

风电机组接地电阻数值计算

随着风电机组容量的不断增大, 接地装置对设备和人身安全的影响也越来越大。为了更加准确地计算出风电机组典型接地装置的接地电阻, 基于诺依曼积分公式运用平均电位法, 推导出了接地电阻数值计算公式, 并编制了与之相应的通用Matlab计算程序。通过数值计算值与经验解析值的结果对比以及搭建接地电阻测量试验平台验证了公式推导和程序编制的正确性。

李 聪 张小青/北京交通大学电气工程学院



李 聪/硕士研究生

接地是保障风电场设备和风电机组以及人身安全的必要措施。接地装置通常是由埋入土中的金属接地体(圆钢、扁钢和角钢等)和连接用的接地线构成^[1]。一般根据接地目的分为三种: 工作接地、保护接地和防雷接地(过电压保护接地)。

近年来, 随着风电机组系统容量、电压等级的不断提高, 电力部门对接地网的设计也提出了越来越严格的要求。确定风电机组的接地电阻是接地网设计中的重要步骤。接地网的形状取决于风电场所在地的土壤分布情况和实际场地大小^[2]。在以往的接地电阻计算中, 往往都是根据经验公式得到的。文献[1,3-4]给出了一些常见接地电阻不同类型的经验公式, 在利用经验公式的时候往往还需要考虑组合接地体的利用系数。在此基础上, 也有对一些特定接地体进行的接地电阻的研究和探讨, 如文献[5-9]等, 但纵观国内外学者的研究, 对风电机组的接地电阻的计算大部分都是采用经验算法来进行估算, 而缺乏准确的数

值计算方法。

在工程上, 人们不仅关心接地参数的大小, 还关心其经济运行指标。同时, 计算机技术的应用和发展使数值分析法在接地网的设计和研究中应用日益广泛。因此, 接地电阻数值计算的实用性很强。本文针对风电机组的典型接地装置, 搭建了模型, 经过公式推导, 得出了计算接地电阻的通用计算方法, 并用Matlab程序和实验实例验证了结果的正确性, 为风电场接地系统的设计提供了参考和依据。

接地电阻参数计算

1. 建立模型

对于风电机组的接地装置来讲, 典型的人工接地体是一个围绕着机组钢筋混凝土基础的水平接地环, 并在接地环的周边加设垂直接地体的复合型接地系统。水平接地环可以是正多边形或是圆形, 垂直接地体一般不少于两根。本文构建的接地模型为圆形水平接地环, 并在接地环周边均匀加设多根垂直接地体构成的复合型接地装置。如图1所示。

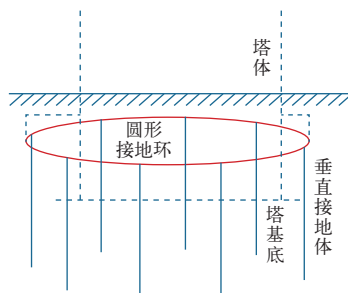


图1 风电机组典型接地装置模型

2. 基本方法和概念

通常情况下, 任何接地系统都可以

关键词/Keywords

风电机组 ·
接地电阻 ·
数值计算 ·

国家自然科学基金(50977002)。

视为点电极和线导体组成的复杂系统。因此可将复杂接地电极分解为许多线性微元来进行计算。基于恒定电流场理论,本文应用叠加法将均匀土壤接地网的计算离散成一个以导体流散电流为变量的线性方程组。计算出从接地网流散出来的总电流,进而计算接地电阻。

接地电阻由两部分构成:自电阻和互电阻。一个接地体散流时,若有一个此时不散流的接地体处在前者的电流场中,则后者其具有的某一电位,此电位与前一接地体的电流之比值为该两接地体的互电阻^[10]。同样的,一个接地体散流时,自身所具有的电位与电流之比值为该接地体的自电阻。

3. 位置关系

通常将复合型接地装置线性微元等分后,会有一些分支导体处在倾斜位置或是呈现出弧状,针对这些不规则位置上的分支导体,可先将其用沿竖直方向与水平方向上的折线段来代替,再按照平均电位法和诺依曼公式计算这些折线的电阻参数^[11]。本文则是将接地环等分成 n 份,用每一段弧对应的弦长来代替弧的长度,可见 n 越大,弧线围成的曲线越接近一个圆。这样将接地装置分成无数小段导体后,每两段微分导体之间就有平行、相交和异面垂直等多种位置关系。

