。线性极化法是通过外加电流测试接地金属极化电位在自然腐蚀电位附近正负 10 mV 内的极化电阻^[47]。结合其他途径获取的 Tafel 常数,可计算接地金属在土壤样品中的腐蚀电流和腐蚀速率。该方法无法直接测得 Tafel 常数,腐蚀电位漂移大,容易导致严重误差。弱极化区极化曲线法通过测量土壤试样中接地金属弱极化区的数据,分析测量腐蚀电流、Tafel 常数等电化学参数,得出土壤中接地金属的腐蚀速率。该方法常采用曲线拟合等方法进行数据处理,存在拟合结果容易不收敛等问题。

电化学阻抗谱又称交流阻抗技术^[48],通过外加小幅度交流信号,测试土壤中接地金属的响应电流等参数,通过数据分析得到阻抗变化图谱,分析图谱中包含的电化学信息,得出土壤中接地金属腐蚀的相关参数。该方法是目前金属腐蚀研究中最常用的测试手段之一,但实际腐蚀过程的阻抗谱通常比较复杂,在阻抗谱参数解析方面存在一些困难。

3) 单项指标法。影响土壤腐蚀性的主要土壤参数已在章节 1.2.1 中进行分析。分析结果表明,影响土壤腐蚀性的主要指标通常存在相互影响。比如,含水量、含氧量和土壤孔隙结构相关,土壤电阻率和含水量、含盐量等相关。各个指标均通过不同的方式影响着土壤腐蚀性,如图 1 所示。

因此,采取单项指标^[19]评价通常仅能从某一方面判断土壤腐蚀性,分析结果具有一定片面性。

4) 多项指标法。多项指标法^[18,49]是指通过分析多个土壤参数对土壤腐蚀性的综合影响,实现土壤腐蚀性的准确判断。针对多项指标法的土壤腐蚀性综合评估方法研究,国外学者提出了 Baeckman 评价法、DIN50929 评价法、ANSI A21.5 评价法等广泛应用的方法^[50]。国内学者将线性映射、主成分分析、Fisher 判别、聚类分析、模糊数学、神经网络算法等多种识别技术用于土壤腐蚀性的综合判断^[24,51],并取得了良好的识别结果。整体而言,土壤中的实际腐蚀情况包含各种影响因素,且各影响因素之间的关系错综复杂,现有土壤腐蚀性多项指标综合评价方法在准确性、可靠性、适应性等方面仍存在一定局限性。

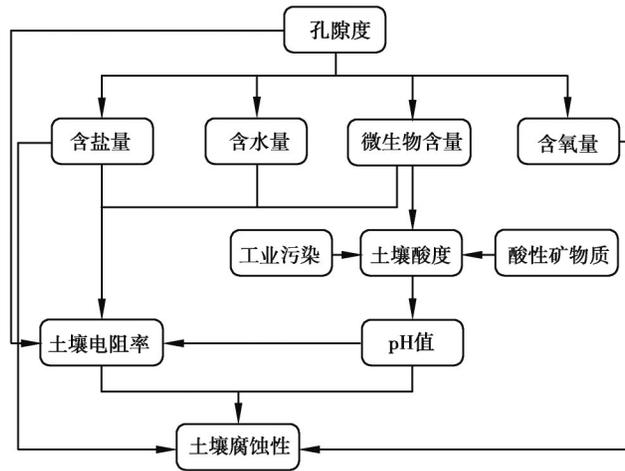


图 1 土壤参数和土壤腐蚀性的关系

Fig. 1 The relationship between soil parameters and soil corrosivity

1.3 电流对接地装置腐蚀的影响

接地装置不同于普通埋地金属,其表面通常长期存在不同成分的电流。对于单极运行的直流输电系统,直流接地极中存在大量直流电流。对于交流输电线路,当输电杆塔架空地线接地时,架空地线上存在自身和输电导线之间的工频感应漏电流,该电流会通过架空地线、接地引下线注入杆塔接地极,导致杆塔接地极中存在架空地线上流入的工频感应漏电流。对于中性点接地的变压器,当变压器三相不平衡运行时,中性点存在不对称的工频电流分量,导致变电站接地网中存在变压器接地中性点流入的三相不对称工频电流。另一方面,类似于其他埋地金属,接地装置的腐蚀仍会受到土壤中杂散电流的影响。

1.3.1 直流腐蚀

将直流电流作用下土壤中接地金属材料的腐蚀定义为直流腐蚀。对于单极运行的直流接地极,电流总是从一个直流接地极流入,并从另一个直流接地极流出,如图 2 所示^[52]。

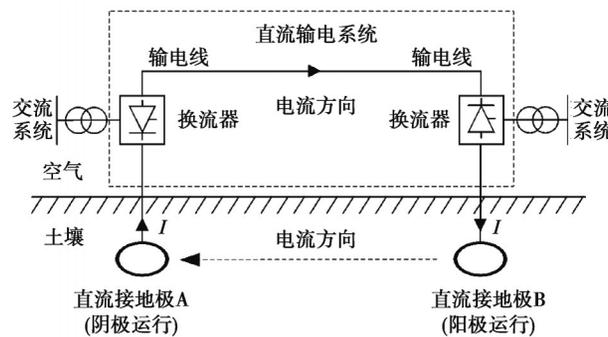


图 2 单极运行时直流接地极运行示意图

Fig. 2 Operation diagram of DC grounding electrodes during unipolar operation

根据图 2 可知,土壤、直流接地极和直流输电系统可看作一个电解池系统。电流从土壤经过直流接地极 A 流入直流输电系统,直流接地极 A 作为阴极运行。电流从直流输电系统经过直流接地极 B 流入土壤,直流接地极 B 作为阳极运行。根据电解池原理可知,直流入地电流加速了接地极 B 的腐蚀溶解,对接地极 A 形成阴极保护,大大降低了接地极 A 的腐蚀速率。综上所述,对于作阳极运行的直流接地极,为避免接地腐蚀故障导致的电力事故,需要考虑对其采取额外的腐蚀防护措施。

