

# 直流接地极入地电流 在交流系统中的通路构成及计算方法综述

李 瑾<sup>1</sup>, 王渝红<sup>1</sup>, 梁晓斌<sup>2</sup>, 刘天宇<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 直流输电系统单极大地运行引起的变压器直流偏磁现象将影响电网的安全稳定运行, 在选择直流偏磁抑制措施时, 必须正确地计算交流电网中直流电流的分布。将交流电网直流电流分布计算方法进行了分类, 并对各种计算方法的原理和模型进行了详细介绍; 而后又从适用场合、计算精度、所需数据、模型复杂程度及是否适合用于分析变压器加装隔离装置的效果等几个角度分别对各种计算方法进行评价, 最后对未来的研究方向提出了建议。

**关键词:** 交流电网直流电流分布; 直流偏磁; 变压器中性点; 高压直流输电

**Abstract:** The DC bias caused by monopolar ground return operation mode of HVDC system will affect the safe and stable operation of AC power grid. DC current distribution in AC power grid must be correctly and carefully calculated before taking the suppression measurement into consideration. Several DC current distribution calculation methods are classified and analyzed, and the theoretical fundamentals and mathematical models used in each method are introduced in detail. Differences in range of application, computational accuracy, required data, model complexity and whether the method is suitable for DC bias suppression equipment for transformer in AC substation are evaluated and compared thoroughly. Moreover, some suggestions on research directions in the future are given.

**Key words:** DC current distribution in AC system; DC bias; neutral point of transformer; HVDC

中图分类号: TM721 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0034-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.009

## 0 引言

高压直流输电具有距离远及输送容量大等优点, 是一种经济高效的输电方式。但当直流系统以单极大地方式运行或双极不平衡运行时, 将会通过直流系统接地极向地中注入较大的直流电流, 在极址土壤中形成一个恒定直流电流场, 这会导致大地电位绝对值升高、地面跨步电压和接触电势增大等负面效应。直流接地极电流引起的地电位分布改变, 如两个变电站接地网之间存在电位差, 就可能引起直流电流通过变压器中性接地点流入变压器绕组, 引起变压器磁通、励磁电流的畸变以及变压器本体产生振动和噪声<sup>[1-7]</sup>, 也就导致直流偏磁现象。

另外, 当太阳剧烈活动时, 将会引起地球发生地磁暴, 这会导致地磁扰动(geomagnetic disturbance, GMD)<sup>[8]</sup>的发生, 从而使地表电位分布发生改变, 在中性点接地变压器、输电线路和大地构成的回路中

产生地磁感应电流(geomagnetically induced current, GIC)<sup>[8]</sup>, 同样会导致直流偏磁现象的发生<sup>[9-10]</sup>。

直流偏磁发生时, 将会影响变压器的运行, 使其温度升高、损耗增加、噪声和振动加剧; 同时系统的谐波增加、电压下降、继电保护误动作, 严重时甚至会威胁到整个电网的安全稳定<sup>[11-15]</sup>。因此, 为了合理地估计直流偏磁电流的大小, 以便采取正确的措施减小直流偏磁的危害, 有必要研究交流系统中直流电流的分布情况。

由于地磁暴和直流系统单极大地运行对地电位分布的影响方式是不同的, 因此在研究交流系统直流电流分布时需要区别对待<sup>[9-10]</sup>, 下面主要综述了在直流系统单极大地运行时交流电网直流电流分布的计算方法。

## 1 交流电网直流电流分布的计算

交流电网直流电流的分布模型主要由地上模型

和地下模型共同构成。地上模型指的是地上交流输电网络模型,为电路模型,包括线路模型和变压器模型;地下模型则指的是地下土壤模型,为电场模型。

目前,已有许多学者对交流电网的直流电流分布进行了研究,并提出了多种计算方法。下面将这些方法根据土壤模型建立方法的不同,分为构建电场-电路网络计算的方法和等效为纯电阻网络计算的方法。构建电场-电路网络的计算方法是建立详细的地上交流系统直流电阻网络和地下土壤电场网络,通过矩量法、有限元法及边界元法求解土壤模型的格林函数<sup>[16]</sup>得出地表电位分布等参数,再结合地上电阻网络综合分析计算得出交流电网直流电流分布的计算方法。等效为纯电阻网络计算的方法是指将土壤电场网络等效为电阻网络,通过中性点接地的变压器将地上网络和地下网络耦合起来形成一个纯电阻网络,再使用电路理论来计算交流系统中直流电流分布的计算方法。

