

DOI: 10.7667/PSPC170851

500 kV 输电线路杆塔接地网不同环境下优化降阻方案研究

刘文军, 仇彦军, 孙立臣

(国网北京密云供电公司, 北京 100031)

摘要: 为了解决优化电力系统输电线路杆塔接地网接地装置存在的腐蚀严重、稳定性差和使用寿命短等问题, 以500 kV 输电线路接地网模型作为研究对象, 提出适用于不同环境的接地系统优化方案。利用 CDEGS 进行仿真, 在结合接地网接地材料类型及布置型式的前提下, 分析不同类型的土壤及地网面积对镀锌铜和铜覆钢接地网工频接地电阻和冲击接地电阻的影响。通过 CDEGS 仿真计算对降阻方式进行分析, 得出了杆塔在不同土壤情况和地网面积下的各优化降阻措施。最后通过实验验证该结论的正确性, 对输电线路杆塔接地的运行有重要实践意义。
关键词: 接地网; 工频接地电阻; 土壤电阻率; 优化降阻

Research on resistance reducing scheme optimization of 500 kV transmission line tower grounding grid in different environments

LIU Wenjun, CHOU Yanjun, SUN Lichen

(State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: In order to solve the problems of power system transmission line tower grounding device, such as serious corrosion, poor stability, short life, etc., the optimization scheme for grounding system in different environments is proposed when choosing the 500 kV transmission line grounding grid model as the research object. Based on the grounding material type and layout form of grounding grid, the CDEGS software simulation is used to analyze the effects of different types of soil and ground network area on power frequency grounding resistance and impulse grounding resistance of galvanized copper, copper clad steel material. Resistance reduction modes are analyzed by CDEGS, and optimization measures of reduction in resistance under different soil conditions and ground network area are proposed. Finally, the conclusion of this paper is verified by experiments, which have important practical significance for the operation of transmission line tower grounding devices.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507122)

Key words: grounding grid; power frequency grounding resistance; soil resistivity; optimization drop resistance

0 引言

在电力系统中, 接地网对设备安全和人身安全起到重要作用, 接地网的安全性状态直接关系到电力系统的运行状态^[1]。同时, 接地极是直流输电系统中不可缺少的一部分, 不仅提供了直流电流的通路, 而且, 利用接地极以大地返回方式单极运行时, 可以降低系统损耗, 钳制系统中性点电位, 影响着接地系统的安全稳定运行^[2]。同时, 现代建筑物和设备都需要有防御雷电的保护措施, 实际运行经验表明, “防雷在于接地”, 当雷击杆塔或者避雷线时产

生的雷击电流通过接地装置从杆塔流进大地, 形成一个电流回路从而使得输电系统得到保护。在现代继电保护中, 接地网安全也占据着重要一环^[3]。大量学者对接地方式进行了研究^[4-5], 而对于不同环境下优化降阻方案却没有进行系统的研究。

目前短路电流流入土壤呈变高趋势, 电力系统就需要更加可靠的杆塔接地装置。工程实际当中一些高土壤电阻率的山区, 在考虑经济性的同时, 很难完成较低接地电阻的接地装置; 另一方面, 接地装置的散流均压性能也被纳入了衡量高人口密度地区接地网质量的一大指标。在我国, 已有因接地电阻的阻值不达标或接地装置受到腐蚀而导致的事, 部分事故造成的损失多达数千万元, 而因此产

生的间接损失可能更为严重。因此, 在不同复杂区域设计可靠且经济性高的接地装置是迫切需要解决的问题。

基于此, 本文研究了 500 kV 输电线路杆塔的接地装置, 提出了适用于不同环境下的接地系统优化方案, 对输电线路杆塔接地的运行有重要实践意义。

1 不同环境下的接地网电气特性

1.1 接地材料选型

现阶段, 我国在接地材料的选取上, 主要是不锈钢、纯铜、镀锌钢等钢材, 其中镀锌钢因其高机械强度、价格低廉、采购途径多等优势在发电厂与变电站接地装置中应用最为广泛。

理论上合格的接地线选用优质的铜材料制成^[6], 铜覆钢、等离子接地棒、降阻模块等是目前受关注较多的新型耐蚀性接地材料^[7]。在近年的研究中, 铜覆钢作为纯铜的替代品迅速发展, 通过改性使得其特性介于纯铜和镀锌钢之间, 具有极大的优势。经过实验测量, 热镀锌扁钢接地材料在耐腐蚀性、免维护性、施工的便利性和可靠性等特性方面和新型的镀铜钢接地材料有较大差距, 且镀铜钢材料接地方案相对热镀锌扁钢材料接地方案的投资增幅在大型输电系统总投资中低于 2%, 但使用寿命可提高 3~15 倍^[8], 并且接地网可靠性成倍提高, 可减小直击雷和感应过电压对输电杆塔的危害。

国内某著名院校采用美国的技术研制出新型等离子棒接地材料, 主要应用诸如长效减阻与离子缓释等新兴技术极大地提升了耐腐蚀的能力与使用寿命, 使其在接地性能和可靠性方面具有极大优势, 接地寿命长达 30 年, 但是此项技术还在研究发展中, 使用成本较高; RT-MK 降阻部分主要由高性能的非金属材料构成, 具有接地电阻可靠、耐腐蚀、负载能力强的优势, 且无毒无污染, 使用寿命大于 30 年, 但是其也存在易碎的问题, 在运输、搬运, 甚至是安装当中, 容易发生龟裂或断裂现象, 且阻值的大小会随土壤潮湿和温度变化。