1.3.2 交流腐蚀

将交流电流作用下土壤中接地金属材料的腐蚀定义为交流腐蚀。变电站接地网、输电杆塔接地极中均长期存在工频电流分量,如图 3 所示。

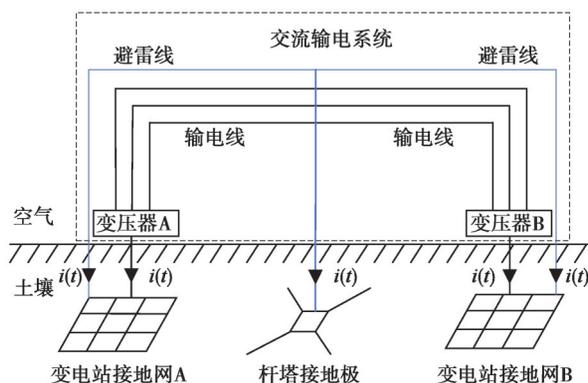


图3 交流接地极运行示意图

Fig. 3 Operation diagram of AC grounding electrodes

交流电流总是在正负2个周期内交替变化。当电流从接地材料流入土壤的半个周期内,接地材料作阳极运行,腐蚀速率增大。当电流从土壤流入接地材料的半个周期内,接地材料作阴极运行,腐蚀速率减小。交流电流作用下,接地金属材料阴极运行、阳极运行交替变化。整体而言,交流电流作用下接地金属腐蚀速率比较缓慢,其危害性远小于直流腐蚀^[53]。

1.3.3 杂散电流腐蚀

对于接地的电力设施而言,电流通过接地引下线和接地装置流入土壤中,通常将这一部分土壤中的电流称为杂散电流或迷走电流。杂散电流广泛存在于交直流高压输电系统、轨道交通供电系统、手机基站供电系统、船舶供电系统等。以杂散电流腐蚀较严重的轨道交通系统为例,电流从接地装置A、铁轨流入土壤,并从远处的接地装置B回流至牵引变电所,如图4所示。在上述过程中,在接地装置及铁轨附近通常存在较大杂散电流。将杂散电流作用下土壤中金属材料的腐蚀定义为杂散电流腐蚀。

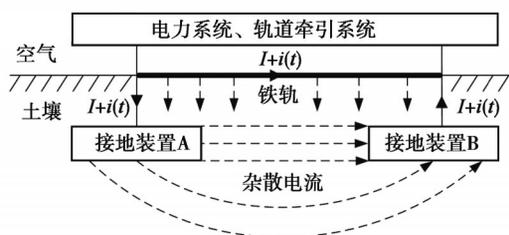


图4 杂散电流示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stray current

杂散电流包括直流杂散电流和交流杂散电流,主要取决于入地电流的性质,因此,杂散电流腐蚀可视为一种特殊的直流腐蚀或交流腐蚀。杂散电流腐蚀具有腐蚀强度大、腐蚀部位集中、点蚀可能性大等特点^[54]。对于靠近铁轨、直流接地极等设施的接地装置,通常更容易发生杂散电流腐蚀。对于埋地金属管道,杂散电流腐蚀主要通过金属材料的对地电位差进行判断,不同国家的标准在20 mV到100 mV之间,当超过标准电位差时,则认为存在杂散电流腐蚀,需要进行杂散电流排流等腐蚀防护措施^[20,55]。然而,接地装置中通常长期存在电流分量,并同时受到自然腐蚀、交流腐蚀、直流腐蚀、杂散电流腐蚀等多个因素影响,腐蚀情况更复杂。目前,杂散电流对电力系统接地装置腐蚀的影响还有待研究。

2 接地装置腐蚀防护措施的研究进展

针对接地装置的腐蚀问题,主要从材料选择、接地装置设计、添加缓蚀剂、阴极保护等方面对其进行腐蚀防护。

2.1 接地材料选择

国内接地金属材料以碳钢为主,第1.1节中涉及的镀铜钢、镀锌钢、不锈钢、石墨、导电防腐涂料等材料均

能够一定程度上提高接地装置的耐腐蚀能力。然而,镀铜钢造价较高。镀锌钢等合金材料本质上是通过牺牲镀层金属来保护碳钢材料,使用寿命方面提升不大。石墨、导电防腐涂料通常作为提升现有接地装置耐腐蚀性的一种补充手段。综上所述,现有接地材料仍存在一些不足。综合考虑成本、耐腐蚀性、使用寿命等方面,现阶段仍缺乏一种能够完全替代传统碳钢的新型接地材料^[56]。

2.2 接地装置设计

接地装置设计^[30,57]过程中,可采取截面较大的金属来避免腐蚀断裂引起的电力事故。目前,圆柱状钢、铜接地材料最小直径在 10~20 mm 范围内,带状镀锌钢、不锈钢的最小截面积为 90 mm²^[34]。然而,增大接地金属截面积的方法没有减缓接地金属材料在土壤中的腐蚀速率,未能从本质上解决土壤中接地金属的腐蚀问题。此外,接地材料截面积增加直接导致成本大幅增加。因此,接地装置设计主要是作为避免腐蚀断裂引起电力事故的手段,并非从机理层面提升接地装置材料耐腐蚀性的方法。

2.3 添加缓蚀剂

直流接地工程中,通常会在直流接地极附近埋设大量干燥的焦炭作为缓蚀剂^[58]。干燥的焦炭是一种电子性导电材料^[59],电子在接地金属和焦炭之间能够自由交换。因此,干燥的焦炭和接地金属之间不会发生电解反应,能够抑制接地金属的腐蚀。同时,焦炭是非离子晶体,不能被电解,焦炭和土壤表面主要为离子放电,并伴随气体析出。施工过程中需注意,焦炭不夯实容易导致防腐能力不足,焦炭过于夯实容易导致析出气体难以排除。目前该方法主要应用于直流接地工程。

2.4 阴极保护法

阴极保护法^[60]主要分为牺牲阳极法和外加电流法。牺牲阳极法是采用比被保护接地金属腐蚀电位更负、更容易腐蚀的金属(Mg 及其合金、Zn 及其合金)与被保护接地金属材料连接,以更容易腐蚀的金属作为牺牲阳极,对被保护的接地金属形成阴极保护。外加电流法需要将保护的接地金属长期连接至恒电位仪的负极,通过长期外接电源对接地金属达到阴极保护的的目的。上述阴极保护方法均能够对接地金属进行较好的腐蚀防护,但在接地装置设计及运维方面会增加一定成本。综合考虑接地装置的复杂性及现场实施条件,目前阴极保护法并未在实际接地工程中广泛应用。

