

变电站二次等电位接地网连接方式对接地网特性的影响

曹志伟¹, 贾文达², 王继豪¹, 颜庆¹, 黄金军³, 郭俊²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 国家电网有限公司直流技术中心, 北京 100052)

摘要:变电站内敷设二次等电位接地网可以有效抑制电磁骚扰对二次系统的不利影响。为研究二次等电位接地网与主接地网的连接方式对其电压抬升和电流的影响,文中基于CDEGS软件建立简化的接地网模型,综合考虑土壤电阻率及电流注入点的影响,仿真分析在工频电流、雷击电流和高频阻尼振荡电流作用下接地网的电压和电流响应特性。通过分析发现:当注入电流频率较低时,单点接地的连接方式能有效降低距离故障点较近的二次等电位接地网内部的电压差和电流;当注入电流频率较高时,多点接地的连接方式能有效降低接地网的电压抬升和电流;随着土壤电阻率的增大,不同位置接地导体的电压抬升和电流均呈上升趋势;当电流从接地网边角注入时,二次等电位接地网内部的电压差和电流显著升高。

关键词:二次等电位接地网; 电流注入点; 接地网电压抬升; 土壤电阻率; 雷击电流; 高频阻尼振荡电流

中图分类号: TM774

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2026)02-0101-09

0 引言

在电力系统中,接地网对于保障电力设备的可靠稳定运行和人员的安全起着极其重要的作用^[1-8]。变电站内不仅敷设有主接地网,还敷设有二次等电位接地网,其主要布置在控制室、电子设备间、开关场的接地端子箱等处,并通过敷设在电缆沟内的铜排将各个单独的二次等电位接地网连接。变电站发生故障时,二次等电位接地网能够限制主接地网上电磁骚扰的入侵,从而降低对二次设备的不利影响^[9-15]。然而,随着电网向智能化发展,二次设备对于电磁干扰愈发敏感,这给二次等电位接地网的设计带来了更严峻的挑战。

我国已制定相关文件与标准,用于规范二次接地系统的设计、施工以及验收工作^[16-17]。然而,由于部分文件发布时间与实际工程建设时间不同,且不同标准在关键点未做明确规定,导致实际建设的二次接地系统可能存在差异。例如,文献[16]明确指出,每个室内等电位接地网应与变电站主接地网仅在一点连接。然而,文献[16]同时指出,保护和屏柜底部应设有接地铜排,该铜排通过接地铜缆连接至保护室内的等电位接地网,且铜排不要求与保护屏绝缘。此时,铜排可通过柜体与主接地网形成电气通路,从而导致二次等电位接地网与主接地网之间出现多点接地的情况。另外,屏蔽柜内

设置有2个铜排,分别连接主接地网和二次等电位接地网。而在实际施工中,这2个铜排之间并非完全绝缘,也可能导致主接地网与二次等电位接地网之间存在多点连接的情况。

在变电站中,当发生雷击、一次侧开关操作、接地短路等故障时,会产生工频或冲击大电流注入接地网,并流经所有回路,导致接地网电压抬升^[18-22]。目前,学者对接地网的研究主要集中在变电站接地网的冲击特性、接地网的改造与优化设计、地电位抬升的影响因素及其对二次系统的影响等方面^[23-28]。例如,文献[23]研究了雷电冲击下接地铜排与主接地网的连接方式对二次电缆的影响;文献[24-25]研究了雷电冲击下接地网的暂态特性以及地电位干扰对二次设备的影响;文献[26]通过现场试验,研究了雷电冲击下接地网内部电压差对二次电缆的影响;文献[27]通过仿真方法获得了雷电冲击下接地网电压的暂态分布特性;文献[28]系统分析了影响变电站接地网冲击特性的各类因素。在上述研究中,多以雷电流作为激励源,所采用的雷电流波形上升时间为数微秒,雷电流频率相对较低。因此,有必要针对数兆赫兹的高频冲击电流下接地网的响应特性进行分析研究。此外,当接地系统的结构发生变化时,接地网的响应特性也可能发生变化。因此,文中建立接地网的简化模型,针对工频电流、雷击电流、高频阻尼振荡电流分别注入主接地网的情形,仿真计算不同连接方式下的二次接地网的电压和电流响应,进而分析变电站二次等电位接地网连接方式对接地网电压、电流特性的影响。

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-11-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFE0115700); 国家电网有限公司总部科技项目(5500-202316163A-1-1-ZN)

1 仿真模型

文中采用接地系统 CDEGS 软件进行仿真计算。CDEGS 软件在对复杂的接地系统进行建模仿真时,能够综合考虑土壤情况、接地系统实际布置情况以及材料属性,并且可以同时考虑电磁环境和电路传导的影响^[29-31]。

依据文献^[16]以及实际变电站接地网布置情况,保护室屏柜下方的电缆沟内须敷设截面积不小于 100 mm^2 的铜排,并将铜排首尾相连,形成室内二次等电位接地网。每个室内等电位接地网与主接地网仅在一点连接。当保护室之间存在相互连接的二次电缆时,各二次等电位接地网之间应采用截面积不小于 100 mm^2 的铜排进行可靠连接。