因此, 本文选择了目前应用最为广泛的镀锌钢及最具潜力的铜覆钢两种材料作为研究对象, 布置方式选择 500 kV 接地网常用的方框带射线接地模型, 利用以电磁理论为基础的具有接地系统设计分析、电磁干扰研究等一系列功能的 CDEGS 集成工程软件包仿真分析各种条件下接地网模型的电气特性。

1.2 土壤条件对接地网接地特性的影响

在实际问题中, 土壤是非均匀的, 因此不能依据单层均匀土壤来进行实验研究, 系统内主要采用双层土壤来研究此类问题。

1.2.1 土壤条件对接地网工频接地电阻的影响

1) 一层土壤层电阻率的影响

将土壤分为两层, 一层土壤电阻率为 ρ_1 , 厚度为 6 m, 二层土壤电阻率 ρ_2 为 100 $\Omega\cdot\text{m}$, 接地网的面积分别取 6×6 m²、15×15 m², 深度取 0.8 m, 导体等效直径取 0.012 m, 镀层厚度为 0.002 m, 其中锌材质的电阻率取值 5.196×10⁻⁶ $\Omega\cdot\text{m}$ 、相对磁导率取值为 1(该材料参数同样适用于以下仿真计算), 钢材质的电阻率取值 1.96×10⁻⁶ $\Omega\cdot\text{m}$ 、相对磁导率取值为 636, 铜材质的电阻率取值 2.4×10⁻⁷ $\Omega\cdot\text{m}$ 、相对磁导率取值为 1, 所建接地网模型采用方框带射线接地模型, 由 CDEGS 仿真计算得出的两种接地网面积下镀锌钢、铜覆钢接地电阻与土壤电阻率变化关系如图 1 所示。

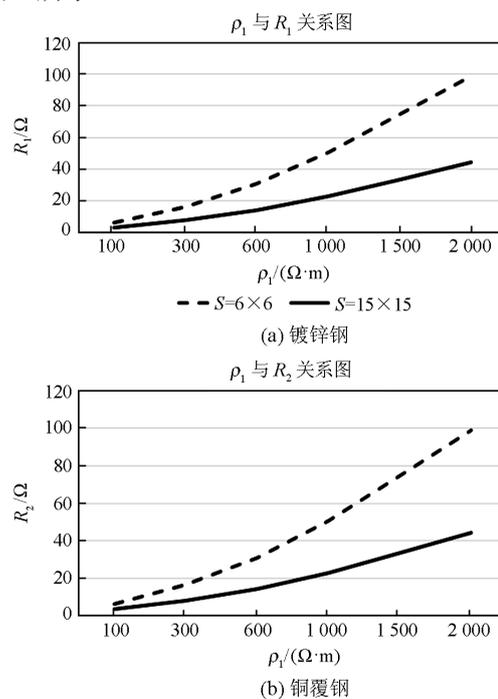


图 1 镀锌钢、铜覆钢工频接地电阻值随一层土壤电阻率的变化

Fig. 1 Power frequency grounding resistance value of galvanized steel, copper clad steel changes with the first layer soil resistivity

由图 1 可知, 镀锌钢及铜覆钢的工频接地电阻均与一层土壤电阻率呈正相关, 变化规律相同。并且接地网的范围不会影响两者关系; 另外地网范围越小, 阻值受电阻率影响更显著。

2) 一层土壤层厚度的影响

保持一层土壤电阻率 ρ_1 为 100 $\Omega\cdot\text{m}$, 二层土壤电阻率 ρ_2 分别为 20 $\Omega\cdot\text{m}$ 、500 $\Omega\cdot\text{m}$, 接地网的面积取 15×15 m², 其他条件不变, 改变一层土壤厚度,

由 CDEGS 仿真计算得出的二层土壤结构下镀锌钢、铜覆钢的接地电阻随一层土壤厚度变化的情况如图 2 所示。

由图 2，镀锌钢及铜覆钢的工频接地电阻与一层土壤深度之间规律相同：当一层的电阻率大于二层时，阻值与一层厚度呈正相关，阻值的增大速率逐渐变慢，且最终趋于一个定值；当二层电阻率大于一层时，阻值与一层厚度呈负相关，但阻值的减小速率逐渐变慢，最终也趋于一个定值。因为接地网的散流与一层关系较大，所以当一层的厚度上升时，镀锌钢及铜覆钢的工频接地电阻均会变化。

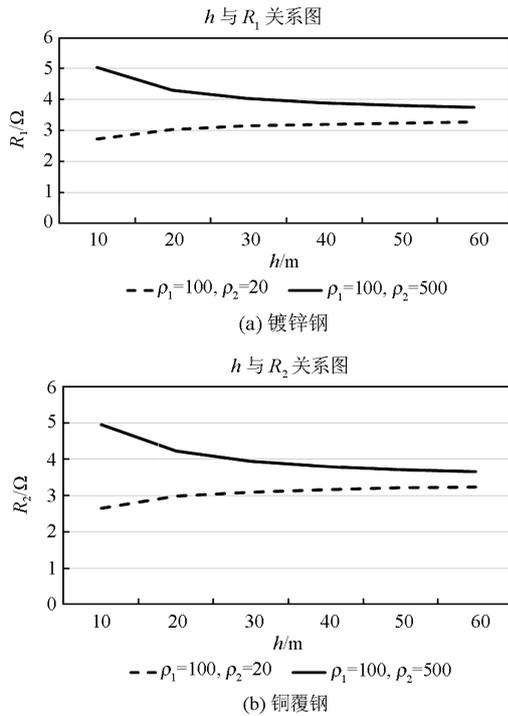


图 2 镀锌钢、铜覆钢工频接地电阻值随一层土壤厚度的变化
Fig. 2 Power frequency grounding resistance value of galvanized steel, copper clad steel changes with the thickness of the first layer soil