3 接地装置腐蚀诊断方法的研究进展

腐蚀导致接地金属材料变细、断裂,腐蚀产物附着在接地装置表面,劣化接地装置的接地性能,容易造成反击过电压等电力安全事故。接地装置的接地性能主要根据三极法等方式测量的接地阻抗进行评估^[61-62]。接地网中大部分导体主要起匀压作用,导体之间距离较近,屏蔽作用显著,单根导体对降低接地电阻的贡献并不显著,少数导体腐蚀断裂后对接地网的接地阻抗影响并不大。因此,接地阻抗测试方法主要用于评估接地网整体的接地性能,难以准确评估接地网局部腐蚀程度及具体腐蚀位置等。现有接地装置腐蚀诊断方法主要分为电化学腐蚀诊断方法、电网络分析诊断方法和电磁场分析诊断方法。

3.1 电化学腐蚀诊断方法

电化学腐蚀诊断方法是通过测量接地金属材料腐蚀电化学参数分析接地装置的腐蚀情况。以典型的变电站腐蚀接地网为例,基于三电极测量体系的电化学检测系统如图 5 所示。接地装置通常作为工作电极,参比电极为 Cu/CuSO₄ 参比电极,辅助电极为石墨或不锈钢等耐腐蚀性金属^[60]。参比电极和石墨电极通常埋设在接地网附近。

为抑制无关的干扰信号,接地网腐蚀程度电化学检测过程中通常选择暂态测量技术,并采用小波变换等滤波技术、Levenberg-Marquardt 等拟合方法处理测量数据^[63]。最终,通过分析充电曲线等参数,获取接地网的极化电阻,进而判断土壤中接地网的腐蚀程度。为提高接地网电化学腐蚀诊断方法的准确性,一些学者从传感器研制、数据处理方法优化、腐蚀分析软件开发等方面改进了传统电化学诊断方法^[64]。电化学腐蚀诊断方法的优点是从腐蚀机理出发,能够直接有效地表征接地网腐蚀参量。然而,电化学诊断方法主要存在两方面问题:1)难以解决接地网上的强噪声信号、土壤中的杂散电流和测量过程中弱测试信号之间的矛盾。由于噪声信号、杂散电流等通常远强于电化学诊断方法的测试信号,传感器的测量信号容易被上述强信号覆盖,导致诊断结果不准确。2)不同于典型三电极测量系统中的小尺寸待测物件,接地网尺寸较大,测试过程中极化电流存在于整个接地网上,被极化的接地网金属面积难以确定,容易导致腐蚀电流密度计算出现较大误

差。整体而言,电化学腐蚀诊断方法主要用于理论分析、实验室研究,尚未在实际工程中广泛应用。

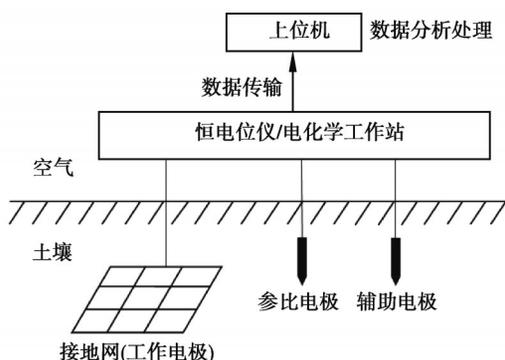


图5 接地网腐蚀程度电化学检测系统

Fig. 5 Electrochemical detection system for corrosion level of grounding grids

3.2 电网络分析诊断方法

传统接地网腐蚀断点检测方法主要是导通电阻测试法^[65-66]。电流注入和电压响应测试在2个相同的可及节点上,通过可及节点之间的导通电阻来判断接地网的腐蚀断点情况。当接地导体的腐蚀断点距离测试节点较远时,测试节点之间的导通电阻变化往往不明显,难以发现腐蚀断裂位置^[66]。因此,导通电阻测试方法需要多次轮换测试不同可及节点之间的导通电阻,确保每个可及节点附近均无腐蚀断点,存在测量效率低、随机性大等问题。为解决上述问题,大量研究将电网络分析诊断方法引入接地网腐蚀诊断过程中。通过不同激励方式测量不同接地引下线间的电压响应,进而采用接地网腐蚀故障诊断算法评估接地网的腐蚀情况,如图6所示。其中,接地网的节点主要分为可及节点和不可及节点。可及节点通常通过接地引下线与外部电气设备连接,反之,则为不可及节点。

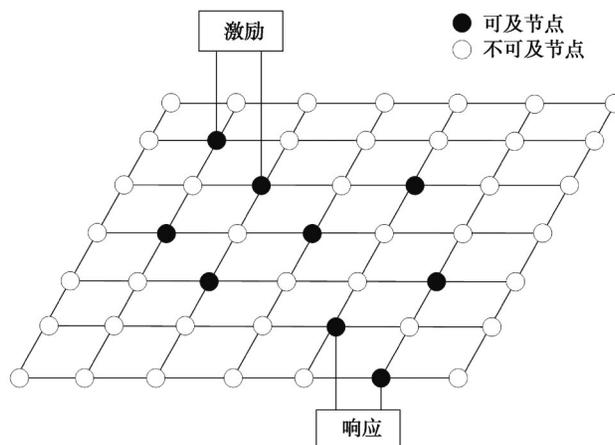


图6 腐蚀接地网电网络诊断方法

Fig. 6 The electric network diagnosis method for corroded grounding grids

接地网腐蚀故障诊断方法主要基于特勒根定理和灵敏度矩阵^[67]。根据图6可知,可及节点数量通常小于接地网的节点总数,腐蚀诊断方程具有欠定性和非线性。为采集更多相关数据,测量过程中通常需要轮换激励源及测量响应点的位置^[68]。此外,电网络腐蚀诊断法需要已知接地网拓扑结构,然而,施工不规范等问题经常导致实际接地网结构和施工图纸不完全一致。为修正接地网未知拓扑带来的误差,张瑞强^[69]提出了拓扑结构变化的修正方法、接地网未知拓扑重构等方法。重庆大学的研究团队将遗传算法、人工蜂群算法、支持向量机等优化算法用于腐蚀诊断过程,提出了分步分块的测量方法、导体腐蚀断裂的诊断方法、接地网腐蚀诊断的优化方法,提高了传统电网络诊断方法的测量效率和准确度^[27,70-71]。西安科技大学的研究团队提出了基于网络拓扑分层约简的接地网腐蚀诊断模型^[26,72]、基于蒙特卡罗法的接地网腐蚀诊断方案^[73]、接地网故