4. 公式推导

根据文献[12-14]的介绍,阻抗的计算通常采用诺依曼积分公式来演算。为此,本文将采用该公式来计算分段导体的自电阻和导体之间的互电阻。如图2所示,空间内两异面的倾斜导体 ab 和 AB ,两导体的长度分别为 l_i 、 l_j ,导体的夹角为 θ ,其中导体 AB 在导体 ab 所在直线上的投影为 $A'B'$,导体 ab 在导体 AB 所在直线上的投影为 $a'b'$,两导体的所在的平面是平行的,且两平面之间的距离为 D ,那么两个导体的公垂线 EE' 的长度为 D 。根据诺依曼公式,任意两导体 i 与 j 在空间位置的之间的互阻抗可表示为^[12]

$$R = \frac{\rho}{4\pi l_i l_j} \left(\int_{l_i} \int_{l_j} \frac{dl_i dl_j}{D_{ij}} + \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{dl_i dl_j}{D'_{ij}} \right) = R_{ij} + R'_{ij} \quad (1)$$

式中, D_{ij} 为导体 i 上的微元 dl_i 到导体 j 上的微元 dl_j 的

距离; D'_{ij} 为导体 i 镜像导体上的微元 dl'_i 到导体 j 上的微元 dl'_j 的距离; ρ 为土壤电阻率。

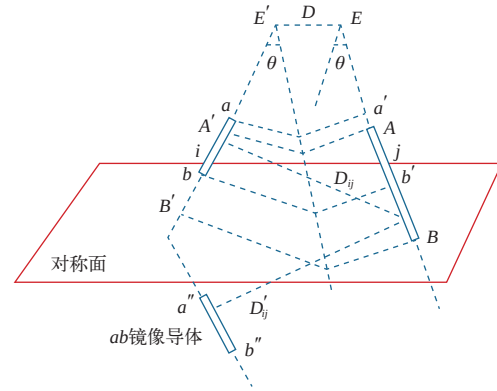


图2 两异面倾斜导体空间位置图

$$R_{ij} = \frac{\rho}{4\pi l_i l_j} \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{dl_i dl_j}{D_{ij}} \quad (2)$$

$$R'_{ij} = \frac{\rho}{4\pi l_i l_j} \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{dl_i dl_j}{D'_{ij}} \quad (3)$$

式中, R_{ij} 为导体 ab 与导体 AB 之间的互电阻; R'_{ij} 为导体 ab 的镜像导体 $a'b'$ 与导体 AB 之间的互电阻。由上面的公式可以看出,要计算多导体的电阻,应首先计算出双重积分 R_{ij} 和 R'_{ij} 。以求解 R_{ij} 为例进行公式变换和推导,可得到下式结果。同理可以求出 R'_{ij}

$$R_{ij} = \frac{\rho}{4\pi l_i l_j} \left(l_i \int_{l_j} \frac{1}{D_{ij}} dl_j + l_j \int_{l_i} \frac{1}{D_{ij}} dl_i - \frac{D}{\sin \theta} \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{ds \sin \theta}{D_{ij}^3} dl_i dl_j \right) \quad (4)$$

利用文献[15-16]给出的求解方法,对式(4)进一步推导,最终可以得到 R_{ij} 为

$$R_{ij} = \frac{\rho}{2\pi l_i l_j} \left[(EA + l_j) \tanh^{-1} \frac{l_i}{Bb + Ba} + (E'a + l_j) \tanh^{-1} \frac{l_j}{Bb + Ab} - EA \tanh^{-1} \frac{l_i}{Aa + Ab} - E'a \tanh^{-1} \frac{l_j}{Ba + Ab} - \frac{D}{\sin \theta} \delta \right] \quad (5)$$