由于精确的交流系统直流网络参数容易从调度部门获取;同时接地极的形状对接地电阻计算结果影响较小<sup>[17]</sup>;因此交流电网直流电流分布的计算精度主要由所建立的土壤模型的精度决定。

下面主要从单个直流接地极系统单极大地运行的情况来介绍交流系统直流电流分布的计算方法。

## 2 构建电场-电路网络的计算方法

构建电场-电路网络的计算方法主要包括基于经典接地极理论计算直流电流分布、复合分层土壤模型下计算直流电流分布、半岛地质条件下计算直流电流分布和考虑复杂埋地网络计算直流电流分布4种方法。其中的经典接地极理论计算直流电流分布的方法在计算常规交直流系统的直流偏磁计算中有着广泛的应用。构建电场-电路网络中最重要的是正确建立电场模型。

### 2.1 经典接地极理论计算直流电流的分布

在使用经典接地极理论进行地中直流电流分布的计算时,首先要基于土壤的导电参数,使用有限元法和边界元法建立土壤电流场分布模型,计算出地表电位;再根据交流网络的地理位置及其直流网络参数计算出直流电流分布,而这些直流电流反过来又将影响地下电流场的分布,因而需要对电路和电场进行反复迭代计算,在这种反复交替迭代计算出

的数值收敛后,最终得到地表电位分布<sup>[18]</sup>。目前常用来计算直流偏磁的CDEGS软件就是基于该原理。

在建立电场模型时,考虑到地球的构造,通常对大地采取水平分层处理,即用格林函数建立土壤电阻率分层模型<sup>[18]</sup>。使用有限元法得到的大地水平分层模型为<sup>[19]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x}(\delta \frac{\partial \varphi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\delta \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\delta \frac{\partial \varphi}{\partial z}) = f(x, y, z) \quad (1)$$

$$\varphi|_{s_1} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{s_2} = 0 \quad (2)$$

式中: $s_1$ 为无穷远处的边界; $s_2$ 为大地与空气的接触边界; $\varphi$ 为电势; $\delta$ 为电导率的函数; $f$ 为电源位置的函数。

土壤结构对交流电网直流电流的分布影响较大,土壤分层越细致,计算结果越精确<sup>[20]</sup>。文献[21]给出了任意层格林函数的通用理论表达式,并推导了垂直分层土壤的格林函数表达式。但当土壤层数多于3层时,格林函数的表达式将变得十分复杂<sup>[22-23]</sup>,计算极易出错。

经典接地极理论作为最常用的计算直流系统单极大地运行方式下交流电网中直流电流分布的方法,具有较高的计算精度,也非常适合分析加装直流抑制装置的效果。由于该方法仅对土壤进行水平分层,因此更适用于地质条件较为均一的情况,否则将产生较大的误差。该方法建立的模型并不复杂,但需要收集精确的土壤分层情况以及各层的土壤电阻率数据。

### 2.2 复合分层土壤模型下计算直流电流分布

仅进行水平分层的土壤模型无法考虑山川、河流、海洋等因素对交流系统直流电流分布的影响。为了正确计算以上因素对系统的影响,建立的土壤模型不仅要进行水平分层,还要进行垂直分层。

文献[24]认为交流系统平均地表电位的作用有限,可以忽略,因此在计算交流系统中直流电流分布时,仅需根据求得的地表电位分布直接带入地上电阻网络进行计算,即可得到交流网络中直流电流的分布。计算时,该文对土壤进行了水平分层和垂直分层,并根据其格林函数,通过镜像法推导出了在水平分层、垂直分层及复合分层土壤结构中地表电位的解析公式。