若按照变电站实际接地网进行建模分析,搭建的模型较大且结构复杂,导致计算量非常大。因此,文中利用 CDEGS 软件建立简化的接地网仿真模型。该模型主要包括 1 个主接地网和 2 个二次等电位接地网,2 个二次等电位接地网之间通过截面积为 120 mm^2 的铜排连接。在模型中,空气的电阻率为 $1\times 10^{18}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,相对磁导率为 1.0,相对介电常数为 1.0。土壤类型设为均匀土壤,相对磁导率为 1.0,相对介电常数为 9.0。主接地网尺寸为 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$,网格间距为 10 m ,材料为钢。2 个二次等电位接地网尺寸均为 $9\text{ m}\times 5\text{ m}$,材料为铜。CDEGS 软件采用细导体等效模型进行计算,且仅能对土壤垂直分层建模,无法对土壤的水平区域分开建模。因此,主接地网的埋深设为 0.8 m ,导体半径为 0.01 m ;二次等电位接地网置于地面上方 0.2 m 处,导体半径设为 0.006 m 。所搭建的简化接地网模型如图 1 所示。2 个二次等电位接地网分别标记为 A 和 B,其边角位置分别编号为 1—4、5—8。

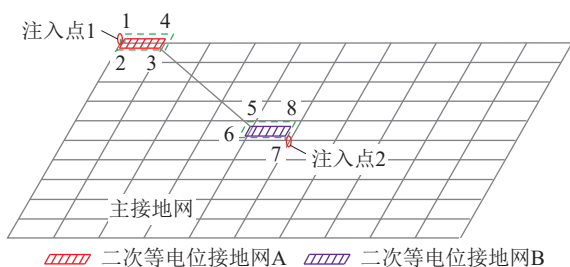


图 1 接地网仿真模型

Fig.1 Simulation model of grounding grid

在实际变电站中,主接地网和二次等电位接地网之间很难确保仅存在规范所规定的单一连接点,可能存在多点连接的情况。因此,为研究不同连接方式对接地网电压抬升和电流的影响,文中在仿真

中设置了 3 种可能的连接方式,分别为:单点接地,仅将 1、7 设为主接地网与二次等电位接地网的连接点;两点接地,将 1、3 和 5、7 设为连接点;多点接地,将 1—4、5—8 设为连接点。

当变电站发生雷击、一次侧开关操作或接地短路故障时,可能有幅值高达数十千安的大电流注入接地网。因此,文中将仿真激励源分别设置为幅值为 10 kA 的工频电流和冲击电流,以分析接地网在不同电流波形作用下的响应情况。同时,在仿真计算中,分别把电流注入点设置在靠近二次等电位接地网的主接地网的边角位置(以下简称注入点 1)以及主接地网的中心位置(以下简称注入点 2),从而仿真分析电流注入点对于仿真结果的影响。

二次等电位接地网作为二次设备的保护地和参考地,其与主接地网的连接方式直接影响系统的电磁兼容性能。接地网上的电压和电流波动可能会对二次设备造成影响。由图 1 可知,当电流从注入点 1 或注入点 2 流入接地网时,二次等电位接地网 A 上可能出现的最大电压差位于 1 和 3 之间,二次等电位接地网 B 上可能出现的最大电压差在 5 和 7 之间;同时,流经 1、3、5、7 处导体的电流可能为二次等电位接地网中的最大电流。因此在仿真分析中重点研究了二次等电位接地网上 1、3、5、7 处的电压、电流以及二次等电位接地网之间的电压差。

2 工频电流作用下等电位接地网特性分析

在电流注入点注入幅值为 10 kA 的工频电流,仿真计算二次等电位接地网上 1、3、5、7 处以及电流注入点处接地导体的电压和电流。土壤电阻率是衡量土壤对电流流动阻碍能力的关键参数,在仿真计算中需要考虑其影响。土壤电阻率受含水量、温度、土质等多种因素影响,其取值范围可从几欧姆·米到数百甚至数千欧姆·米^[1]。为研究土壤电阻率的影响规律,在仿真中分别取土壤电阻率 ρ 为 $50\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 和 $500\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。另外,考虑激励电流分别从注入点 1 和注入点 2 处注入的情况,计算结果如表 1—表 4 所示。

从表 1—表 4 中数据可以看出,当工频电流注入接地网时,电流从主接地网流入二次等电位接地网,导致接地导体的电压抬升。接地导体电压从电流注入点向外呈现下降趋势,且电流注入点的接地导体电压抬升略高于接地网远端的接地导体电位。

对比表 1 和表 2、表 3 和表 4 计算结果可以发现,在工频电流作用下,不同点位的接地导体的电

表 1 工频电流作用下接地导体的电压抬升和电流
($\rho = 50 \Omega \cdot \text{m}$, 注入点 1)

Table 1 The voltage rises and currents of grounding conductors under power frequency current
($\rho = 50 \Omega \cdot \text{m}$, injection point 1)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点 接地	两点 接地	多点 接地	单点 接地	两点 接地	多点 接地
1	2 364	2 355	2 354	2 409	5 014	5 883
3	2 358	2 345	2 343	2 409	2 020	1 979
5	2 308	2 302	2 300	2 409	2 020	1 979
7	2 302	2 297	2 296	2 409	1 156	686
注入点	2 372	2 364	2 362	10 000	10 000	10 000

表 2 工频电流作用下接地导体的电压抬升和电流
($\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$, 注入点 1)

Table 2 The voltage rises and currents of grounding conductors under power frequency current
($\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$, injection point 1)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点 接地	两点 接地	多点 接地	单点 接地	两点 接地	多点 接地
1	23 009	22 998	22 993	2 415	5 019	5 877
3	23 003	22 990	22 984	2 415	2 026	1 985
5	22 956	22 949	22 943	2 415	2 026	1 985
7	22 950	22 945	22 940	2 415	1 159	689
注入点	23 017	23 007	23 002	10 000	10 000	10 000

