

变电站接地网冲击特性的试验研究

为有效分析变电站接地网的冲击特性，以某35 kV变电站接地网为依托，设计和定制了接地网模型，通过模拟接地网导体变细、断裂和脱焊等典型故障，对不同冲击电流波形及不同注入点时的接地网冲击特性进行了试验研究。试验结果表明：对同一注入点而言，冲击电流波形的波头时间越短，冲击接地电阻越大。当冲击电流波形相同时，电流从接地网边角注入所得冲击接地电阻最大；从接地网中心注入时，冲击接地电阻最小。当接地网存在故障时，冲击接地电阻较正常工况均有所增大，但增大程度与故障类型及冲击电流波形密切相关。研究结果可为接地网设计及准确评估接地网状态提供依据。

傅晨钊/上海电力公司电力科学研究院 王丰华 王劭菁 刘亚东/上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室

0 引言

变电站接地网用以确保与之连接的电气设备良好接地，并使这些设备处于同一接地水平。当变电站内发生接地故障时，接地网又起着改善电位分布并迅速散流入地的作用，保证了设备和运行人员的安全，维护着电力系统的安全可靠运行。但当站内或附近发生雷击事故时，接地网可能注入高频大冲击电流，使其呈现复杂的暂态特性，对站内工作人员及电气设备造成危害^[1]。同时，当接地网存在故障时，其冲击特性会发生变化。因此，有必要对变电站接地网冲击特性进行分析，从而在接地网设计时考虑冲击特性影响，并作为接地网状态评估的依据之一。

目前，针对变电站接地网的冲击特

性，国内外学者已开展了许多研究，并涌现了若干数值计算方法（如矩量法和有限元法等），同时对接地网进行了仿真计算和建模分析^[2-3]。现有的这些方法对接地网设计具有一定的指导意义。但对实际接地网来说，由于受到施工、改造和腐蚀等因素的影响，其暂态冲击特性较为复杂，依据数值计算方法难以建立准确的实际变电站接地网物理模型，且其求解过程也较为烦琐。在实际工程应用中，大都采用冲击系数法和经验公式法这两种方法。其中，冲击系数法是基于测量接地网工频特性参数后乘以冲击系数得到的接地网冲击特性参数^[4]。但实际接地网的冲击系数各异，且随着接地网规模的扩大，其冲击特性与工频特性的差异也逐渐增大，导致该方法的准确性随之下降。经验公式法是根据简单接地体接地性能计算理论公式和近似表达式，并对目标接地网的冲击特性参数进行估算，具有计算效率高的优点^[5]。但该方法误差大，仅适用于粗略分析接地网的冲击特性。此外，模拟试验法是应用较为广泛的一种方法，即在实验室通过等比例缩小接地网进行模拟试验，基于量纲相似原理模拟雷电流作用下接地网的散流情况，从而得出接地网冲击特性参数^[6-7]。该方法可给电力设计和运行部门提供参考，但目前大部分模拟试验与接地网实际工况有较大差异，且多为接地网在正常工况下的冲击特性测试。

针对上述问题，本文以某35 kV变电站实际接地网为原型，通过设计和定制接地网模型，对其在正常工况和典型故



傅晨钊/高级工程师

关键词/Keywords

变电站·
冲击电流·
冲击接地电阻·
接地网·
故障·

国家自然科学基金项目（51307109）。

障下的冲击特性进行试验研究,期望获得更为准确全面的接地网冲击特性,为变电站接地网的设计及状态评估提供依据。

1 接地网冲击特性分析

在冲击电流作用下,接地网的电阻称为暂态电阻,随时间而变化。一般将冲击电压最大值与冲击电流最大值之比定义为冲击接地电阻。根据接地网的冲击接地电阻,可依据雷电流大小对接地网可能出现的最大暂态电位进行估算。

当电流流经接地网时,依据恒流场理论,以无穷远点为参考点,应用格林函数可得到电极泄漏电流在任一点 P 产生的电位为^[8]

$$V_p = \iint_S G(P, Q) J(Q) dS = \sum_{j=1}^n G(P, O_j) I_j \quad (1)$$

式中, $G(P, Q)$ 为相应电极几何形状的格林函数,表示单位电流密度流经电极表面 S 点 Q 时,点 P 的电位; $J(Q)$ 为点 Q 的泄漏电流密度。

经接地导体流入土壤的总泄漏电流等于注入接地网的电流,即

$$I = \iint_S J(Q) dS \quad (2)$$

忽略导体压降可得边界条件为

$$V|_{\Gamma} = C \quad (3)$$

式中, C 为常数。

电位梯度为

$$\nabla V = \mathbf{i} \frac{\partial V}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial V}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial V}{\partial z} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 和 $\mathbf{k}$ 分别为 x 、 y 和 z 方向的单位矢量。

将导体划分为 n 段,有

$$\begin{cases} L = \sum_{j=1}^n L_j \\ I = \sum_{j=1}^n I_j \end{cases} \quad (5)$$