对于水平双层土壤结构,电流源在第1层土壤中,坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$ ;地面任一点坐标为 $(x, y, 0)$ ;第1层土壤的电阻率为 $\rho_1$ ,厚度为 $H$ ;第2层土壤的电阻率为 $\rho_2$ 。泰勒级数展开后地表电位为<sup>[24]</sup>

$$V_p = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} + \right. \\ & \left. \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \cdot \right. \\ & \left. \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-2nH+z_0)^2}} + \right. \\ & \left. \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+2nH-z_0)^2}} + \right. \\ & \left. \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+2nH+z_0)^2}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ 。

对于垂直双层土壤结构,电流源在左侧土壤中,坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$ ,距地面 $z_0$ ,距分界面 $V$ ,地面任一点坐标为 $(x, y, 0)$ ;左、右侧土壤电阻率分别为 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 。泰勒级数展开后左边的地表电位为<sup>[24]</sup>

$$V_p' = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}} + \right. \\ & \left. \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+z_0)^2}} \right] + \\ & k \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-2nH+z_0)^2}} + \right. \\ & \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+2nH-z_0)^2}} + \\ & \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-2nH-z_0)^2}} + \\ & \left. \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z+2nH+z_0)^2}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ 。

对于图1所示的复合土壤模型,地表电位为<sup>[24]</sup>

$$V = V_L + k' V_0 \quad (5)$$

式中: $V_L$ 为所有陆地电源点的作用,令式(3)中 $H = H_1$ 即得 $k' = \frac{\rho_3 - \rho_1}{\rho_3 + \rho_1}$ , $\rho_3$ 为海洋的电阻率; $V_0$ 为海洋层中所有电源点的作用,将式(3)中的 $x_0$ 用 $(x_0 + 2H_2)$ 代替,且令 $H = H_1$ 即得。

该方法建立了详细的计算地表电位分布的土壤模型,推导出了精确的地表电位计算公式,适合于计

算包括山川、河流、海洋等特殊地质环境下交流系统中的直流电流。由于给出了地表电位分布公式,因此当收集到了详细的地下网络参数,计算将非常简便快捷。但该方法忽略了地上交流系统的直流电流对地下电场分布的影响,这将引入较大的误差,因此这种方法仅适合于估计交流系统中直流电流的分布,并不适合于分析变压器加装直流电流抑制装置的效果。

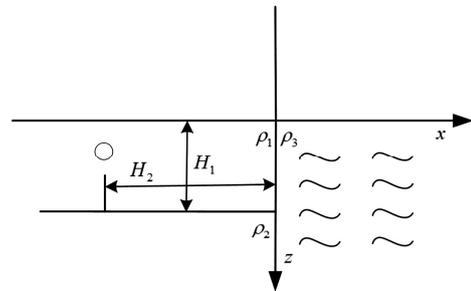


图1 复合土壤结构

### 2.3 半岛地质条件下计算直流电流的分布

文献[25]详细介绍了半岛地质条件下交流系统中直流电路的分布计算方法。这种计算方法与考虑复杂埋地网络的计算方法类似,都是先计算地表电位分布,而后再将地表电位分布数据直接带入交流系统直流电阻网络进行直流电流的分布计算,未考虑交流系统中的直流电流对地表电位分布的影响。

在计算地表电位分布时,将三维空间转化为二维空间,并结合保角变换法,推导出了半岛地质条件下地表电位分布的表达式。

对于如图2所示的半岛陆地水平双层土壤模型,在接地极直流电流作用下其地表任一点 $(r, \theta, -H)$ 的电位为<sup>[25]</sup>

$$\begin{aligned} \varphi_{dl}(r, \theta, -H) = & V_{dl}(r, \theta, -H) + V'_{dl}(r, \theta, -H) + \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_1^n [V_{i1}(r, \theta, -H) + V_{i2}(r, \theta, -H) + \\ & 2V_{i3}(r, \theta, -H)] + \gamma_2 \{ V_{d2}(r, \theta, -H) + \\ & V'_{d2}(r, \theta, -H) + \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_1^n [V'_{i1}(r, \theta, -H) + \\ & V'_{i2}(r, \theta, -H) + 2V'_{i3}(r, \theta, -H)] \} \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $\gamma_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ ;  $\gamma_2 = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0 + \rho_1}$ ;  $\rho_0$ 、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 分别为海水、上层土壤和下层土壤的电阻率; $V_{dl}$ 、 $V'_{dl}$ 、 $V_{i1}$ 、 $V_{i2}$ 、 $V_{i3}$ 及 $V_{d2}$ 、 $V'_{d2}$ 、 $V'_{i1}$ 、 $V'_{i2}$ 、 $V'_{i3}$ 分别为接地极及其各镜像在场点产生的电位。