障诊断的 4 类可测性指标等^[74],大量试验结果验证了提出方法的可靠性。综上所述,国内学者在基于电网络分析的接地网腐蚀诊断技术方面已经积累了大量实践经验。然而,电网络分析诊断方法主要存在以下问题:1)缺乏研究接地导体断裂前接地网不同腐蚀程度的诊断技术,难以预防接地导体腐蚀断裂导致的电力事故。腐蚀断裂前接地导体上电磁信号变化并不显著,因此,现有电网络分析诊断方法侧重于诊断接地网支路的断裂与否。2)依赖接地网的拓扑结构,在图纸缺失的情况下,诊断结果容易存在较大误差。3)测量及计算效率有待进一步提高。由于不可及节点数量较多,测量数据不够,容易造成方程欠定,需要对可及节点进行激励源、测量响应点的位置轮换,工作量较大。整体而言,现有研究缺乏提出一种准确、高效的接地网腐蚀诊断方法。

3.3 电磁场分析诊断方法

电磁场分析诊断方法通过测量地面电磁场对接地网导体缺陷进行诊断,该方法由国外学者 Dawalibi 首次提出^[75]。按照激励方式分类,接地网腐蚀诊断的电磁场分析方法主要包括异频电流激励方法和发射机磁场激励方法^[76]。异频电流激励方法是通过对接地网注入异频(30 Hz~30 kHz)正弦电流(几安到几十安),测量分析腐蚀接地网正上方地表磁场的变化,实现接地网腐蚀断点的诊断^[77]。发射机磁场激励方法又叫瞬变电磁法,是通过在接地网附近放置一个发射机作为磁场激励,发射机中的电流在某一个时刻被迅速关断,大地会感应出一个二次磁场来阻止一次磁场(发射机产生的磁场)的变化^[28-29]。二次磁场由于欧姆损耗逐渐减弱,在腐蚀接地网上形成电涡流。最终,通过分析腐蚀接地网表面电涡流产生的磁场,实现接地网的腐蚀诊断。国内已经有部分学者在基于瞬变电磁法的接地网诊断技术方面取得重要进展^[78]。整体而言,电磁场分析方法的优点主要表现在不受不可及节点位置的影响,对非不可及节点区域的接地网腐蚀缺陷情况仍具有较好精度,测量效率较高。然而,电磁场分析方法主要存在以下问题:1)电流激励类方法难以准确测量距离电流注入节点较远区域的接地网腐蚀缺陷情况。注入点附近的电磁场强,远离注入点处的电磁场弱且磁场分布不均匀,难以准确提取腐蚀引起的电磁场变化特征,难以通过一次电流激励准确探测接地网整体的腐蚀缺陷情况。2)测量结果容易受到干扰。变电站内的电磁环境复杂,谐波、开关操作和线路电流变化引起的工频磁场干扰可达十几微特斯拉。同时,变电站内接地网上方的大量电力设备也会对测量过程中电磁场分布产生影响,导致测量误差。

4 现有研究面临的挑战

接地网腐蚀是国内电力行业的一个典型问题,几十年来,国内学者及工程人员在接地网腐蚀相关研究中做出了巨大贡献。然而,笔者认为现有接地装置腐蚀相关的研究仍面临以下几方面挑战。

4.1 不同接地材料之间的腐蚀研究

为解决碳钢腐蚀问题,电力行业已经提出了多种接地材料。综合考虑成本、接地性能、接地系统体量等因素,各种新型接地材料难以完全替代传统接地网。为改善现有接地极的接地性能,实际工程中石墨、镀锌钢、非金属涂层等接地材料通常和主体碳钢接地装置混合使用。因此,不同新型金属材料之间的连接存在新的电化学腐蚀问题。例如,不同材料的腐蚀电位不同,2种不同接地材料连接后,容易导致腐蚀电位较低的材料及其连接点处加速腐蚀,对连接方式及工艺等均提出了新的要求。为解决不同接地材料的连接问题,不同新型接地材料之间的腐蚀机理及连接方式均需进一步研究。

4.2 新型耐腐蚀接地材料研究

添加缓蚀剂、阴极保护等腐蚀防护措施存在有效期短、运维成本高等问题。导电防腐涂料存在涂层易破损,涂层脱落后可能加速接地材料的局部腐蚀,导致整体服役周期不足等问题。整体而言,研究耐腐蚀接地材料更能够从根本上解决接地装置的腐蚀问题。现有接地材料以碳钢、钢合金材料为主。土壤中钢材料本身腐蚀速率较大;各类钢合金材料难以长时间保持较好的耐腐蚀性,合金镀层容易在几年内脱落。另一方面,考虑到铜材料的成本,我国现阶段难以采用铜材料完全替换现有接地装置。为解决上述现有接地材料存在的腐蚀问题,亟需研究一种耐腐蚀性强、成本低、寿命长、能够适用于不同土壤环境的新型耐腐蚀接地材料。