表 3 工频电流作用下接地导体的电压抬升和电流
($\rho = 50 \Omega \cdot \text{m}$, 注入点 2)

Table 3 The voltage rises and currents of grounding conductors under power frequency current
($\rho = 50 \Omega \cdot \text{m}$, injection point 2)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点 接地	两点 接地	多点 接地	单点 接地	两点 接地	多点 接地
1	2 300	2 297	2 296	898	244	79
3	2 302	2 297	2 296	898	715	677
5	2 319	2 312	2 310	898	715	677
7	2 323	2 317	2 315	898	2 653	3 407
注入点	2 326	2 323	2 322	10 000	10 000	10 000

压抬升幅值均随着土壤电阻率的增大而明显增大。而当土壤电阻率发生变化时,流经接地导体的电流变化极小,几乎不变。说明在发生工频短路故障时,若接地系统的结构确定,接地导体的电压抬升受土壤电阻率变化的影响较大,而流经各接地导体的电流幅值受土壤电阻率的影响很小,可忽略不计。

对比表 1 和表 3、表 2 和表 4 的计算结果可知,当电流从注入点 1 注入时,与从注入点 2 注入相比,接地导体的电压几乎相同,而流经二次等电位

表 4 工频电流作用下接地导体的电压抬升和电流
($\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$, 注入点 2)

Table 4 The voltage rises and currents of grounding conductors under power frequency current
($\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$, injection point 2)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点 接地	两点 接地	多点 接地	单点 接地	两点 接地	多点 接地
1	22 951	22 947	22 942	898	244	79
3	22 953	22 947	22 942	898	716	678
5	22 970	22 962	22 956	898	716	678
7	22 972	22 967	22 961	898	2 654	3 408
注入点	22 977	22 973	22 968	10 000	10 000	10 000

接地网接地导体的电流明显较大。分析其原因为,在工频电流作用下,激励频率很低,接地网的电感作用几乎可以忽略不计,接地网可以近似看作等电位连接体。当接地网结构确定时,改变电流注入位置,接地导体的电压抬升几乎不发生变化;当电流注入接地网时,电流沿着接地导体传播并逐步散流,当电流从接地网的边角点注入时,由于电流可以流过的接地导体数量相对较少,因此电流幅值相对较大。

仿真结果表明,不同点位处的接地导体具有不同的电压,若接地网内部连接有电缆,电缆两端的接地网电压差会通过耦合进入电缆,进而可能对设备运行造成影响^[32-33]。图 2 为不同电流注入点以及土壤电阻率下接地导体之间的电压差。 V_{13} 、 V_{35} 、 V_{57} 分别为 1 与 3、3 与 5、5 与 7 之间电压差。

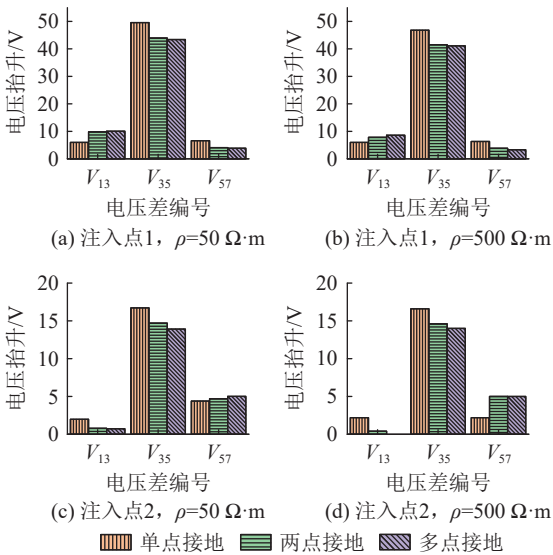


图 2 工频电流作用下不同土壤电阻率和不同
电流注入点时接地网电压差

Fig.2 Voltage difference of the grounding grid for different soil resistivities and different current injection points under power frequency current

随着接地网之间连接点数量的增加,距离电流注入点较近的二次等电位接地网内的电压差和流经接地导体的电流幅值逐渐增大并趋于稳定;距离电流注入点较远的二次等电位接地网内的电压差和流经接地导体的电流幅值逐渐减小并趋于稳定;连接二次等电位接地网的铜排两端的电压差和流经铜排的电流幅值不断减小并趋于稳定。

综合分析表 1—表 4 以及图 2 中的结果可知,当工频电流从接地网边角点或中心点注入时,靠近电流注入点的二次等电位接地网内流过的电流幅值较大,且连接二次等电位接地网的铜排两端的电压差也较大。

3 冲击电流作用下等电位接地网特性分析

在变电站中,当遭遇雷击或进行高压开关例行操作时,会产生冲击电流入地,导致接地网电压抬升。电流通过接地网一边向周围接地导体传播,一边向大地土壤进行扩散。当频率较高的冲击电流注入地网时,除接地网的电阻和电导外,接地导体的电感也产生影响,接地网的响应特性与工频电流作用下的响应特性存在较大差异。因此,文中分别采用雷电流波形以及开关操作产生的高频阻尼振荡电流波形作为激励,仿真研究接地网在不同类型冲击电流下的响应特性。