该方法建立了详细的地下电场模型, 得出了精确的地表电位计算公式, 特别适合于计算半岛等特殊地质环境下交流系统中的直流电流分布, 若收集到了详细的地下网络参数, 计算将非常快捷。但该方法同样忽略了地上交流系统的直流电流对地下电场分布的影响, 将引入较大误差, 故此方法仅适合于估计交流系统中直流电流的分布, 不适合于分析变压器加装直流电流抑制装置的效果。

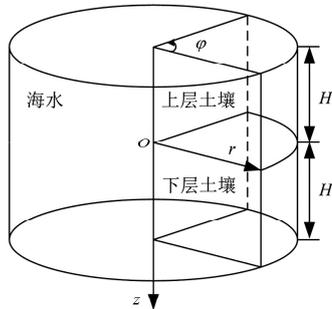
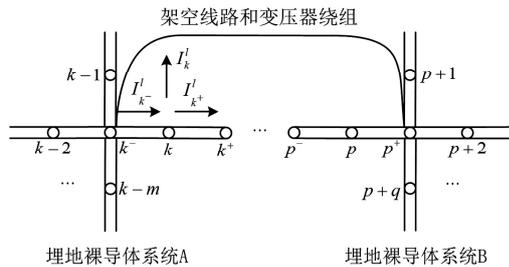


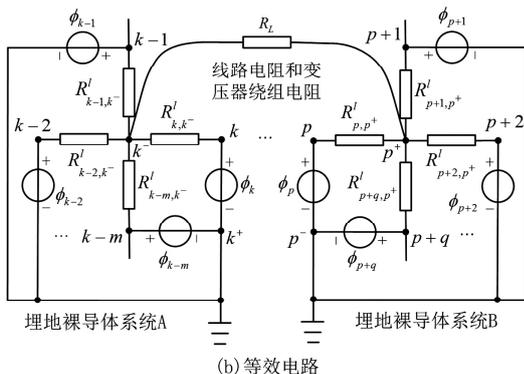
图2 半岛陆地水平双层土壤模型

### 2.4 考虑复杂埋地网络计算直流电流的分布

文献[26-28]中认为交流系统中直流电流的源是由埋地导体产生的电场, 埋地导体主要包括直流接地极、交流变电站接地网和其他金属物体等。基于此思想, 将埋地导体分段, 并使用矩量法进行分析, 得出了直流系统大地运行时交流系统直流电流分布的数值计算方法。



(a) 交流网络与埋地导体连接示意图



(b) 等效电路

图3 埋地裸导体系统与交流系统构成的电路网络  
由埋地导体与地上交流系统直流电阻构成的某

个电路网络如图3(a)所示, 其等效电路为图3(b)。图中:  $k^-、p^+$  为导体段的交点;  $k-i、p+j$  ( $i=0, \dots, m; j=0, \dots, q$ ) 为各导体段的中点;  $R_{k-i, k^-}^l、R_{p+j, p^+}^l$  ( $i=0, \dots, m; j=0, \dots, q$ ) 为各导体段中点与节点之间的自电阻;  $\phi_{k-i}、\phi_{p+j}$  ( $i=0, \dots, m; j=0, \dots, q$ ) 为各导体段中点处的电位。

各导体段的漏电流  $I^m$  及中点电位  $\phi_k$  为<sup>[28]</sup>

$$I^m = [2G^l R - G^l (A_1 + A_2) G^{-1} G^l R - E]^{-1} \times G^l (A_1 + A_2) G^{-1} I^f \quad (7)$$

$$\phi_k = R I^m \quad (8)$$

式中:  $I^f$  为注入的直流电流列向量;  $G$  为节点电压方程对应的电导矩阵;  $G^l$  为各节点与各导体段间的电导构成的矩阵;  $R$  为由各导体段间的转移阻抗构成的矩阵;  $A_1、A_2$  为各节点同各导体段首末端的关联矩阵。