4.3 接地装置实际腐蚀程度量化

接地装置实际腐蚀程度量化可为接地装置腐蚀诊断提供理论依据。实际腐蚀产物通常呈点腐蚀、面腐蚀等非均匀分布,为一个粗糙面。然而,现有研究通常将腐蚀产物近似为接地导体表面覆盖的高电阻率均匀涂层,缺乏考虑实际腐蚀产物的非均匀性,和实际腐蚀情况存在一定差异。另外,腐蚀产物在不同腐蚀阶段具有不同的成分、结构,导致不同腐蚀程度下腐蚀产物的电导率、磁导率、介电常数等电磁参数的不同。同时,实际腐蚀产物表面粗糙、结构复杂,难以直接通过现有仪器进行全面而准确的测试。上述方面均导致难以形成接地装置实际腐蚀程度量化标准。因此,不同阶段腐蚀产物的电磁特性及形貌特征、接地装置实际腐蚀程度的量化等工作仍需进一步研究。

4.4 接地装置潜在腐蚀故障诊断

现有接地装置的腐蚀诊断方法以电网络分析诊断法和电磁场诊断方法为主,难以准确诊断出接地导体腐蚀断裂前的潜在腐蚀故障,即准确诊断出接地导体的腐蚀程度及腐蚀断裂的概率。在接地网腐蚀过程中,只要接地导体未彻底断裂,电磁测量过程中不同腐蚀程度接地装置的电磁响应变化并不显著,给准确判断接地装置的腐蚀程度带来了困难。另一方面,由于腐蚀导致的测量信号变化较小,变电站内复杂的电磁环境容易对腐蚀诊断过程中的测量信号造成极大干扰。综上所述,接地装置潜在腐蚀故障诊断过程中的激励方式、测量方式、数据处理方法等方面均有待进一步研究。

4.5 接地引下线腐蚀故障快速诊断

接地引下线是电力设备和接地装置的重要组成部分。实际工程中,接地引下线更容易发生腐蚀断裂,导致电力设备和接地装置断开,造成潜在的电力安全事故。接地引下线腐蚀断裂的位置主要有2处:1)空气、土壤交界处;2)引下线和接地装置焊接处。由于接地引下线一部分在空气中,一部分在土壤中,接地引下线在空气、土壤交界处涉及的环境更复杂,容易加速腐蚀。另一方面,接地引下线和接地装置通过焊接方式固定在一起,焊接材料、焊接工艺均对腐蚀有较大影响。同时,当引下线和接地装置材料不同时,存在电偶腐蚀,容易进一步加速焊接点的腐蚀断裂。对于接地引下线焊接点处的腐蚀断点问题,主要采用导通电阻测试法进行诊断。当引下线断点不在电流注入、电压响应测试节点上,难以发现引下线的断点问题。因此,该方法通常需要对每根接地引下线均做导通测试,由于变电站内接地设备较多,测量效率较低。此外,现有方法仍难以在导体完全断裂前准确诊断接地引下线的腐蚀程度、腐蚀位置、腐蚀断裂概率等。综上所述,接地引下线腐蚀故障快速诊断方法还有待进一步研究。

5 总结

为保证电力设备安全稳定运行,准确分析腐蚀接地装置的接地特性和诊断接地装置的腐蚀程度至关重要。文中系统分析了接地装置腐蚀特性、接地装置腐蚀诊断及现有研究方法面临的挑战。

1)接地装置的腐蚀主要受到接地装置材料、土壤腐蚀性、外加电流3方面的影响。接地装置材料主要包含金属材料和非金属材料2类,国内接地装置材料整体以碳钢为主。土壤腐蚀性主要受到含水量、含氧量、含盐量、微生物含量、孔隙度、pH值和电阻率等参数的影响,其评价方法主要有失重法、电化学测试分析法、单一指标评价法、多指标综合评价法。外加电流对接地装置的腐蚀影响主要分为直流腐蚀、交流腐蚀、杂散电流腐蚀。其中,直流腐蚀和杂散电流腐蚀对接地装置影响较大。

2)接地装置腐蚀诊断方法主要分为电化学腐蚀诊断法、电网络分析诊断法和电磁场分析诊断法。电化学腐蚀诊断法和电磁场分析诊断法均存在测量信号弱、容易被干扰等问题,电网络分析诊断法存在需要已知接地网拓扑结构等不足。整体而言,实际工程中接地装置的腐蚀诊断以电网络分析诊断法和电磁场分析诊断法为主。

3)现有研究主要面临以下挑战:不同接地材料之间的腐蚀研究、新型耐腐蚀接地材料研究、接地装置实际腐蚀程度量化、接地装置潜在腐蚀故障诊断、接地引下线腐蚀故障快速诊断等。建议后续研究围绕解决以上问题开展,为准确诊断接地装置的腐蚀程度、避免接地装置腐蚀导致的电力事故奠定基础。