雷电流波形采用文献[34]推荐的标准雷击电流波形,波头时间为 2.6 μs,波尾时间为 50 μs,波形如图 3 所示。

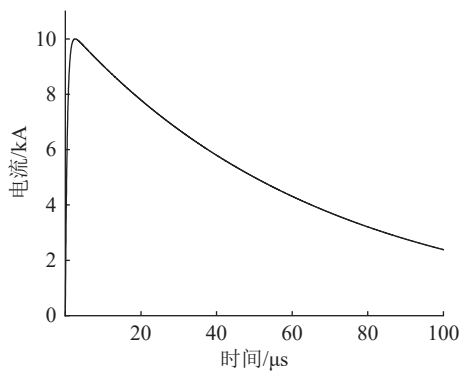


图 3 2.6/50 μs 雷击电流波形
Fig.3 The waveform of 2.6/50 μs lightning current

变电站进行高压开关例行操作时,会产生数兆赫兹的阻尼振荡电流入地,进而引起地电位抬升。文中采用式(1)表征阻尼振荡电流脉冲的波形函数,设置该波形的主频为 5 MHz,持续时间约为 5 μs,其波形如图 4 所示。

$$I(t) = Ce^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \tag{1}$$

式中: I 为电流; C 为常数,表示阻尼振荡波形的幅

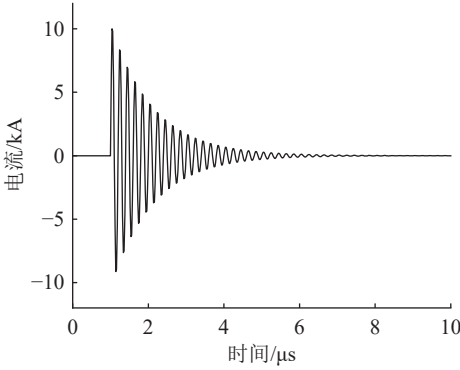


图 4 阻尼振荡电流波形
Fig.4 The waveform of damped oscillation current
值; δ 为阻尼因子,表示波形持续时间; ω 为振荡角频率; φ 为初始相位。

3.1 雷电冲击下的接地网特性

在电流注入点注入幅值为 10 kA、波形参数为 2.6/50 μs 的雷击电流,仿真计算二次等电位接地网上 1、3、5、7 处以及电流注入点处接地导体的电压和电流。与第 2 章相同,土壤电阻率 ρ 分别取 50 Ω·m 和 500 Ω·m,激励电流分别从注入点 1 和注入点 2 处注入。仿真得到的雷电冲击下接地网各测点电压和电流的典型波形如图 5 所示, V_x 为 x 连接点的电压抬升, I_x 为 x 连接点的电流, x 为图 1 中连接点。计算得到的时域波形幅值如表 5—表 8 所示。

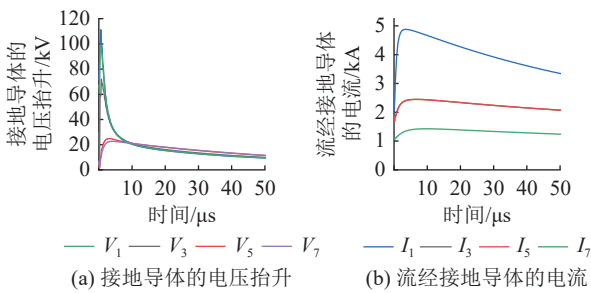


图 5 雷电冲击下接地导体的电压和电流
Fig.5 The voltage and current of grounding conductors under lightning impulse

表 5 雷击电流作用下接地导体的电压抬升和电流
($\rho = 50 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, 注入点 1)

Table 5 The voltage rises and currents of grounding conductors under lightning current ($\rho = 50 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, injection point 1)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点接地	两点接地	多点接地	单点接地	两点接地	多点接地
1	28 423	24 775	23 506	2 536	4 584	5 088
3	23 701	11 446	11 033	2 536	2 274	2 292
5	11 091	2 081	2 071	2 536	2 274	2 292
7	2 580	1 862	1 857	2 537	1 304	698
注入点	35 532	33 037	32 252	10 000	10 000	10 000

从表 5—表 8 中数据可以看出,与注入工频电

表 6 雷击电流作用下接地导体的电压抬升和电流
($\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$, 注入点 1)

Table 6 The voltage rises and currents of grounding conductors under lightning current ($\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$, injection point 1)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点 接地	两点 接地	多点 接地	单点 接地	两点 接地	多点 接地
1	115 647	99 121	97 313	2 737	4 883	5 381
3	116 067	72 088	71 039	2 735	2 449	2 467
5	53 465	24 911	24 882	2 735	2 449	2 467
7	24 452	22 751	22 701	2 739	1 427	786
注入点	125 108	111 262	110 194	10 000	10 000	10 000

表 7 雷击电流作用下接地导体的电压抬升和电流
($\rho = 50 \Omega \cdot \text{m}$, 注入点 2)

Table 7 The voltage rises and currents of grounding conductors under lightning current ($\rho = 50 \Omega \cdot \text{m}$, injection point 2)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点 接地	两点 接地	多点 接地	单点 接地	两点 接地	多点 接地
1	2 201	1 845	1 841	978	297	65
3	8 358	1 904	1 898	977	856	829
5	16 589	7 705	7 330	977	856	829
7	17 410	15 590	15 045	978	2 577	3 180
注入点	23 060	21 991	21 699	10 000	10 000	10 000

表 8 雷击电流作用下接地导体的电压抬升和电流
($\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$, 注入点 2)

Table 8 The voltage rises and currents of grounding conductors under lightning current ($\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$, injection point 2)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点 接地	两点 接地	多点 接地	单点 接地	两点 接地	多点 接地
1	23 355	22 563	22 524	1 124	317	75
3	38 093	22 635	22 644	1 039	905	878
5	70 126	40 592	39 719	1 041	905	878
7	62 940	52 873	52 240	1 062	2 662	3 263
注入点	64 193	61 784	60 614	10 000	10 000	10 000