1.2.2 土壤条件对接地网冲击接地电阻的影响

雷击杆塔，雷电流流经杆塔的接地装置后散发进土壤，受雷电流影响，接地装置接地电阻与暂态电阻特征一致，通过冲击接地电阻体现，而输电线路的耐雷能力主要受杆塔冲击接地电阻影响。当冲击或雷电流流经接地体，接地体表证的接地电阻和工频接地电阻不一样。冲击接地电阻和工频接地电阻之比称为冲击系数，一般低于 1，但当接地体长度太大时也可能大于 1。

1) 一层土壤层电阻率的影响

设一层土壤电阻率为 ρ_1 ，厚度为 6 m，二层土壤电阻率 ρ_2 为 100 $\Omega\cdot m$ ，接地网的面积取 15×15 m^2 ，

埋深为 0.8 m，导体等效直径为 0.012 m，镀层厚度为 0.002 m，射线长度为 2 m，选取的地网模型采用方框带射线接地模型。

设置雷电流波前时间为 2.6 μs ，持续时间为 300 μs ，最大幅值为 10 000 A，最大幅值比例为 0.5，比例时间为 50 μs 。首先在 CDEGS 软件的 FFTSES 模块中对雷电流进行傅里叶正变换，将镀锌钢材料中雷电流等效成 15 个不同频率的正弦波组合，而铜覆钢材料则等效为 16 个不同频率的正弦波组合；然后在 HIFREQ 模块中进行建模计算，将方框和放射线等分成 10 段，在两个对顶点处设置引线，并在此处设置激励电流；最后对计算结果进行傅里叶反变换，得出模型各段处的电位，从而计算出一层土壤电阻率变化时镀锌钢及铜覆钢地网的接地冲击电阻。

由 CDEGS 仿真计算出不同一层土壤电阻率对应的镀锌钢及铜覆钢接地装置的电位及冲击电阻如表 1。

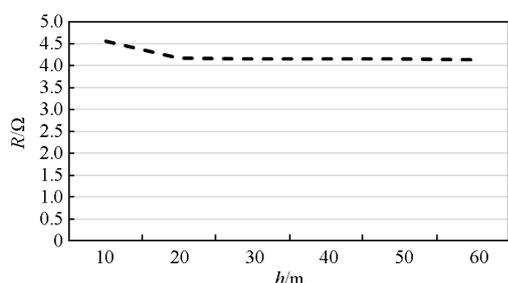
表 1 接地体的电位与冲击电阻与一层土壤电阻率的关系
Table 1 Relationship between potential and impact resistance of grounding and first layer soil resistivity

$\rho_1/\Omega\cdot m$	100	300	600	1 000	1 500	2 000
Zn 电位	7532.17	178162.6	309772.3	481462.6	695650.8	912227.5
Zn 电阻	3.80	8.91	15.49	24.07	34.78	45.61
Cu 电位	75931.17	178158	300763.8	481461.2	695547.6	912107.6
Cu 电阻	3.80	8.91	15.04	24.07	34.78	45.61

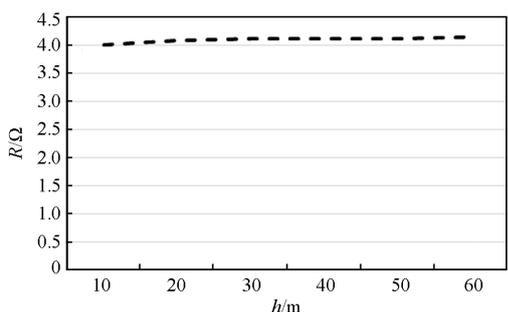
由表 1 可知：冲击接地电阻与一层土壤电阻率呈正相关；冲击电阻值和一层土壤电阻率接近线性关系。比较两种材料可知，铜覆钢和镀锌钢冲击电阻阻值和一层土壤电阻率的关系相同，相同的雷电流在铜覆钢接地体上产生的冲击电位值略小于在镀锌钢接地体上产生的冲击电位值，铜覆钢接地体的冲击电阻阻值与镀锌钢接地体的冲击电阻阻值近似相等。因为两种接地体的外部涂层都很薄，虽然锌和铜的电阻率相差较大但由此产生的区别并不大，并且内导体为钢材，钢的磁导率很大，其产生的影响占主导地位。

2) 一层土壤层厚度的影响

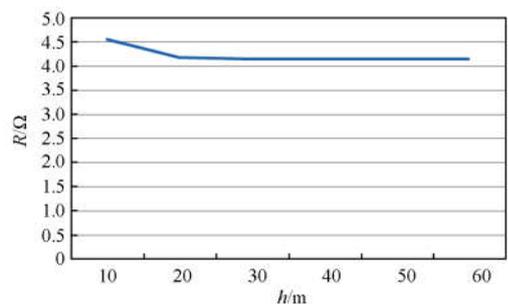
保持一层土壤电阻率 ρ_1 为 100 $\Omega\cdot m$ ，其他条件保持不变，改变土壤厚度。仿真发现，二层土壤率的改变并不会引起电位的显著变化，二层土壤电阻率对冲击电阻阻值的影响很小。改变一层土壤的厚度，当一层土壤电阻率为 100 $\Omega\cdot m$ ，二层土壤电阻率分别为 500 $\Omega\cdot m$ 、20 $\Omega\cdot m$ 时，根据 CDEGS 仿真计算出的接地网面积为 225 m^2 的镀锌钢及铜覆钢冲击接地电阻值随一层土壤厚度的变化情况如图 3 所示。