参考文献

- [1] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京:水利电力出版社,1989:1-15.
Xie G R. Grounding technology of power systems[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1989:1-15. (in Chinese)
- [2] 陈先禄, 刘渝根, 黄勇. 接地[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2001: 1-10.
Chen X L, Liu Y G, Huang Y. Grounding[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2001:1-20. (in Chinese)
- [3] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社, 2006: 1-10.
He J L, Zeng R. Grounding technology of power systems[M]. Beijing: Science Press, 2006:1-10. (in Chinese)
- [4] 袁涛, 雷超平, 司马文霞, 等. 提高接地极散流效率的冲击接地降阻分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 278-284.
Yuan T, Lei C P, Sima W X, et al. Analysis of grounding resistance reduction effect based on enhancing impulse current leakage efficiency [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 278-284. (in Chinese)
- [5] 袁涛, 唐妍, 司马文霞, 等. 短导体对水平接地极冲击特性的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 177-185.
Yuan T, Tang Y, Sima W X, et al. Simulation analysis of the impact characteristic of grounding electrode based on the current shielding effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 177-185. (in Chinese)
- [6] 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 B, He J L, Zeng R. State of art and prospect of grounding technology in power system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2569-2582.(in Chinese)
- [7] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.
Jiang H L, Liu Y X, Feng Y M, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th five-year plan under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64.(in Chinese)
- [8] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
Li H, Liu D, Yao D Y. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259. (in Chinese)
- [9] Substations Committee of the IEEE Power and Energy Society. IEEE guide for safety in AC substation grounding: IEEE Std 80™-2013 [S]. IEEE, 2013.
- [10] 务孔永, 张国锋, 陈泽鹏, 等. 10 kV 配网用石墨接地材料的性能测试研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 18-23.
Wu K Y, Zhang G F, Chen Z P, et al. Research on performance test of graphite grounding material for 10 kV distribution network[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(23): 18-23. (in Chinese)
- [11] 李松, 王荆, 何华林, 等. 碳钢接地材料在含氧土壤溶液中的腐蚀行为研究[J]. 电工技术, 2021(9): 148-150.
Li S, Wang J, He H L, et al. Research on corrosion behavior of carbon steel grounding material in oxygenated soil solution[J]. Electric Engineering, 2021(9): 148-150.(in Chinese)
- [12] 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 Y S, Zhang C W, Liu S, 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. (in Chinese)
- [13] 张国锋, 余飞宏, 尹李健, 等. 基于有限元分析的石墨柔性接地体冲击接地特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(5): 128-134.
Zhang G F, Yu F H, Yin L J, et al. Impact grounding characteristics of flexible graphite grounding body based on finite element method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(5): 128-134. (in Chinese)
- [14] 曹庆洲. 接地极电流溢散特性及对接地极腐蚀的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 57-76.
Cao Q Z. Study on the characteristics of grounding electrode current overflow and its influence on grounding electrode corrosion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 57-76. (in Chinese)
- [15] 高攀. 碳钢接地极电流溢散对腐蚀过程的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 23-50.
Gao P. Study on the effect of grounding current discharge on the corrosion process of carbon steel grounding electrode [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 23-50. (in Chinese)
- [16] Zhang Z L, Gao P, Dan Y H, et al. A simulation study of the direct current corrosion characteristics of carbon steel grounding electrode with ground lead[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(12):11974-11985.
- [17] 张万友, 隋兴东. 天津市变电站土壤腐蚀性分析[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(1): 56-61.
Zhang W Y, Sui X D. Analysis of Tianjin substation soil corrosion [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39 (1): 56-61. (in Chinese)
- [18] 秦晓霞. 埋地管道土壤腐蚀性与防护研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009: 5-51.

- Qin X X. Research on soil corrosion and protection of pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009: 5-51. (in Chinese)
- [19] 陈坤汉. 接地装置腐蚀机理与防腐措施的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008: 55-67.
Chen K H. Study on corrosion mechanism and anti-corrosion measures of grounding device [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008: 55-67. (in Chinese)
- [20] 曹阿林. 埋地金属管线的杂散电流腐蚀防护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 99-105.
Cao A L. Protection against stray current corrosion of buried metals pipeline[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010: 99-105. (in Chinese)
- [21] 闫风洁, 李辛庚. 电力接地网腐蚀与防护技术的进展[J]. 山东电力技术, 2007, 34(1): 9-13.
Yan F J, Li X G. Corrosion and protection of grounding net in electric power system[J]. Shandong Electric Power, 2007, 34(1): 9-13. (in Chinese)
- [22] 向睿. 杆塔接地极腐蚀程度诊断装置及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 23-42.
Xiang R. Research on device and application for diagnosis of grounding electrode corrosion degree [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 23-42. (in Chinese)
- [23] Zhang Z L, Mei D J, Dan Y H, et al. Novel method for diagnosing corrosion of grounding electrodes in soil[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 178: 106049.
- [24] 梅道珺. 输电线路杆塔接地装置腐蚀诊断与评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 41-56.
Mei D J. Research on corrosion diagnosis and assessment for grounding device of transmission line tower[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 41-56. (in Chinese)
- [25] Zhang Z L, Ye H R, Dan Y H, et al. Novel method for comprehensive corrosion evaluation of grounding device[J]. IEEE Access, 2020, 8: 72102-72111.
- [26] 刘健, 王树奇, 李志忠, 等. 基于网络拓扑分层约简的接地网腐蚀故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 122-128.
Liu J, Wang S Q, Li Z Z, et al. Grounding grids corrosion diagnosis based on hierarchical simplification of network topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 122-128. (in Chinese)
- [27] 刘渝根, 陈超. 基于人工蜂群算法优化支持向量机的接地网腐蚀速率预测模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 182-186, 200.
Liu Y G, Chen C. Corrosion rate prediction model of grounding grid based on support vector machine optimized by artificial bee colony algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 182-186, 200. (in Chinese)
- [28] Yu C G, Fu Z H, Wang Q, et al. A novel method for fault diagnosis of grounding grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5182-5188.
- [29] Yu C G, Fu Z H, Wu G L, et al. Configuration detection of substation grounding grid using transient electromagnetic method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6475-6483.
- [30] 中国电力企业联合会. 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
China Electricity Council. Code for design of AC electrical installations earthing: GB/T 50065—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese)
- [31] 鲁志伟. 大型接地网工频接地参数的计算和测量[D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 30-31.
Lu Z W. Numerical calculation and measurement of parameters of large grounding grids in industry frequency [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004: 30-31. (in Chinese)
- [32] 周开颜, 陈德洪, 黄会忠, 等. 锌镁合金铜接地材料高效防腐导电性能的研究及其应用[J]. 炼油技术与工程, 2010, 40(9): 29-32.
Zhou K Y, Chen D H, Huang H Z, et al. Study on high-efficiency anti-corrosion and electrical conductivity of grounding material of zinc & magnesium alloy and copper and application[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2010, 40(9): 29-32. (in Chinese)
- [33] 郭军科, 于金山, 李红, 等. 石墨复合接地材料的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(4): 451-456.
Guo J K, Yu J S, Li H, et al. Research progress on graphite composite as grounding material[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(4): 451-456. (in Chinese)
- [34] 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 Y C, Ruan J J, Xiao W, et al. Study on flexible graphite composite material for electrical grounding and its correlation experimentations[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1879-1889. (in Chinese)