流的情况类似,当接地网注入雷电脉冲电流时,电流从主接地网流入二次等电位接地网,导致接地导体电压抬升,且接地导体电压从电流注入点向外呈现下降趋势。不过,此时电流注入点的接地导体电压抬升明显高于接地网远端的接地导体电位。这是由于注入电流的频率升高,接地导体呈现出的电感效应增强,阻碍了电流向远端流动。靠近注入点区域的散流电流较大,地电位幅值较高;而远端区域散流电流较小,地电位幅值较小,从而形成明显的电位分布不均匀现象。

对比表 5 和表 6、表 7 和表 8 的计算结果可以发现,在雷电脉冲电流作用下,不同点位的接地导体的电压抬升幅值均随着土壤电阻率的增大而明显增大。而当土壤电阻率增大时,流经接地导体的电流略微增大。说明在发生雷击电流入地时,若接地系统的结构确定,接地导体的电压抬升受土壤电阻率变化的影响较大,而流经各接地导体的电流幅值受土壤电阻率的影响较小。

对比表 5 和表 7、表 6 和表 8 的计算结果可知,当电流从接地网的边角点处注入时,相较于从接地网中心处注入,接地导体的电压较大,且流经二次等电位接地网接地导体的电流幅值明显较大。分析其原因为与工频电流入地不同,在雷电冲击电流作用下,接地导体呈现出的电感效应显著,接地网不再近似为等电位体,当电流从不同位置注入时,接地网的电位分布有所差异。当电流从接地网的边角点注入时,由于电流可以流过的接地导体数量相对较少,接地网散流面积较小,因此电流幅值相对较大,接地导体的电压抬升较高。

由表 5—表 8 中的结果可知,雷击发生时,不同位置的接地导体可能产生高达数十甚至数百千伏的电压抬升,接地导体间的电压差会对电力设备的安全稳定运行以及人员安全造成威胁。图 6 计算了不同电流注入点以及土壤电阻率下接地导体之间的电压差。

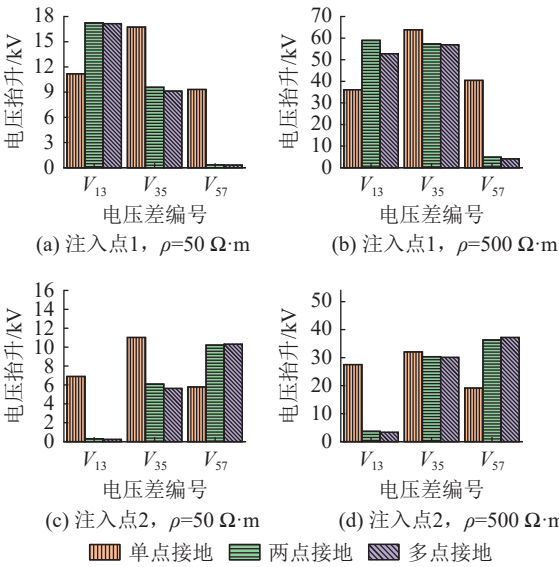


图 6 雷击电流作用下不同土壤电阻率和不同
电流注入点时接地网电压差

Fig.6 Voltage difference of the grounding grid for different soil resistivities and different current injection points under lightning current

随着接地网之间连接点数量的增加,距离电流注入点较近的二次地网内的电压差和流经接地导

体的电流幅值快速增大并趋于稳定;距离电流注入点较远的二次地网内的电压差和流经接地导体的电流幅值快速减小并趋于稳定;连接二次接地网之间的铜排两端的电压差和流经铜排的电流幅值不断减小并趋于稳定。

当接地网之间单点连接时,连接二次接地网的铜排两端的电压差较大。随着连接点数量增加,靠近电流注入点的二次接地网内的电压差也随之增大。

3.2 高频阻尼振荡冲击下的接地网特性

在电流注入点注入幅值为 10 kA、主频为 5 MHz 的高频阻尼振荡电流,仿真计算二次等电位接地网上 1、3、5、7 处以及电流注入点处接地导体的电压和电流。土壤电阻率 ρ 分别取 $50\ \Omega\cdot\text{m}$ 和 $500\ \Omega\cdot\text{m}$,激励电流分别从注入点 1 和注入点 2 处注入。仿真获得高频阻尼振荡冲击下接地网各测点电压和电流的典型波形如图 7 所示。计算得到的时域波形幅值如表 9—表 12 所示。

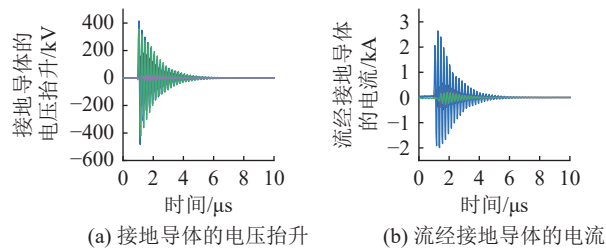


图 7 高频阻尼振荡冲击下接地导体的电压和电流
Fig.7 The voltage and current of grounding conductors under high-frequency damped oscillation current

表 9 高频阻尼振荡电流作用下接地导体的电压抬升和电流($\rho = 50\ \Omega\cdot\text{m}$, 注入点 1)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点接地	两点接地	多点接地	单点接地	两点接地	多点接地
1	73 593	87 402	77 092	863	832	805
3	73 104	28 099	9 732	254	137	40
5	33 757	4 392	1 883	240	128	53
7	10 258	1 265	681	365	49	11
注入点	207 819	208 447	211 475	10 000	10 000	10 000