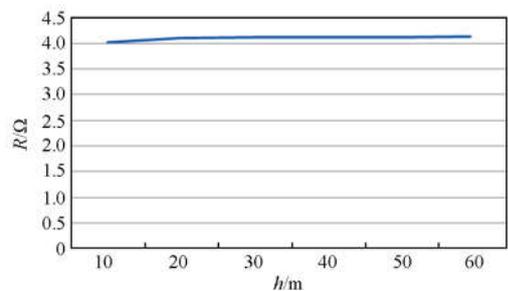
(a) $\rho_2=500 \Omega \cdot m$ 镀锌钢接地网



(b) $\rho_2=20 \Omega \cdot m$ 镀锌钢接地网



(c) $\rho_2=500 \Omega \cdot m$ 铜覆钢接地网



(d) $\rho_2=20 \Omega \cdot m$ 铜覆钢接地网

图 3 土壤厚度与电阻的关系图

Fig. 3 Relationship between soil thicknesses and resistance

由图 3 可以看出, 镀锌钢和铜覆钢随土壤厚度的变化规律相同: 当一层电阻率大于二层时, 冲击电阻值和厚度呈正相关关系; 当一层电阻率小于二层时, 冲击电阻值和厚度呈反相关关系; 但无论是一层还是二层电阻率大, 当厚度增加到一定程度时, 冲击电阻阻值趋于稳定。冲击电阻阻值的特性和工

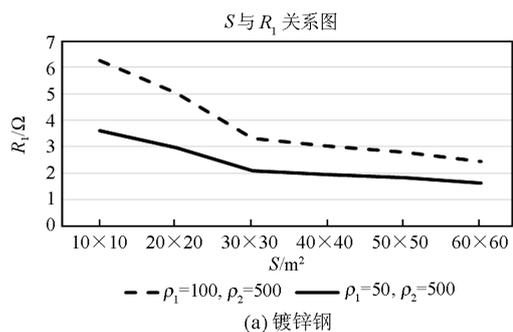
频电阻阻值随一层土壤厚度变化的特性一致。

在外界条件相同的情况下, 铜覆钢的工频接地电阻小于镀锌钢; 其次, 二者工频接地电阻特性一致, 均与双层土壤中一层土壤电阻率成线性关系, 且受一层土壤厚度影响, 但增加或减少的速率会慢慢下降并趋于稳定; 最后, 镀锌钢和铜覆钢的冲击接地电阻特性基本相同, 由于涂层较薄, 内导体钢芯磁导率较大, 冲击电阻特性以钢为主导。

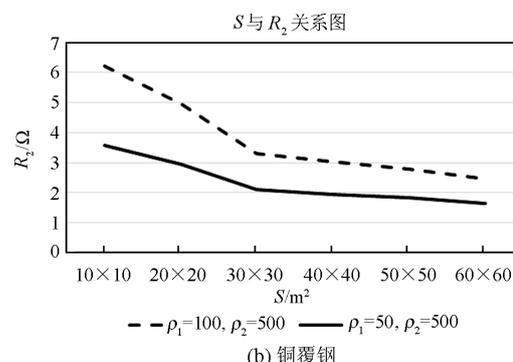
1.3 接地面积对接地网接地特性的影响

1.3.1 接地面积对接地网工频接地电阻的影响

根据实际 500 kV 电压等级输电线路接地网, 接地网的埋深为 0.8 m, 导体等效半径为 0.006 m, 一层土壤电阻率是 $50 \Omega \cdot m$ 、 $100 \Omega \cdot m$, 厚度是 10 m, 二层土壤电阻率是 $500 \Omega \cdot m$ 。分别针对两种接地材料水平双层土壤模型中接地网面积变化时仿真计算的接地电阻值如图 4 所示。图 4 中 S 是接地网的面积, ρ_1 是一层土壤电阻率, ρ_2 是二层土壤电阻率。



(a) 镀锌钢



(b) 铜覆钢

图 4 工频接地电阻值与地网面积关系图

Fig. 4 Frequency grounding resistance value changes with grounding grid area

当地网面积上升, 导体长度上升时, 导体屏蔽增强; 除此之外, 电流的不均匀会导致电阻下降的效果慢慢饱和。综合以上两种原因, 接地电阻与地网面积呈负相关。

1.3.2 接地面积对接地网冲击接地电阻的影响

根据实际 500 kV 电压等级输电线路接地网模

型, 接地网的埋深为 0.8 m, 导体等效半径为 0.006 m, 镀层厚度为 0.000 25 m, 双层土壤的一层土壤电阻率为 50 Ω·m、100 Ω·m, 厚度为 10 m, 二层土壤电阻率为 500 Ω·m。设置雷电流波前时间为 2.6 μs, 持续时间为 300 μs, 最大幅值为 10 000 A, 最大幅值比例为 0.5, 比例时间为 50 μs。针对该种水平双层土壤模型, 接地网面积 S 变化时由 CDEGS 仿真计算出冲击电阻阻值如图 5 所示。

当面积增大时, 两种材料的冲击接地电阻阻值均减小, 但是减小速率越来越小。因此, 在设计接地网时, 考虑到材料使用量越大, 所需的成本越高, 但其产生的冲击电阻减小效果越来越小, 输电线路杆塔接地网面积并不是越大越好。