式中, L 为导体总长度; L_j 为第 j 段导体长度; I 为经导体泄漏的总电流; I_j 为第 j 段导体泄漏电流。

依据叠加原理可得经导体泄漏电流在点 P 产生的电位为

$$V_p = \sum_{j=1}^n G(P, O_j) I_j \quad (6)$$

式中, O_j 为第 j 段导体中心; $G(P, O_j)$ 为以 O_j 为等效中心的单位点电流源在点 P 产生的电位。

将 P 分别定位于各段 i ,则 $G(i, j)$ 表示在第 j 段导体施加电位电流源时在第 i 段产生的电阻,定义为互电阻,用 R_{ij} 表示;当 $i=j$ 时, R_{ij} 为自电阻^[9],则

$$V_p = \sum_{j=1}^n R_{ij} I_j \quad (7)$$

令导体电位为 V_G ,则

$$\sum_{j=1}^n R_{ij} I_j - V_G = 0 \quad (8)$$

式(5)及式(8)构成 $n+1$ 阶方程组,矩阵形式为

$$\mathbf{R}\mathbf{I} - \mathbf{A}\mathbf{V}_G = \mathbf{B} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ & & \ddots & \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{I} = [I_1 \ I_2 \ \cdots \ I_n]^T \\ \mathbf{A} = [1 \ 1 \ \cdots \ 1 \ 0]^T \\ \mathbf{B} = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ I]^T \end{cases} \quad (10)$$

依据冲击接地电阻定义,冲击接地电阻可表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}_G / \mathbf{I} \quad (11)$$

因此,只需得到电阻系数 R_{ij} 并求解式(9)即可求得沿导体的泄漏电流分布及接地体的地电位升,从而计算出冲击接地电阻。

2 接地网冲击特性模拟试验

2.1 接地网模型的设计

研究对象源于某供电公司的35 kV变电站接地网,该接地网占地面积为34.4 m × 42.6 m,由5根横向水平导体、5根纵向水平导体及若干垂直接地极构成。其中,水平导体为25 × 6 mm镀锌扁钢,垂直接地极为直径38 mm、长2.5 m的圆钢,接地

网埋深0.8 m。

依据量纲相似原理中的几何相似，对实际接地网进行了接地网模型的设计。由于变电站改造，实际接地网的形状不甚规则。为简化模拟试验，本文在量纲相似的基础上进行简化，将接地网模型设计为规则形状，使接地网原型的边框尺寸与接地网模型中对应长度尺寸的比值为5~6，并确保接地网模型工频接地电阻与实际接地电阻比值同样为5~6，从而得到规则形状的接地网模型。

图1为实际接地网模型，即为7 m×7 m规则网格，由水平接地网和垂直接地极组成。其中，水平导体间距采用优化不等间距设计，导体规格为25×6 mm的镀锌扁钢，垂直接地极规格为直径38 mm、长0.3 m的圆钢。图中，m、n为冲击电流注入点；A、B、C和D为模拟故障点，在制作时采用铆接方式便于模拟故障，接地网埋深为0.2 m。

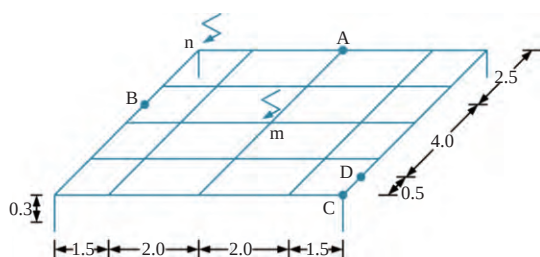


图1 接地网模型示意图

2.2 接地网故障设置

接地网缺陷常因施工时虚焊或脱焊、土壤腐蚀以及接地电流电动力等因素引起，通常造成水平均匀导体变细或断裂等故障。因此，本文根据变电站现场接地网典型故障实例，重点对脱焊、导体断裂及导体腐蚀三种典型故障进行模拟。接地网模型的具体故障设置位置与设置方式如表1所示。

表1 模拟故障设置方式

故障描述	故障设置方式
A点脱焊	断开点A处铆接
B点断裂	断开点B处铆接
CD段导体腐蚀	用细导体代替CD段导体

真型试验和模拟试验时冲击电流的比例关系为

$$i_1 = n^2 i_2 \quad (12)$$

式中， n 为接地网原型与模型几何尺寸比值。

真型试验和模拟试验时接地网冲击电压比例关系为

$$u_1 = n u_2 \quad (13)$$

依据冲击接地电阻定义，冲击接地电阻比例关系为

$$R_1 = R_2 / n \quad (14)$$

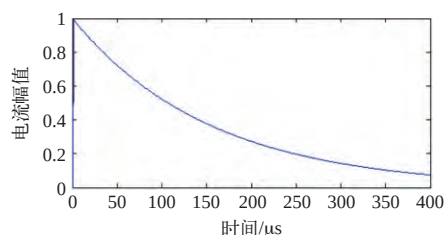
由此，可依据模拟试验结果估算出实际接地网在各种典型工况下的冲击接地电阻。

2.3 试验描述

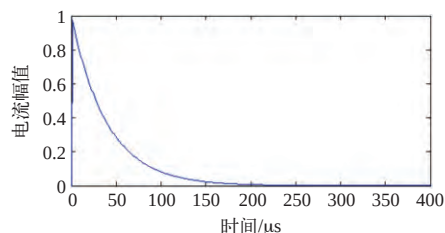
试验用雷电流发生器为厦门红相4051型雷电冲击电阻测试仪，其会自动调整注入电流大小以获得最大功率输出。测试回路电压参考点及电流参考极根据0.618法确定。试验用雷电流波形共有四种，其典型参数分别为0.25/100 μs、1/20 μs、8/20 μs和10/350 μs，对应波形如图2所示。由图2可见，这四种雷电流波形的幅值均为1，但在波前时间和波尾时间上存在较大差异。