对比表 9—表 12 中结果可知,其规律与雷电冲击下的规律相同。但由于注入电流的频率较高,接地导体中电感效应的影响显著,接地导体呈现高阻抗的特性,导致接地网电位分布更加不均匀。

在高频阻尼振荡电流作用下,部分位置的接地导体电压抬升幅值高达数百千伏。高频阻尼振荡电流作用下接地导体间的电压差幅值如图 8 所示。

表 10 高频阻尼振荡电流作用下接地导体的电压抬升和电流($\rho = 500\ \Omega\cdot\text{m}$, 注入点 1)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点接地	两点接地	多点接地	单点接地	两点接地	多点接地
1	357 380	422 421	384 219	3 388	2 644	2 263
3	358 428	198 962	123 228	1 020	581	323
5	131 954	36 275	19 024	772	439	327
7	62 895	19 086	10 658	1 172	279	59
注入点	476 759	483 441	495 329	10 000	10 000	10 000

表 11 高频阻尼振荡电流作用下接地导体的电压抬升和电流($\rho = 50\ \Omega\cdot\text{m}$, 注入点 2)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点接地	两点接地	多点接地	单点接地	两点接地	多点接地
1	4 683	857	633	219	25	14
3	21 262	3 467	1 729	134	86	47
5	50 880	19 409	7 795	151	85	31
7	56 499	58 792	55 045	957	817	757
注入点	153 296	153 892	155 319	10 000	10 000	10 000

表 12 高频阻尼振荡电流作用下接地导体的电压抬升和电流($\rho = 500\ \Omega\cdot\text{m}$, 注入点 2)

测点	接地导体的电压抬升/V			流经接地导体的电流/A		
	单点接地	两点接地	多点接地	单点接地	两点接地	多点接地
1	41 446	12 991	10 194	686	173	38
3	91 538	27 041	15 731	500	309	226
5	257 084	145 995	91 153	688	354	199
7	232 355	260 137	239 917	2 101	1 628	1 545
注入点	300 582	305 848	308 917	10 000	10 000	10 000

与雷电冲击下不同的是,当接地网之间的连接点数量增加时,二次接地网内部以及连接二次接地网的铜排两端的电压差和流经接地导体的电流幅值均不断减小。

对比分析工频电流和冲击电流下的仿真数据可知:在工频电流作用下,流经接地网的电流幅值较大,其有效值也较大;而在冲击电流作用下,接地网内部电压抬升幅值较大,可达数十甚至数百千伏。随着注入电流频率的升高,接地网的电压抬升以及电位差不断增大,而流经接地导体的电流则呈

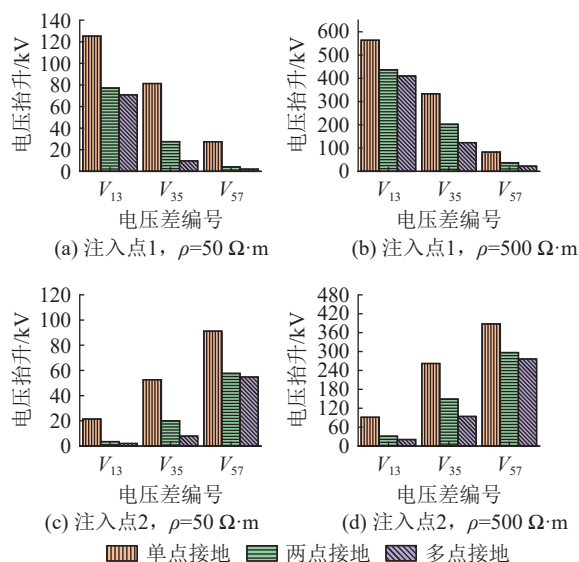


图8 高频阻尼振荡电流作用下不同土壤电阻率和不同电流注入点时接地网电压差

Fig.8 Voltage difference of the grounding grid for different soil resistivities and different current injection points under high-frequency damped oscillating current

减小的趋势。当电流注入点位于接地网边角时,接地网的电压抬升和电流的幅值更高。在发生工频短路和雷击故障时,主接地网与每个二次等电位接地网之间采用单点连接,可以避免故障点处二次等电位接地网内部产生过高的电压差和电流;而在高频阻尼振荡电流作用下,主接地网和二次等电位接地网之间采用多点连接,则可以降低二次等电位接地网内部的电压差和电流幅值。

4 结论

文中通过仿真分析了工频电流和冲击电流作用下,主接地网与二次等电位接地网的连接方式对接地网特性的影响,主要结论如下:

(1) 当注入电流频率较低时,采用单点连接可以降低靠近故障点的二次等电位接地网内部的电压差以及流经接地导体的电流,且不会显著提高其他位置的接地网的电压和电流幅值;当注入电流频率较高时,采用多点连接则可以降低二次等电位接地网内部的电压差和电流幅值。变电站可根据实际故障类型的发生概率以及设备对干扰的敏感程度,综合选择合适的接地网连接方式以抑制干扰。采用单点连接时,须确保屏柜下方的铜排之间以及铜排与屏柜之间的绝缘良好,避免出现多点连接的情况。

(2) 随着土壤电阻率的增大,不同位置的接地导体的电压抬升幅值均显著增大。虽然流经接地网的电流幅值也随土壤电阻率的增大而增大,但其增幅与频率密切相关。在工频电流作用下,电流幅

值的变化很小,几乎不变;在雷电冲击电流作用下,电流幅值变化较大;在高频阻尼振荡电流作用下,电流幅值变化显著。

(3) 当电流从接地网边角注入时,接地网的电位抬升幅值、二次等电位接地网内部电压差以及流经接地导体的电流幅值均更高。在实际变电站的设计和运行中,应尽量避免电流从边角注入,以降低对站内设备和人员安全的潜在威胁。