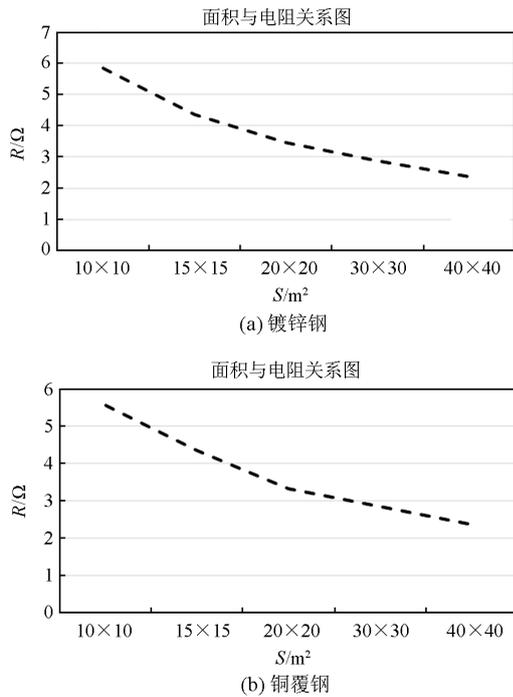


图 5 接地面积与接地网冲击接地电阻的关系图

Fig. 5 Relation between ground contact area and impact grounding resistance

在外界条件一致时, 铜覆钢工频接地电阻小于镀锌钢; 其次, 二者工频接地电阻特性一致, 均随着接地网面积的增加而减少, 但减少的速率会慢慢下降, 工频电阻阻值趋于稳定; 在外界条件相同的情况下, 铜覆钢的冲击接地电阻小于镀锌钢的冲击接地电阻, 两种材料的接地网冲击电阻阻值随着接地网面积的改变而改变, 冲击电阻阻值与面积呈负相关, 且最终趋于稳定。镀锌钢和铜覆钢的工频接地电阻特性以及冲击接地电阻特性基本相同, 由于涂层较薄, 内导体钢芯磁导率较大, 电阻特性以钢为主导。

2 降阻方案

出于安全性考虑, 接地电阻必须符合规程, 当土壤电阻率很高时, 一般采取提高接地网范围的措施。这样, 需要消耗大量的金属, 经济性较低, 部分地区效果并不理想^[9]。本文针对目前用到的四种降阻方式进行仿真分析, 得出不同方式的适用条件以及最佳降阻效果。

2.1 接地网外延降阻方式

杆塔安装的位置要尽可能使用水平放射接地体的办法, 由于水平放射接地体在降低工频接地电阻的同时, 会大幅度降低冲击接地电阻, 防雷效果较好^[10]。通过接地网外延降阻方式降低电阻主要通过改变外延体分段数、增加外延体长度和增加外延体数量方面实现, 本文以镀锌钢材料为例, 在以上三个方面仿真研究接地网外延降阻。

在 500 kV 输电线路接地网中, 常使用模型是方框带射线模型, 接地网的埋深是 0.8 m, 镀锌钢等效半径为 0.012 m, 双层土壤的一层土壤电阻率是 100 Ω·m, 厚度是 10 m, 二层土壤电阻率是 500 Ω·m, 地网方框的接地面积为 15×15 m², 针对不同外延体分布情况如图 6 所示、保持射线总长度不变改变射线的数量及改变四角外延体射线长度三种情况下仿真计算的阻值如图 7。

由此可以得出结论: 采取水平外延接地, 假设杆塔接地体尽可能为水平放射方法。由于水平放射建造成本不高, 不但缩小了工频接地电阻, 还获得较小的冲击接地电阻。同时, 采用水平外延接地时, 对于工频电阻的降阻, 控制外延线总长度不变的前

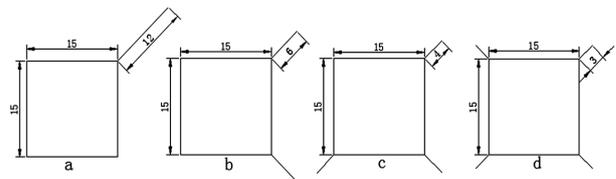
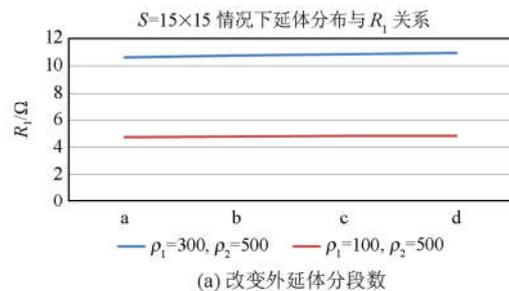
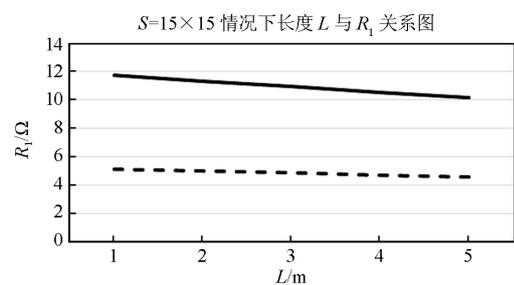


图 6 接地网外延体分布

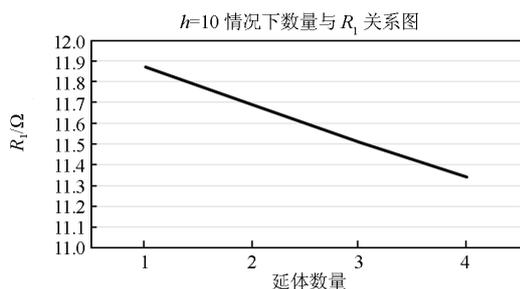
Fig. 6 Epitaxial body distributions of grounding grid