- [35] 贾方凯,曹顺安.导电涂料用于接地网防腐蚀的研究进展[J].涂料工业,2016,46(3):83-87.
Jia F K, Cao S A. Research progress in conductive coatings for corrosion protection of grounding grid[J]. Paint & Coatings Industry, 2016, 46(3): 83-87. (in Chinese)
- [36] 姜雄峰,朱志平,周艺,等.石墨烯/碳纳米管复合纳米材料改性导电涂料的性能[J].材料保护,2019,52(6):20-26.
Jiang X F, Zhu Z P, Zhou Y, et al. Preparation and characterization of rGO-PPD-MWCNT hybrid nano-composites for modifying conductive coatings[J]. Materials Protection, 2019, 52(6): 20-26. (in Chinese)
- [37] 陈科锋.用于沿海埋地金属构件防护的石墨烯导电涂料[D].舟山:浙江海洋大学,2018:5-8.
Chen K F. Graphene conductive coating for protection of coastal buried metal components[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018: 5-8. (in Chinese)
- [38] 谢飞.X80管线钢及其焊缝在库尔勒土壤模拟溶液中腐蚀行为研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2013:5-7.
Xie F. Research on corrosion behavior of X80 pipeline steel and its weld joint in simulated Ku'erle soil solution [D]. Shandong, China: China University of Petroleum (East China), 2013: 5-7. (in Chinese)
- [39] 黄涛,闫爱军,陈小平等.含水率对Q235钢在模拟酸性土壤中腐蚀行为的影响[J].腐蚀科学与防护技术,2014,26(6):511-516.
Huang T, Yan A J, Chen X P, et al. Influence of water content on corrosion behavior of Q235 steel in an artificial soil[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26(6): 511-516.(in Chinese)
- [40] 闫风洁.AICuRE合金接地材料及其在碱性土壤中的腐蚀行为研究[D].济南:山东大学,2021:16-17.
Yan F J. Study on AlCuRE alloy grounding material and its corrosion behavior in alkaline soil [D]. Jinan: Shandong University, 2021: 16-17. (in Chinese)
- [41] 周方勤.在役输气管道腐蚀剩余寿命预测技术研究[D].成都:西南石油大学,2006:10-12.
Zhou F Q. Study on prediction technology for residual lifetime of corroded gas pipeline in service[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006: 10-12. (in Chinese)
- [42] 陈敬友,陈超,吴迪,等.接地网腐蚀性评价方法与腐蚀速率预测[J].腐蚀与防护,2021,42(3):64-67,78.
Chen J Y, Chen C, Wu D, et al. Corrosion evaluation method and corrosion rate prediction of grounding grid[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(3): 64-67, 78.(in Chinese)
- [43] 丁聪,张金玲,于彦冲,等.A572Gr.65钢在不同土壤模拟液中的腐蚀动力学[J].中国腐蚀与防护学报,2022,42(1):149-155.
Ding C, Zhang J L, Yu Y C, et al. Corrosion kinetics of A572Gr.65 steel in different simulated soil solutions[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(1): 149-155.(in Chinese)
- [44] Gadala I M, Abdel Wahab M, Alfantazi A. Numerical simulations of soil physicochemistry and aeration influences on the external corrosion and cathodic protection design of buried pipeline steels[J]. Materials & Design, 2016, 97: 287-299.
- [45] 陈建伟,钱洲亥,沈晓明,等.土壤腐蚀评价方法的实验室对比[J].腐蚀与防护,2014,35(2):133-136,141.
Chen J W, Qian Z H, Shen X M, et al. Laboratory comparison of soil corrosion evaluation methods[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(2): 133-136, 141. (in Chinese)
- [46] 王竹,冯喆,张雷,等.电化学方法在不锈钢腐蚀研究中的应用现状及发展趋势[J].工程科学学报,2020,42(5):549-556.
Wang Z, Feng Z, Zhang L, et al. Current application and development trend in electrochemical measurement methods for the corrosion study of stainless steels[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(5): 549-556. (in Chinese)
- [47] 陈沂.接地网的土壤加速腐蚀与防护研究[D].西安:西安理工大学,2009:7-10.
Chen Y. Soil accelerated corrosion and protection of grounding net [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009: 7-10. (in Chinese)
- [48] 曹楚南.腐蚀电化学原理[M].北京:化学工业出版社,2008:171-194.
Cao C N. Principles of electrochemistry of corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 171-194. (in Chinese)
- [49] 郭浩.供水管道电化学腐蚀机理研究[D].天津:天津大学,2017:8-15.
Guo H. Research on electrochemical corrosion mechanism of water supply pipes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017: 8-15. (in Chinese)
- [50] 郭安祥,闫爱军,姜丹,等.变电站接地网土壤腐蚀性评价方法研究[J].陕西电力,2010,38(12):28-30.
Guo A X, Yan A J, Jiang D, et al. Evaluation method for soil corrosion of transformer substation grounding grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(12): 28-30. (in Chinese)
- [51] 翁永基,李相怡.环境腐蚀科学研究中的模式识别方法[J].腐蚀科学与防护技术,1994,6(2):153-158.