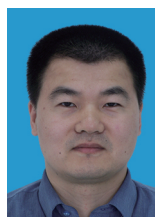
参考文献:

- [1] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 张波, 傅强, 钟志刚, 等. 接地装置地表铺设复合高阻层对保护人身安全的影响 [J]. 智慧电力, 2022, 50(12): 1-6.
- [3] ZHANG Bo, FU Qiang, ZHONG Zhigang, et al. Effect of composite high-resistivity layer on ground surface of grounding device on personal safety protection [J]. Smart Power, 2022, 50(12): 1-6.
- [4] SALEH S A, JEWETT D, AL-DURRA A, et al. Evaluating the impacts of grounding systems on ground currents and transient overvoltage [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6002-6013.
- [5] MORADI M. An electrostatic approach for simulation of grounding systems lightning response in time domain [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5289-5298.
- [6] 马成廉, 宋萌清, 尹波, 等. 结合 IEEE std80-2000 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.
- [7] MA Chenglian, SONG Mengqing, YIN Bo, et al. Optimizing the design of a new substation grounding network by combining IEEE std80-2000 and CDEGS [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 131-139.
- [8] 田君杨, 沈梓正, 李海勇, 等. 灵活接地系统电弧接地故障建模与特征分析 [J]. 供用电, 2024, 41(9): 90-97.
- [9] TIAN Junyang, SHEN Zizheng, LI Haiyong, et al. Modeling and characteristics analysis of arc grounding fault in a flexible grounding system [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(9): 90-97.
- [10] 李泽文, 黎文娇, 彭维馨, 等. 基于 IHHT-RF 的配电网单相接地故障选线方法 [J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 171-182.
- [11] LI Zewen, LI Wenjiao, PENG Weixin, et al. Single-phase-to-ground fault line selection method of distribution network based on IHHT-RF [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 171-182.
- [12] 许守东, 欧阳金鑫, 陈宇捷, 等. 基于模型识别的有源配电网单相接地故障定位方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 51-60.
- [13] XU Shoudong, OUYANG Jinxin, CHEN Yujie, et al. A fault location method for a single-phase fault for a distribution network with DGs based on model recognition [J]. Power

- System Protection and Control, 2024, 52(5): 51-60.
- [9] 唐宝锋, 范辉, 贺春光, 等. 二次系统等电位接地网的敷设[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 112-115.
- TANG Baofeng, FAN Hui, HE Chunguang, et al. Laying of equipotential ground screen in power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 112-115.
- [10] 杜恒, 司雪莹. 变电站继电保护二次系统接地技术分析[J]. 光源与照明, 2024(3): 150-152.
- DU Heng, SI Xueying. Analysis on grounding technology of secondary system of substation relay protection[J]. Lamps & Lighting, 2024(3): 150-152.
- [11] 周谦. 变电站内静态接地网的作用与设置分析[J]. 云南电力技术, 2022, 50(6): 89-92.
- ZHOU Qian. Analysis of functions and setup of equipotential grounding grid in substation[J]. Yunnan Electric Power, 2022, 50(6): 89-92.
- [12] 李辉, 李航, 陈尚, 等. 配电网单相接地故障电弧特性分析及真型试验技术研究[J]. 供用电, 2024, 41(4): 45-52.
- LI Hui, LI Hang, CHEN Shang, et al. Study on arc characteristics of single-phase grounding fault and true type test technology in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(4): 45-52.
- [13] 彭威龙, 曾松梧, 张宝庆, 等. 基于 GA-BP 模型的大型接地网腐蚀速率预测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 264-270.
- PENG Weilong, ZENG Songwu, ZHANG Baoqing, et al. Prediction method of corrosion rate of large-scale grounding grid based on GA-optimized BP neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 264-270.
- [14] 田君杨, 李海勇, 蒋连钊, 等. 含多分布式电源的小电阻接地系统单相接地故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 103-110.
- TIAN Junyang, LI Haiyong, JIANG Liandian, et al. Analysis of single-phase grounding fault characteristics of low resistance grounding system with multi-distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 103-110.
- [15] 朱飞跃, 粟时平, 吴陈雨, 等. 一种兼具配电网单相接地故障调控的多端口能量路由器[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 235-246.
- ZHU Feiyue, SU Shiping, WU Chenyu, et al. A multi-port energy router for distribution networks with single-phase grounding fault regulation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 235-246.
- [16] 国家电网公司. 《国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版)》[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- State Grid Corporation of China. State grid corporation of China eighteen major anti accident measures (trail operation)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [17] 中国南方电网公司. 南方电网电力系统继电保护反事故措施[R]. 广州: 中国南方电网公司, 2014: 22-25.
- China Southern Power Grid Company Limited. China southern power grid anti accident measures for protection[R]. Guangzhou: China Southern Power Grid Company Limited, 2014: 22-25.
- [18] 肖磊石, 张波, 李谦, 等. 分布式等电位接地网与变电站主接地网连接方式[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4226-4232.
- XIAO Leishi, ZHANG Bo, LI Qian, et al. Connection mode of distributed equipotential grounding grid and main grounding grid[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4226-4232.
- [19] 李彩云, 张卫东, 嵇建飞, 等. 冲击电流作用下二次系统骚扰电压统计特性及与抗扰度试验符合性研究[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1605-1612.
- LI Caiyun, ZHANG Weidong, JI Jianfei, et al. Disturbance voltage statistical characteristics of secondary system under impulse current and its consistency with immunity test[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1605-1612.
- [20] 叶海, 李彩云, 任旭超, 等. 变电站二次电缆瞬态电磁骚扰的特征统计方法与不确定度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 166-174.
- YE Hai, LI Caiyun, REN Xuchao, et al. Statistical analysis method and uncertainty of transient electromagnetic disturbance measured on secondary cables in substations[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 166-174.
- [21] GUO S Y, GUO J, YANG T Y, et al. Visual design of direct lightning risk assessment based on 3D model discretization algorithm[C]//2022 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Beijing, China. IEEE, 2022: 776-778.
- [22] LIU Z R, ZHANG B. Test method for transient characteristics of grounding grid with current return point located in the same grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2902-2910.
- [23] 刘倩, 曹雯, 苗浩铭, 等. 接地铜排对变电站二次电缆防护效果研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(7): 58-64.
- LIU Qian, CAO Wen, MIAO Haoming, et al. Research on protective effect of ground copper bars on secondary cables in substations[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(7): 58-64.
- [24] 王猛. 冲击地电位抬高及其防护研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- WANG Meng. Study on the rise of impulse ground potential and its protection[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [25] 孟庆阳. 暂态地电位升高对二次系统的影响及防护技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- MENG Qingyang. Study on Influence of transient ground potential rise on secondary system and its protection technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [26] MENG Y C, ZHANG B, WANG S, et al. Effects of potential difference within large grounding grid on secondary cables due to lightning strike[C]//2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing). Beijing, China. IEEE, 2017: 1-4.
- [27] ALIPIO R, SCHROEDER M A O, AFONSO M M. Voltage distribution along earth grounding grids subjected to lightning currents[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 4912-4916.