(a) 改变外延体分段数



(b) 改变外延体长度



(c) 改变外延体数量

图 7 镀锌钢工频接地电阻

Fig. 7 Power frequency grounding resistance of galvanized steel

前提下, 增加单根外延线长度比增加外延线数量的降阻效率更高。

在两个地方针对不同外延体分布情况进行实验测试, 经现场多次测量, 测得两地土壤电阻率分别为 100 Ω·m、300 Ω·m, 认为土壤电阻率均匀分布, 得到电阻测试结果如表 2—表 4 所示。其中表 2 是在保持外延体总长度不变, 改变分段数的条件下在两地进行的测试; 表 3 是在保持其他条件相同, 单

表 2 不同外延体分布(分段数)实验测试的工频电阻值

Table 2 Electrical resistance of different epitaxial body distributions (number of segments)

	电阻/Ω			
	分段数			
	a	b	c	d
$\rho=300 \Omega \cdot m$	9.72	9.88	9.97	10.05
$\rho=100 \Omega \cdot m$	4.12	4.18	4.25	4.32

表 3 工频电阻测试结果与外延体长度关系

Table 3 Relationship between the resistance tested and the length of the epitaxial body

	电阻/Ω				
	外延体长度				
	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
$\rho=300 \Omega \cdot m$	10.85	10.45	10.02	9.63	9.36
$\rho=100 \Omega \cdot m$	4.65	4.48	4.36	4.25	4.12

表 4 工频电阻测试结果与与外延体数量关系

Table 4 Relationship between the test result of resistance and the number of epitaxial body

	电阻/Ω			
	外延体数量			
	1	2	3	4
$\rho=300 \Omega \cdot m$	11.07	10.92	10.78	10.63
$\rho=100 \Omega \cdot m$	4.88	4.84	4.78	4.72

独改变外延体长度对工频电阻进行的测试; 表 4 是在仅单独改变外延体数量对工频电阻进行的测试。从实验结果可以看出各种测试条件下电阻值的变化趋势与仿真曲线是一致的。

2.2 垂直接地体降阻方式

接地系统里, 当输电杆塔附近深层土壤电阻率较小, 可采用在水平接地网增加垂直接地体以构成三维网络, 特别是对土壤深处有水层以及深处土壤电阻率较低的地方有效, 因为电流可通过垂直接地极散流至水层或者低电阻土壤区。故本文对冻土地区立体地网的相关问题开展研究。

如图 8 所示的接地网模型中, 水平接地体面积为 $15 \times 15 \text{ m}^2$, 接地网的埋深为 0.8 m, 镀锌钢的等效半径为 0.006 m, 双层土壤的一层土壤电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$, 厚度为 10 m, 二层土壤电阻率为 $500 \Omega \cdot m$, 改变四角垂直接地体长度及数目, 仿真计算得出的镀锌钢工频接地电阻及单位长度电阻率变化地网使用上述模型, 仿真计算出单位长度利用率 η 与垂直接地极长度及数目关系如图 9。

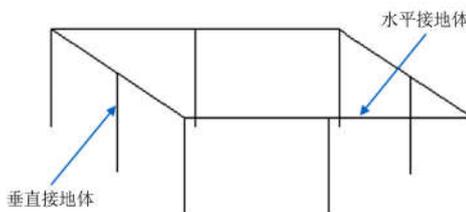
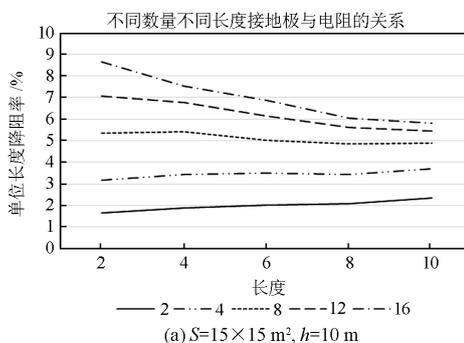


图 8 现代输电系统地网垂直接地降阻方式

Fig. 8 Grounding resistance reduction mode of modern vertical transmission system grounding grid



(a) $S=15 \times 15 \text{ m}^2, h=10 \text{ m}$

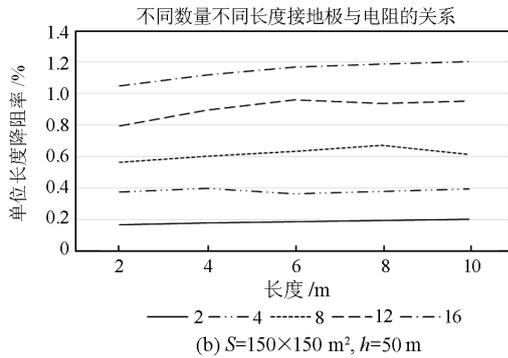


图 9 单位长度降阻率的变化情况

Fig. 9 Changes in resistivity drop per unit length

经仿真研究发现，垂直接地体的长度与数量有一定关系：若长度值不足，则无法获得大降阻率；但是随着接地体数目增大，降阻率趋于饱和。综合多种因素，需对增加的接地体单位长度的降阻效果予以考量，仅仅考察降阻效果是不全面的。

当水平接地网面积较小时，由于垂直接地体有屏蔽现象，降阻效果很快饱和，且数量越多饱和速度越快，且单位长度降阻率会因垂直接地体数目的上升发生很大的变化，垂直接地体越多，发生饱和后长度越小。并且当垂直接地体数量增加至一定程度后，垂直接地极长度与单位降阻率呈现反相关关系。

在较大的接地网中，随着垂直接地极数量增多，单位降阻率也逐渐饱和，但是单位长度降阻率不会与垂直接地极呈现反相关关系，而是最终趋于一个稳定值。但是在较大电网中，其单位长度降阻率都不会提升到理想值。由图可知，若垂直接地体数量 $N=8$ ，地网已有足够降阻率。垂直接地体数量为 8，长为 8 m，即垂直接地体长度与水平地网的等值半径一样，单位长度利用率最大才能取得最高的单位利用率，这样才能实现可靠、低造价的成效，提升了装置的利用率。