- Weng Y J, Li X Y. The pattern recognition methods in environmental corrosion science[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1994, 6 (2): 153-158. (in Chinese)
- [52] 刘曲. 高压直流输电系统单极大地运行时地中电流分布的研究[D]. 北京: 清华大学, 2007: 38-51.
Liu Q. Research on current distribution during monopolar operation of HVDC systems with ground return[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007: 38-51. (in Chinese)
- [53] 王欢. 牵引供电系统地回流分析及接地网交流电腐蚀问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 57-74.
Wang H. Research on distribution of grounding return current and AC corrosion of grounding grid for traction power supply system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015: 57-74. (in Chinese)
- [54] 宋吟蔚, 王新华, 何仁洋, 等. 埋地钢质管道杂散电流腐蚀研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(8): 515-518, 525.
Song Y W, Wang X H, He R Y, et al. Status in research on stray-current corrosion of buried steel pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2009, 30(8): 515-518, 525. (in Chinese)
- [55] 吴荫顺. 阴极保护和阳极保护原理、技术及工程应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 197-199.
Wu Y S. The principle, technology and engineering application of cathodic protection and anodic protection[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007: 197-199. (in Chinese)
- [56] 冯南战, 李志忠, 李亨特, 等. 高压变电站接地网的腐蚀防护与监测技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(3): 331-338.
Feng N Z, Li Z Z, Li H T, et al. Review on research progress of technologies for corrosion protection and monitoring of grounding grid of high voltage transformer substation[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(3): 331-338. (in Chinese)
- [57] 朱志平, 马骁, 荆玲玲, 等. 变电站土壤腐蚀性评价及接地网金属腐蚀特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2009(4): 18-22, 26.
Zhu Z P, Ma X, Jing L L, et al. Soil corrosion evaluation of substation and metal corrosion characteristics analysis for grounding grid[J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(4): 18-22, 26. (in Chinese)
- [58] 杨杰, 谢尧平, 刘刚, 等. 高压直接地极运行条件下焦炭床化学性质变化试验研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(4): 187-189.
Yang J, Xie Y P, Liu G, et al. Chemical testing research of coke in operating condition of HVDC grounding electrode[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(4): 187-189. (in Chinese)
- [59] Zhang B, He J L, Zeng R, et al. Effect of coke bed on the electrical performance of HVDC ground electrode[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4594-4600.
- [60] 寄玉玉. 变电站接地网腐蚀状态的电化学测量方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 27-29.
Ji Y Y. Research on the corrosion of substation grounding grids by electrochemical measurement methods[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2013: 27-29. (in Chinese)
- [61] 曾嵘, 何金良, 高延庆, 等. 分层土壤结构变电站接地阻抗测试信号的处理[J]. 电工技术学报, 2000, 15(5): 69-74.
Zeng R, He J L, Gao Y Q, et al. Measuring signal processing of grounding impedance of substation with layered soil structure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(5): 69-74. (in Chinese)
- [62] 李谦, 张波, 蒋愉宽, 等. 地线分流对变电站接地阻抗测量的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 707-713.
Li Q, Zhang B, Jiang Y K, et al. Influence of ground wire shunting on grounding impedance measurement in substations[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 707-713. (in Chinese)
- [63] 张秀丽, 骆平, 莫逆, 等. 接地网腐蚀状态电化学检测系统的开发与应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 152-156.
Zhang X L, Luo P, Mo N, et al. Development and application of electrochemical detection system for grounding grid corrosion state[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 152-156. (in Chinese)
- [64] 韩磊, 宋诗哲, 张秀丽, 等. 便携式接地网腐蚀电化学检测系统及其应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 337-340.
Han L, Song S Z, Zhang X L, et al. Development and application of a portable electrochemical device for diagnose of grounding grid corrosion[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(3): 337-340. (in Chinese)
- [65] 何智强, 文习山, 潘卓洪, 等. 一种地网腐蚀故障诊断的新算法[J]. 高电压技术, 2007, 33(4): 83-86, 100.
He Z Q, Wen X S, Pan Z H, et al. Novel algorithm for fault diagnosis of grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (4): 83-86, 100. (in Chinese)
- [66] 寇晓逵, 张科, 张嵩阳, 等. 大型变电站接地网导通状况研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 88-92.
Kou X K, Zhang K, Zhang S Y, et al. Study on grounding grid connective resistance of large-scale substation [J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 88-92. (in Chinese)

- [67] 刘渝根,孟宪,田金虎,等. 接地网故障诊断中测量节点对选取方法分析[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(1): 73-77.
Liu Y G, Meng X, Tian J H, et al. Analysis on the method of selecting nodes on the erosion diagnosis of grounding grid[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(1): 73-77. (in Chinese)
- [68] 刘健,王建新,王森. 一种改进的接地网故障诊断算法及测试方案评价[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 71-77.
Liu J, Wang J X, Wang S. An improved algorithm of corrosion diagnosis for grounding grids & its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 71-77. (in Chinese)
- [69] 张瑞强. 变电站接地网接地性能及其故障诊断成像系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 33-59.
Zhang R Q. The research of substation grounding grids performance and its fault diagnostic & imaging system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 33-59. (in Chinese)
- [70] 刘渝根,尚龙龙,冷迪,等. 基于连续性遗传算法的接地网腐蚀诊断优化[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1503-1510.
Liu Y G, Shang L L, Leng D, et al. Optimization of corrosion diagnosis of grounding grid based on continuous genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5): 1503-1510. (in Chinese)
- [71] 刘渝根,田资,雷超,等. 基于二进制遗传算法的接地网导体缺失诊断[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1439-1445.
Liu Y G, Tian Z, Lei C, et al. Conductor loss diagnosis of grounding grid based on binary genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1439-1445. (in Chinese)
- [72] 倪云峰,刘健,王树奇,等. 利用分块模型的接地网撕裂法故障诊断[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2250-2260.
Ni Y F, Liu J, Wang S Q, et al. Splitting method for grounding grids corrosion diagnosis using a block dividing approach[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2250-2260. (in Chinese)
- [73] 王建新. 接地网腐蚀故障诊断算法与可测性研究及其应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2009: 41-68.
Wang J X. Research and application of corrosion fault diagnosis algorithm and testability of grounding grid [D]. Xi'an, China: Xi'an University of Science and Technology, 2009: 41-68. (in Chinese)
- [74] 刘健,卢伟,王建新,等. 接地网故障诊断可测性指标体系的分析及应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 493-500.
Liu J, Lu W, Wang J X, et al. Analysis and application on a family of testability indexes for grounding grids corrosion diagnosis [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 493-500. (in Chinese)
- [75] Dawalibi F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors part 2 - ground networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(4): 112-119.
- [76] 史庆岩,何为,杨帆. 基于模拟退火遗传算法的接地网故障磁场诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 52-55, 67.
Shi Q Y, He W, Yang F. Magnetic fault diagnosis of grounding grid based on simulated annealing genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 52-55, 67. (in Chinese)
- [77] 刘洋,崔翔,赵志斌,等. 基于电磁感应原理的变电站接地网腐蚀诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 97-103.
Liu Y, Cui X, Zhao Z B, et al. Method of corrosion diagnosis of substations' grounding grids based on electromagnetic induction theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 97-103. (in Chinese)
- [78] 付志红,余慈拱,侯兴哲,等. 瞬变电磁法视电阻率成像的接地网断点诊断方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 253-259.
Fu Z H, Yu C G, Hou X Z, et al. Transient electromagnetic apparent resistivity imaging for break point diagnosis of grounding grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 253-259. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)