其中

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{EE'}{Bb} \cot \theta + \frac{EB}{EE'} \frac{E'b}{Bb} \sin \theta \right) - \tan^{-1} \left(\frac{EE'}{Ba} \cot \theta + \frac{EB}{EE'} \frac{E'a}{Ba} \sin \theta \right) -$$

$$\begin{aligned} & \tan^{-1}\left(\frac{EE'}{Ab} \cot \theta + \frac{EA}{EE'} \frac{E'b}{Ab} \sin \theta\right) - \\ & \tan^{-1}\left(\frac{EE'}{Aa} \cot \theta + \frac{EA}{EE'} \frac{E'a}{Aa} \sin \theta\right) \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)是计算空间内处于异面位置两倾斜导体互电阻的一般化公式。最后利用式(1)便可求得导体*i*与导体*j*之间的互电阻系数*R*。

如果加入的垂直接地体为*nl*根,并将每根垂直接地体等分成*nn*段,水平接地环分成*n*段,则此时将整个接地装置分成了(*n*+*nl*×*nn*)段导体,通过计算所有分段导体的自电阻系数以及导体之间的互电阻系数便可形成其电阻系数矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \{\mathbf{R}_{ij}\}_{(n+nl \times nn) \times (n+nl \times nn)} \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{n \times n} & \mathbf{R}'_{n \times nn} & \cdots & \mathbf{R}''_{n \times nn} \\ \mathbf{R}'_{nn \times n} & \mathbf{R}_{nn \times nn} & \cdots & \mathbf{R}'_{nn \times nn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}''_{nn \times n} & \mathbf{R}'_{nn \times nn} & \cdots & \mathbf{R}_{nn \times nn} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

由于接地装置为等位体,设每一分段导体的电位为 φ_g ,令 $N=n+nl \times nn$,流经第*k*个导体的电流为 $i_k(k \in [1, N])$,则有

$$\begin{pmatrix} \varphi_g \\ \vdots \\ \varphi_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{11} & \cdots & \mathbf{R}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}_{N1} & \cdots & \mathbf{R}_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

由此求解出每段电流的表达式

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_N \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{11} & \cdots & \mathbf{R}_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}_{N1} & \cdots & \mathbf{R}_{NN} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varphi_g \\ \vdots \\ \varphi_g \end{pmatrix} \\ &= \left(\frac{\rho}{4\pi}\right)^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{R}'_{11} & \cdots & \mathbf{R}'_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}'_{N1} & \cdots & \mathbf{R}'_{NN} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varphi_g \\ \vdots \\ \varphi_g \end{pmatrix} \\ &= \left(\frac{\rho}{4\pi}\right)^{-1} \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & \cdots & r_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_g \\ \vdots \\ \varphi_g \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

$R_{st} = \rho R'_{st} / (4\pi)$ ($s \in [1, N], t \in [1, N]$)。那么注入该接地装置的总电流则为各分段导体中流过的电流之和为

$$I = \sum_{t=1}^N i_t = \left(\frac{\rho}{4\pi}\right)^{-1} \varphi_g \left(\sum_{t=1}^N r_{1t} + \sum_{t=1}^N r_{2t} + \cdots + \sum_{t=1}^N r_{Nt} \right)$$

$$= \left(\frac{\rho}{4\pi}\right)^{-1} \varphi_g \sum_{s=1}^N \sum_{t=1}^N r_{st} \quad (10)$$

根据欧姆定律可以计算出接地装置的接地电阻为

$$R_g = \frac{\varphi_g}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \frac{1}{\sum_{s=1}^N \sum_{t=1}^N r_{st}} \quad (11)$$

由此可见,只要已知接地装置的形状、尺寸以及土壤电阻率,计算出各分段导体的电阻系数,即可确定其接地电阻值。

根据上述系数矩阵不难发现,如果式(7)中分别提取

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_1 &= \mathbf{R}_{n \times n} = \{\mathbf{R}_{ij}\}_{n \times n} \\ \mathbf{R}_2 &= \mathbf{R}_{nn \times nn} = \{\mathbf{R}_{ij}\}_{nn \times nn} \\ \mathbf{R}_3 &= \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{nn \times nn} & \cdots & \mathbf{R}'_{nn \times nn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{R}'_{nn \times nn} & \cdots & \mathbf{R}_{nn \times nn} \end{pmatrix}_{nl \times nl} \end{aligned} \quad (12)$$