在现场针对不同垂直接地极情况进行实验测试，由于现场实验的条件限制，接地网的埋深为 0.8 m，垂直接地体的长度为 2 m，一层土壤电阻率为 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ ，二层土壤电阻率为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ ，得到电阻及单位降阻率测试结果如表 5 所示。可见随着垂直接地体数量增加，电阻逐渐下降，单位降阻率在一定范围内逐渐增加。

按照图 10 中分别设置垂直接地体位置，仿真计算出单位长度降阻率的变化情况如表 6 所示。

由此可知，外界条件一定时，图 10(a)所示降阻效果最明显，即垂直接地体应当安装于水平地网边界或距离主接地网较远处。

表 5 实验测试结果与垂直接地体数量关系

Table 5 Relationship between the experimental test results and the number of vertical grounding

数量	0	1	2	3	4
电阻/ Ω	32.40	31.84	31.33	30.82	30.34
单位降阻率/%	0	1.73	3.61	4.88	6.36

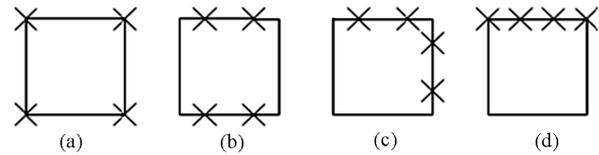


图 10 垂直接地极位置

Fig. 10 Vertical grounding pole position

表 6 不同垂直接地极位置下单位长度降阻率

Table 6 Resistivity drop per unit length in different vertical grounding pole position

接地电阻分布	a	b	c	d
电阻/ Ω	30.25	30.63	30.64	30.48

仿真分析与实验证实垂直接地体是减小接地电阻阻值的重要办法，特别在土壤电阻率高、范围不大的输电线路杆塔与城市变电站^[11]。增加垂直接地体长度在接近水平地网的等值半径时十分有效^[12]，数目需为 8 根左右，并且最好分布于水平接地网四周。

2.3 降阻剂降阻方式

降阻剂属于辅助性试剂，现已广泛应用，降阻成效良好。相关电力行业标准中表明，电阻率较高的土质可应用降阻剂来减小接地电阻。降阻剂的降阻机理主要是：提升接地体的有效截面、消除接触电阻、改善周围土壤的电阻率、利用吸水与保水性，提升并保有土壤导电特性^[13-14]。

建立模型：水平接地体面积分别为 $10\times 10\ \text{m}^2$ 、 $100\times 100\ \text{m}^2$ ，接地网的埋深为 0.8 m，镀锌钢的等效半径为 0.006 m，镀层厚度为 0.25 mm，双层土壤的一层土壤电阻率为 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ ，厚度为 50 m，二层土壤电阻率为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ ，四角垂直接地体周围灌注降阻剂。一般情况下，所选择的降阻剂干态电阻值应小于 $5\ \Omega\cdot\text{m}$ ，湿态电阻值应小于 $2\ \Omega\cdot\text{m}$ ^[10]。本文所建模型选择降阻剂的降阻率为 $4\ \Omega\cdot\text{m}$ 。计算所得的工频电阻随降阻剂厚度变化如表 7 所示。

降阻剂剂量与降阻率呈正相关，当剂量达到一定值，降阻效果发生饱和，此问题需加以注意^[15]。但是在各种面积地网中，降阻效果差异较大。降阻剂对集中接地体或小型地网的工频降阻作用较大，

极限降阻率可以达到 30%左右; 在中型以上地网工频降阻中成效不大, 极限降阻率只有 3%左右。

表 7 工频电阻与降阻剂厚度的关系

Table 7 Relationship between the frequency resistance and the thickness of reducing agent

降阻剂厚度	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.4
10×10 m ² 电阻 R/Ω	6.268	6.146	6.068	6.007	5.954	5.907	5.72	5.47
10×10 m ² 降阻率/%	0	1.946	3.191	4.164	5.010	5.759	8.74	12.7
100×100 m ² 电阻 R/Ω	4.493	4.484	4.477	4.472	4.468	4.464	4.446	4.418
100×100 m ² 降阻率/%	0	0.200	0.356	0.467	0.556	0.645	1.046	1.669

降阻剂因其优良性能, 现今已经广泛使用, 但也存在部分缺陷: 1) 其会腐蚀金属接地体, 使得其降阻成效快速减小; 2) 一部分厂商为保证降阻的快速性, 会在降阻剂中添加无机盐^[16], 无机盐因雨水的快速流失导致降阻剂失效, 最终导致接地电阻的提升; 同时, 降阻剂几乎对大中地网无效, 因此不适用于此类地网。因此, 添加降阻剂通常作为优化降阻的辅助手段。降阻率与降阻剂剂量呈正相关, 当剂量上升至一定值, 降阻效果发生饱和, 此特性也应给予关注。

2.4 降阻模块降阻方式

降阻模块通过对降阻剂混入胶粘剂, 通过高压作用和接地体整合, 形状主要分为圆柱、立方等。降阻模块和主地网通过金属引线连通, 操作简单易行, 其金属引线和主地网的圆钢或扁钢均焊接就可完成连通。降阻模块通过和大地的大范围接触, 几倍地提升接地体散流面积; 降阻模块的接触面和土壤贴合程度很高, 减小了接触电阻; 高吸水与保水性使得降阻模块拥有可靠的降阻能力。但降阻模块由于有固化效果所以无法扩大到四周土壤提升其导电性能, 同时无法应用于铺路, 因此, 其在应用过程中也有一定的局限性。