将求得各导体段上的漏电流及中点电位代入图3(b)电路即可计算出交流系统中直流电流分布。

该方法适合于拥有多种类型接地系统的情况, 也适合于分析变压器加装直流电流抑制装置的效果。该方法需要对复杂的埋地系统进行建模, 而且考虑了土壤分层的情况, 因此所建立的模型非常复杂, 但计算结果具有较高的精度。

## 3 等效为纯电阻网络的计算方法

该类方法中的等效地下电阻网络目前存在多种构成方法, 主要分为3类: 用极自电阻和耦合电阻构成的网络<sup>[17-18]</sup>、用直流极与变电站间的互阻、变电站间的互阻和接地电阻构成的网络<sup>[24-25, 29]</sup>以及用变压器接地极与直流接地极之间等效阻抗构成的网络<sup>[19]</sup>。

### 3.1 用极自电阻、耦合电阻构成的地网等效模型

文献[19]通过引入极自电阻和耦合电阻的概念, 将地网等效为仅包含极自电阻和耦合电阻的电路网络, 并起名为网络算法, 其原理如图4所示。图中: 极自电阻  $R_i^0$  表示由该接地极  $i$  与无穷远处散流通道所决定的电阻值; 耦合电阻  $R_j$  表示由接地极  $i$  和接地极  $j$  之间导电通道所决定的电阻值。

通常情况下, 极自电阻取为真值电阻, 耦合电阻可使用静电比拟法及等效表面积法进行计算<sup>[29]</sup>。文献[30]推导出了耦合电阻的计算公式。文献[31]分析了极自电阻和耦合电阻与自电阻和互电

阻<sup>[30-32]</sup>的关系,可根据自电阻和互电阻参数得出相应的极自电阻和耦合电阻参数。

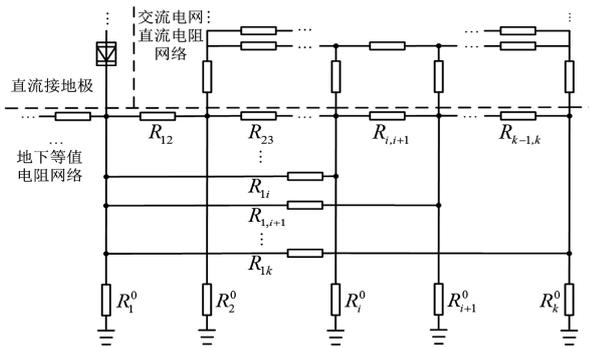


图4 网络算法原理图

基于场路耦合原理,将复杂的地下电场网络等效为由极自电阻和耦合电阻构成的纯电阻网络,模型简单,并通过仿真表明其计算结果较为准确。由于该方法无需考虑地质构造,因此适合于任何土壤结构的分析,同时该方法也特别适合于变压器加装隔直装置的效果分析。

### 3.2 用直流极与变电站间的互阻、变电站间的互阻和接地电阻构成的地网等效模型

文献[27]利用互电阻的概念,建立了直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵,并用变电站的接地电阻、直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵建立了地网等效模型,如图5所示。

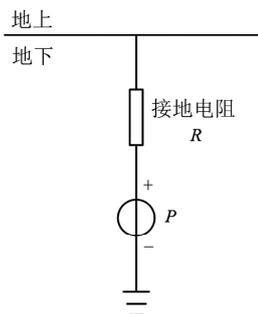


图5 变电站地下模型

变电站的地表感应电位为<sup>[33]</sup>

$$P = MI_D + NI_A \quad (9)$$

式中:  $M$  为直流极与变电站间的互阻矩阵;  $N$  为变电站间(不包括自身作用的互阻矩阵);  $I_D$  为直流极入地电流;  $I_A$  为变电站中性点直流电流。

文献[34]用复镜像法计算了直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵,并通过仿真验证了其具有较高的精确度。文献[35]中提出了用复镜像拟合的方法来计算多层土壤情况下直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵,并将其公