则 $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$ 和 $\mathbf{R}_3$ 分别为水平接地环接地电阻系数矩阵、单根垂直接地体接地电阻系数矩阵和*nl*根垂直接地体组接地电阻系数矩阵。利用上述方法,则可以分别计算出水平接地体、垂直接地体和垂直接地体组的接地电阻。

程序验证

根据上述计算方法,编写Matlab程序,可求出接地电阻数值解。利用文献[1]给出的复合型接地电阻经验公式

$$R_{gc} = \frac{\frac{R_{gv} R_{gh}}{n}}{\frac{R_{gv}}{n} + R_{gh}} \frac{1}{\eta_c} \quad (13)$$

式中,*n*为垂直接地体数量; R_{gv} 为单根垂直接地体的接地电阻; R_{gh} 为水平接地体的接地电阻; η_c 为组合接地体的利用系数,以接地环与4根垂直接地体的复合型接地装置为模型,设定接地装置各类参数,取组合接地体利用系数为0.75,利用公式即可得接地电阻经验值。同样参数下,与Matlab程序计算值进行对比,比对结果如表1所示。

由此可见,利用Matlab通用程序,可以通过设定不同的土壤电阻率、埋设深度、接地环半径、

表1 接地电阻计算值与经验值对比表

序号	土壤电阻率	埋设深度	接地环半径	接地环导体半径	垂直接地体长度	垂直接地体导体半径	接地电阻值		误差
	/Ω·m	/m	/m	/mm	/m	/mm	计算值	解析值	
1	200	0.5	2.0	4.0	0.9	2.5	22.07	22.87	-3.51
2	100	0.6	3.0	2.5	1.4	4.0	8.21	8.62	-4.76
3	300	1.0	4.0	5.0	1.9	5.0	17.05	17.29	-1.39
4	500	1.3	5.0	4.0	2.4	5.0	23.40	24.00	-2.51

接地环导体半径、垂直接地体长度及垂直接地体导体半径等参数值便可得到相应的接地电阻值。表1中显示，所得计算值与经验值的误差均不超过5%。从而验证了接地电阻计算公式推导和Matlab通用程序的正确性。

通过表1可以看出，利用数值计算方法求的风电机组接地装置电阻值更具有直观性，只要确定好接地装置各类参数，不必根据垂直接地体数量的不同，随之改变不同情况下的适用经验公式，也不必考虑组合接地体利用系数等因素，便可直接得到较经验公式更为准确的值。

实验验证

为了进一步检验该数值算法的正确性，本文还建立了测量接地电阻的实验模型，如图3所示。本次实验以4根垂直接地体作为一个接地装置系统。实验器材：4根1.2 m、直径10.00 mm的钢筋，ZC-8型电阻测量仪1个，测量辅助电极4根，2 m、50 m的卷尺各一个，铜包导线若干及一些辅助工具。

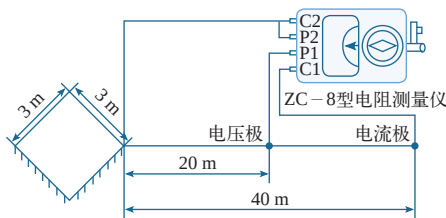


图3 直线布电极法测量接地电阻示意图

利用四电极法测量土壤电阻率^[2]，选择不同的位置进行多次测量，取其平均值为土壤电阻率值。如表2所示，得到土壤电阻率的值28.17 Ω·m。

将4根垂直接地体分别打入土壤中，并将这4根钢筋用导线相互连接起来，构成一个边长为3 m的

表2 土壤电阻测量值

(单位: Ω)						
测量次数	1	2	3	4	5	6
测量值	29.43	28.57	28.85	27.74	27.37	28.01
测量次数	7	8	9	10	平均值	
测量值	29.16	28.2	26.71	27.68	28.17	

正方形，并且每根钢筋的埋地部分长度为0.5 m。下面利用直线布电极法测量接地电阻，测得的结果如表3所示。

表3 接地电阻计算值与实测值对比表

埋地长度/m	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
计算值/Ω	12.010 5	10.523	9.411 9	8.546 9	7.852 3	7.280 9
测量值/Ω	12.0	10.3	9.5	8.7	7.7	7.4
误差 (%)	0.09	2.17	-0.93	-1.76	1.98	-1.61