3 结论

本文面向目前电力系统输电线路接地网存在的若干问题, 详细研究了接地网接地材料类型及布置型式, 并采用 CDEGS 进行仿真研究, 得出了土壤条件、接地面积等因素与接地网工频接地电阻、冲击接地电阻之间的关系, 最后通过仿真分析了目前四种降阻方式的适用条件及最佳降阻效果, 并通过实验进行了验证, 得出了如下结论:

1) 镀锌钢和铜覆钢的工频接地电阻与一层电阻率二者之间均为线性关系, 地网面积越小, 土壤电阻率对镀锌钢的接地电阻影响更显著, 同时接地网散流主要受到一层土壤的影响。

2) 镀锌钢以及铜覆钢的工频接地电阻和冲击接地电阻阻值随着面积的增大而减小, 随着面积的增大, 接地电阻逐渐饱和, 耗材增加, 经济成本增加, 受到的不可控因素增多, 应根据不同的地质条件确定接地网的最优面积。

3) 外延体的数量越多, 长度越长, 接地体电阻越低, 但其阻值有饱和的趋势, 在实现高土壤电阻率杆塔接地降阻时, 最理想的方案是提升外延接地体长度。

4) 垂直接地极装在水平地网的四周或者距主地网较远时降阻效率较高, 如土壤层足够均匀, 垂直极长度在接近水平地网的等值半径时比较有效, 一般而言, 垂直接地体数目在八根左右。

5) 降阻剂对集中接地体或小型地网的工频降阻效果较好, 极限降阻率可以达到 30%左右, 对中型以上地网的效果较差, 极限降阻率只有 3%左右。

6) 通常圆柱形模块比长方体模块降阻效果好, 同时降阻模块应设置在地网边角处, 远离主接地体的地方。

参考文献

- [1] 王思华, 杨桐, 段启凡, 等. 基于 DT 法和粗糙集理论的接地网安全性状态评定[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 48-54.
WANG Sihua, YANG Tong, DUAN Qifan, et al. Evaluation of security state in grounding grid based on DT method and rough set[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 48-54.
- [2] 方学智, 杨帆, 肖彬, 等. 基于 IEC61850 和 Web Services 服务的中性点小电阻接地系统接地保护装置的研发[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 144-149.
FANG Xuezhi, YANG Fan, XIAO Bin, et al. Research and development of protective device in neutral grounding via low resistance based on IEC 61850 and Web Services[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 144-149.
- [3] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [4] 李建南, 张慧媛, 王鲜花, 等. 中压电缆网接地故障的电弧建模及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016,

- 44(24): 105-109.
- LI Jiannan, ZHANG Huiyuan, WANG Xianhua, et al. Arc modeling and simulation of the ground faults of the middle voltage cable network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 105-109.
- [5] 王健, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 光伏站内用直流微网的接地方式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 164-170.
- WANG Jian, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Analysis of grounding mode of DC micro grid in PV station[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 164-170.
- [6] 程乐峰, 余涛. 基于 PSCAD/EMTDC 的配网检修线路临时挂接地线仿真模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 75-85.
- CHENG Lefeng, YU Tao. Research on simulation model of temporary ground wires hanging on distribution maintenance lines based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 75-85.
- [7] 杨小光. 变电站接地系统降阻方案及接地材料选择[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- YANG Xiaoguang. Selection of resistance reducing schemes and grounding materials in substation grounding system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [8] 文习山, 宋周, 谭波, 等. 铜覆钢接地导体的电气性能[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 608-614.
- WEN Xishan, SONG Zhou, TAN Bo, et al. Electrical properties of copper-clad steel grounding conductors[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 608-614.
- [9] 刘晓东. 接地降阻剂的应用探讨[J]. 内蒙古气象, 2006(4): 58-59.
- LIU Xiaodong. Application of the ground resistance reducing agent[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2006(4): 58-59.
- [10] 李增. 复杂土壤地区接地网电气特性的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- LI Zeng. Study on electrical character of grounding grids in non-uniform soil regions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [11] 陈先禄, 刘黎. 用垂直接地极降低地网接地电阻的若干问题[J]. 电工技术杂志, 2002(11): 56-58.
- CHEN Xianlu, LIU Li. Several issues on reducing grounding resistance using vertical grounding pole[J]. Electrotechnical Journal, 2002(11): 56-58.
- [12] 雷健. 用垂直接地极降低地网接地电阻的若干问题的探讨[J]. 科技资讯, 2008(20): 113-114.
- LEI Jian. Study on several issues on reducing grounding resistance using vertical grounding pole[J]. Science & Technology Information, 2008(20): 113-114.
- [13] 李景禄, 胡毅, 刘春生. 实用电力接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [14] 李景禄. 接地装置的运行与改造[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [15] 陈慈萱, 李爱民. 降阻剂对工频和冲击接地电阻的影响及其应用范围[J]. 高电压技术, 1989(3): 61-66.
- CHEN Cixuan, LI Aimin. The effect of resistance-reducing agent on 50 Hz and impulse grounding resistance and its scope of an application[J]. High Voltage Engineering, 1989(3): 61-66.
- [16] 余晓东. 高土壤电阻率地区变电站接地设计与降阻技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- YU Xiaodong. Study on the grounding design and resistance reduction techniques of substations in the high soil resistivity region[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.

收稿日期: 2017-06-08; 修回日期: 2017-09-28

作者简介:

刘文军(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、电网自动化与信息等。E-mail: lwjluck@vip.sina.com

仇彦军(1972—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

(编辑 葛艳娜)