式化,通过仿真证明了该公式的准确性。

同样基于场路耦合原理,把复杂的地下电场网络等效为由接地电阻、直流极与变电站间的互阻和变电站间的互阻构成的纯电阻网络,适合于所有地质情况以及加装隔直装置效果的分析。模型搭建简单,计算简便且结果较准确。但直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵的参数不易得到。

### 3.3 用变压器接地极与直流接地极之间等效阻抗构成的地网等效模型

文献[15]提出了一种利用变压器接地极与直流接地极之间等效阻抗表示的地网等效模型。先根据交流电网的直流电阻模型以及变压器中性点直流电流大小求出变压器接地点电位,再根据  $U_i = R_i I$  求得  $R_i$ , 式中:  $U_i$  为变压器接地点  $i$  的电位;  $I$  为直流接地极流入大地的电流  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

该方法的计算模型非常简单,计算时所需的参数很少且容易获得,并且对大地构造没有限制。但由于计算得出的地下模型参数是随着地上网络模型及参数的改变而改变的,因此仅适合于地上网络固定不变的情况。若地上网络发生改变,必须重新计算地下网络参数,否则可能会产生较大计算误差,故并不适合于变压器加装直流抑制装置的效果分析。

## 4 交流电网直流电流分布的计算方法比较

在进行交流电网直流电流分布的计算方法比较时,主要依据以下5个原则: 1) 计算的适用场合; 2) 计算结果的精确度; 3) 所需收集的数据; 4) 建立模型的复杂程度; 5) 是否适合于分析变压器加装隔直装置的效果。

总的来说,构建电场-电路网络的方法和等效为纯电阻网络的方法相比:前者中基于经典接地理论计算直流电流分布的方法和考虑复杂埋地网络的直流电流分布计算方法,建立了详细的土壤模型,准确地反应了实际大地中的电场分布情况,在土壤数据准确且全面的情况下,计算结果更加精确。但复合分层土壤模型下直流电流分布的计算方法和半岛地质条件下直流电流分布的计算方法,都未考虑电流网络和电场网络间的相互影响,因而计算结果有较大的误差;而后者将土壤模型等效为由数量有限的电阻构成的网络,再与地上电阻网络相耦合,计算结果误差较小,大大简化了计算,模型简单,且不必

表1 各种交流电网直流电流计算方法比较

分类	计算模型名称	适用场合	计算精度	所需数据	模型复杂程度	是否适合用于分析变压器加装隔直装置的效果
电场-电路耦合法	经典接地极理论	土壤分层均匀	精确	土壤分层信息、各层土壤的电阻率	复杂	适合
	复合分层土壤模型	山川、河流、海洋等不均匀分层土壤	误差较大	地质构成分界信息及其电阻率	非常复杂	不适合
	半岛模型	半岛	误差较大	地质构成分界信息及其电阻率	非常复杂	不适合
	复杂埋地网络模型	包含多种类型接地系统	准确度高	各埋地导体段的电导、土壤分层信息及其电导率	非常复杂	适合
等效纯电阻法	由极自电阻、耦合电阻构成的地网等效模型	任何场合	一般	各中性点接地变压器的直流接地电阻值、耦合电阻值	简单	适合
	由直流极与变电站之间的互阻、变电站间的互阻和接地电阻构成的地网等效模型	任何场合	一般	直流极与变电站之间的互阻矩阵、变电站间的互阻矩阵、各中性点接地变压器的接地电阻	简单	适合
	由变压器接地极与直流接地极之间的等效阻抗构成网等效模型	地上交流网络参数固定不变	一般	各中性点接地变压器的中性点直流电流	非常简单	不适合

收集土壤参数,但是该方法在计算时将电场网络等效为电路网络时将引入部分误差。

各方法的仿真结果也印证了以上理论分析:文献[24]使用复合分层土壤模型对三广直流单机大地运行时变压器接地中性点直流电流进行仿真计算,得到的仿真值和测量值之间的相对误差的平均值为9.907%;文献[26]使用复杂埋地网络模型计算出的春城主变压器中性点直流电流的相对误差为9.855%;文献[31]使用由极自电阻、耦合电阻构成的地网等效模型仿真出的葛一上直流及三上直流单极运行的各变电站中性点直流电流值与测量值间的相对误差的平均值为5.786%;文献[21]使用由直流极与变电站之间的互阻、变电站间的互阻以及接地电阻构成的地网等效模型,对楚穗直流单极运行时各变电站中性点直流电流计算得出的仿真值和测量值间相对误差的平均值为35.288%。造成文献[26]中的计算误差较小,与分析不符的原因是仿真模型中涉及的几个变电站的地表电位非常接近,这使得电流网络和电场网络之间的相互影响表现得不明显,从而使误差降低,但这只是个例,并不具有普遍性。