试验过程具体如下：

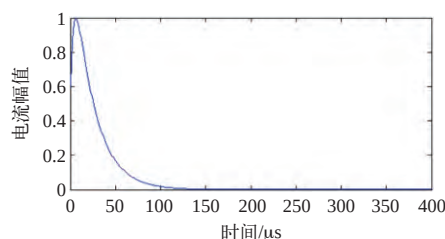
1) 根据0.618法确定测试用电压极和电流极的



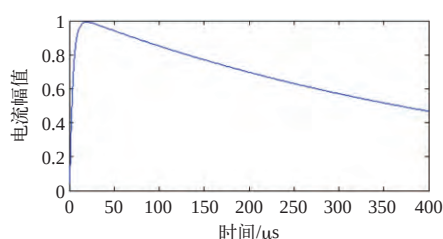
(a) 0.25/100 μs雷电流波形



(b) 1/20 μs雷电流波形



(c) 8/20 μs雷电流波形



(d) 10/350 μs雷电流波形

图2 四种雷电流波形

位置。

2) 分别在注入点m和注入点n使用四种雷电流波形对接地网的冲击特性进行测试,并记录对应结果。

3) 开挖接地网,设置A点脱焊故障,埋设接地网,重复步骤2),记录对应结果。

4) 开挖接地网,恢复A点脱焊故障并设置B点断裂故障,埋设接地网,重复步骤2),记录对应结果。

5) 开挖接地网,恢复B点断裂故障并设置CD段导体腐蚀故障,埋设接地网,重复步骤2),记录对应结果。

6) 恢复CD段导体腐蚀故障,埋设接地网,结束试验。

3 结果分析

3.1 不同雷电流波形下接地网的冲击特性

接地网模型在正常工况下,从m点注入不同雷电流波形时冲击接地电阻的实测结果与计算结果如表2所示。对应的相对误差计算公式为

$$\text{相对误差} = \frac{\text{计算值} - \text{实测值}}{\text{实测值}} \times 100\% \quad (15)$$

表2 不同雷电流波形下的冲击接地电阻

雷电流波形/μs	冲击接地电阻/Ω		
	实测值	计算值	误差(%)
0.25/100	9.983	9.546	-4.377
1/20	4.425	4.623	4.475
8/20	2.612	2.504	-4.135
10/350	2.560	2.472	-3.438

由表2可得,冲击接地电阻的实测值与计算值相对误差最大不超过4.5%,测试结果较为准确。

误差产生的原因主要是由于现场试验中土壤情况随天气条件变化较大,且雷电流发生器的输出波形存在一定误差。由试验结果可得,当冲击电流注入点相同时,冲击电流波形波头时间越短,冲击接地电阻越大。因此,分析接地网冲击特性时应综合考虑雷电流情况;设计接地网时也应分析当地雷电流活动情况。

3.2 注入点对接地网冲击特性的影响

接地网在正常工况下,从不同注入点注入不同雷电流波形时对冲击接地电阻的影响如表3所示。由表3可见,当冲击电流波形相同时,电流从接地网边角注入所得的冲击接地电阻较大;从接地网中心注入时,冲击接地电阻较小,且该结论适用于不同的雷电流波形。该现象主要是由接地网的不等电位引起。由于雷电流频率很高,接地导体电感和电阻分量增大,不等电位现象较严重,导致远离电流注入点的接地导体散流本领较弱。当电流从接地网边角注入时,对角区域接地导体散流能力大大降低,接地网的冲击有效面积明显低于电流从接地网中心注入时的情况,从而导致冲击接地电阻上升。

表3 电流注入点对冲击接地电阻影响

雷电流波形/μs	冲击接地电阻/Ω	
	m点	n点
0.25/100	9.983	11.320
1/20	4.425	7.097
8/20	2.612	3.230
10/350	2.560	3.054

3.3 典型故障下接地网的冲击特性

表4为接地网在各种典型工况下从m点注入不同雷电流波形时所呈现的冲击接地电阻。

表4 典型工况下冲击接地电阻

雷电流波形/μs	冲击接地电阻/Ω			
	正常	故障1	故障2	故障3
0.25/100	9.983	11.037	12.396	12.827
1/20	4.425	4.704	5.224	4.966
8/20	2.612	2.911	2.671	2.818
10/350	2.560	2.800	2.619	2.756

由表4可得,当接地网中存在故障时,冲击接