- [28] 时文峰. 变电站接地网冲击特性分析及其影响因素研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
SHI Wenfeng. Study on impulse characteristics and its influencing factors of grounding grid in substations[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020.
- [29] 李伟, 王伟, 孙永春, 等. 应用 CDEGS 进行变电站接地网设计流程的研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 113-118.
LI Wei, WANG Wei, SUN Yongchun, et al. Application of CDEGS in substation grounding grid design process[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 113-118.
- [30] 倪砚茹, 曾祥君, 喻锟, 等. 地铁杂散电流引起动态地电位分布建模及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9059-9072.
NI Yanru, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Modeling and influencing factors analysis of dynamic potential distribution caused by metro stray current[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9059-9072.
- [31] 张文龙, 鲁志伟, 苏侃, 等. 基于 CDEGS 的变电站接地网缺陷诊断研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 22-28, 35.
ZHANG Wenlong, LU Zhiwei, SU Kan, et al. Research on defect diagnosis of substation grounding grid based on CDEGS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 22-28, 35.
- [32] 苏佳华, 丁翼, 马剑勋, 等. 高压电网接地电位差干扰信号滤波算法研究[J]. 应用科技, 2024, 51(5): 128-133.
SU Jiahua, DING Yi, MA Jianxun, et al. Research on filtering algorithm for the grounding potential difference interference signals in a high voltage power grid[J]. Applied Science and Technology, 2024, 51(5): 128-133.
- [33] 周红斌, 宋伟, 周万竣, 等. 抑制发电厂短路电流引起地网电位差的措施分析[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4816-4821.
ZHOU Hongbin, SONG Wei, ZHOU Wanjun, et al. Measures to reduce the ground potential difference due to short circuit current in power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4816-4821.
- [34] 陈欢, 黄佳瑞, 杨帅, 等. 变电站地网冲击特性试验研究[J]. 高压技术, 2018, 44(5): 1619-1626.
CHEN Huan, HUANG Jiarui, YANG Shuai, et al. Experimental investigation on impulse characteristics of grounding grid in substation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1619-1626.

作者简介:



曹志伟

曹志伟(1974), 男, 硕士, 工程师, 从事调相机运检、发电机及调相机故障机理分析工作 (E-mail: sdjyjd@163.com);

贾文达(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为强电磁环境对电子电气系统的耦合作用机理;

王继豪(1992), 男, 硕士, 工程师, 从事调相机故障机理分析工作。

The impact of substation secondary equipotential grounding grid connection methods on grounding grid characteristics

CAO Zhiwei¹, JIA Wenda², WANG Jihao¹, YAN Qing¹, HUANG Jinjun³, GUO Jun²

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. DC Technical Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100052, China)

Abstract: The impact of electromagnetic interference on secondary systems in substations can be reduced by the installation of secondary equipotential grounding grid. A simplified grounding grid model based on CDEGS is established to study the effects of the connection mode between the secondary equipotential grounding grid and the main grounding grid on ground potential rise and current in the secondary equipotential grounding grid. By considering soil resistivity and current injection points, the characteristics of the grounding grid under power frequency current, lightning current, and high-frequency damped oscillation current are simulated and analyzed. It is found that when the injection current frequency is low, the ground potential difference and current inside the secondary equipotential grounding grid close to the fault point can be effectively reduced by the single-point grounding connection mode. When the injection current frequency is high, the multi-point grounding connection mode can effectively reduce ground potential rise and current. Besides, the ground potential rise and current of grounding conductors at different locations increase with increasing soil resistivity. When the current injection point is at the corner of the grounding grid, the ground potential difference and current inside the secondary equipotential grounding grid is significantly increased.

Keywords: secondary equipotential grounding grid; current injection points; grounding grid potential rise; soil resistivity; lightning current; high-frequency damped oscillation current

(编辑 吴昊)