由表3可见，计算值与实际测量值的误差均保持在3%以内。进一步证实了运用Matlab程序计算接地电阻的正确性。

结束语

本文通过对接地电阻的计算公式进行推导，利用平均电位法，得到了风电机组典型接地装置的电阻系数矩阵，并编写了Matlab计算接地电阻的通用程序。通过经验解析值和实际测量值的对比，验证了本文针对接地电阻计算公式的推导和相应程序的正确性。从而得出了比利用经验公式求解接地电阻更加准确而又简便的方法。通过设置不同的接地装置参数，可求得相应的接地电阻值，显示出程序较强的通用性，为风电场接地系统的设计提供了参考和依据。

参考文献

[1] 张小青. 风电机组防雷与接地 [M]. 北京：中国

- 电力出版社, 2009: 146-148.
- [2] 甘正佳, 刘春, 文远芳. 均匀土壤接地电阻的三维仿真 [J]. 高电压技术, 2003, 29 (6): 45-46.
- [3] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 30-40.
- [4] 王洪泽, 杨丹, 王梦云. 电力系统接地技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 33-55.
- [5] 姜燕, 张晚英, 周有庆, 等. Matlab在接地电阻计算中的应用 [C]. 全国电工理论与新技术学术年会, 湖南, 2007: 266-259.
- [6] 宋美云. 防雷接地工程中的接地电阻计算 [C]. 全国电网中性点接地方式与接地技术研讨会论文集, 杭州, 2005: 228-231.
- [7] 刘春, 刘鑫. 复合接地网接地电阻的3D仿真 [C]. 中国电机工程学会高压专委会 2007 年学术年会论文集, 深圳, 2007.
- [8] 徐华, 吕金煌, 文习山, 等. 杆塔冲击接地电阻的计算 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (3): 93-95.
- [9] 王晓辉, 程海新, 张小青. 斜置接地体接地电阻计算及斜置角度的优选 [J]. 吉林电力, 2006, 34 (6).
- [10] 冯志伟, 马金福. 电位降法测量接地电阻时电压极补偿点位置分析 [J]. 电气应用, 2009, 28 (8): 18-20.
- [11] 张小青. 建筑物内电子设备的防雷保护 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [12] 王晓辉. 风力发电机组雷电暂态效应的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [13] Grover F W. Inductance Calculations [M]. New York: Dover, 1998.
- [14] Elsherbiny M M, Chow Y L, Salama M M A. A fast and accurate analysis of grounding resistance of a driven rod in a two-layer soil [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 1 (2): 808-814.
- [15] 刘成华. 风力发电机组雷电瞬态模拟的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [16] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991.

(收稿日期: 2014-09-19) EA

(上接第27页)

参考文献

- [1] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33 (8): 1-5.
- [2] 张保会, 郝志国. 智能电网继电保护研究的进展 (二) 保护功能的发展 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30 (3): 1-5.
- [3] 宋璇坤, 李敬如, 肖智宏, 等. 新一代智能变电站整体设计方案 [J]. 电力建设, 2012, 33 (11): 1-6.
- [4] 宋璇坤, 沈江, 李敬如, 等. 新一代智能变电站概念设计 [J]. 电力建设, 2013, 34 (6): 11-15.
- [5] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (5): 63-67.
- [6] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计110 (66) ~ 750 kV智能变电站部分 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [7] 易永辉, 曹一家, 张金江. 基于IEC 61850标准的新型集中式IED [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (12): 36-40.
- [8] 韩伟, 杨小铭, 仇新宏, 等. 基于数字化采样的集中式保护装置 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (11): 101-104.
- [9] 董新洲, 丁磊. 数字化集成保护与控制系统结构设计方案研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (1): 1-5.
- [10] 周良才, 张保会, 雷俊哲. 高可靠性的变电站集中式后备保护 [C]. 中国高校电力系统及其自动化专业第25届年会, 长沙, 2009.
- [11] 刘明慧, 赵晓东, 司梦. 智能变电站过程层网络流量管理方式研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (23): 87-92.

(收稿日期: 2014-07-14) EA