综合比较各计算方法的适用场合、计算精度、所

需数据、模型复杂程度及是否适合用于分析变压器加装隔直装置的效果,结果见表1。

## 5 结语

从直流系统单极大运行交流电网直流电流分布的模型构建出发,分析了多种交流电网直流电流分布的计算方法,并详细比较了各种方法的优缺点。

针对当前直流偏磁现象的研究情况,应结合实际工程的需求,充分发掘各种影响交流电网中直流电流分布的因素,并在计算时予以定量考虑,以便更加准确全面地掌握交流电网直流分布的情况,为直流偏磁抑制装置的选取提供更加全面的参考。

### 参考文献

- [1] 董霞. 变压器直流偏磁研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [2] Siti R m, Hassan S, Anuar M N K. Study the Harmonic Characteristics of DC Bias on the Single Phase Power Transformer[C] // 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOC2012), Melaka, Malaysia 2012: 501-504.
- [3] 王明新, 张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网

- 的影响分析[J]. 电网技术 2005, 29(3): 9-14.
- [4] Liu Qu, Zheng Jianchao, Li Licheng. Study on DC Current on Transformers During HVDC Systems Operated in Ground - return Mode [C]. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China, 2005.
- [5] 赵杰, 曾嵘, 黎小林, 等. HVDC 输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-329.
- [6] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化 2005, 29(2): 81-82.
- [7] 梅桂华, 徐柏榆, 王晓毛, 等. 直流输电对交流系统变压器的影响[J]. 广东电力 2006, 19(1): 1-7.
- [8] Bolduc L, Langlois P, Boteler D H, et al. A Study of Geomagnetic Disturbance in Quebec II: Detailed Analysis of a Large Event [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1251-1256.
- [9] IEEE Transmission and Distribution Committee Working Group. Geomagnetic Disturbance Effects on Power Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1206-1216.
- [10] Albertson V D. Solar - induced - current in Power System: Causes and Effects [J]. IEEE Transactions on PAS, 1973, 92(1): 471-477.
- [11] Girgis R, Vedante K. Effects of GIC on Power Transformers and Power Systems [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition (T & D), [S. l.]: IEEE 2012: 1-8.
- [12] Lahtinen M, Elovaara J. GIC Occurrences and GIC Test for 400 kV System Transformer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2002, 17(2): 555-561.
- [13] Bozoki B, Chano S R, Feero W E, et al. The Effects of GIC on Protective Relaying [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 725-739.
- [14] 郑涛, 陈佩璐, 刘连光, 等. 地磁感应电流对电流互感器传变特性及差动保护的影响[J]. 电力系统自动化 2013, 37(22): 84-89.
- [15] IEEE Transmission and Distribution Committee Working Group on Geomagnetic Disturbances and Power System Effects. Geomagnetic Disturbance Effects on Power Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1206-1216.
- [16] 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.
- [17] 曹昭君, 何俊佳, 叶会生, 等. 直流系统大地运行时交流系统直流分布的计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 82-84.
- [18] 马志强, 黎小林, 钟定珠. 直流输电大地电流对交流系统影响的网络分析算法[J]. 广东电力, 2005, 18(12): 4-8.
- [19] 陆继明, 肖东, 毛继雄. 直流输电接地极对地表电位分布的影响. 高电压技术 2006, 32(9): 55-58.
- [20] 何俊佳, 叶会生, 林福昌, 等. 土壤结构对流入变压器中性点直流电流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 14-18.
- [21] 潘卓洪, 张露, 谭波, 等. 水平层状土壤接地问题的理论推导与数值分析[J]. 高电压技术 2011, 37(4): 860-866.
- [22] Lagace P J, Vuong M H, Lefebvre M, et al. Multilayer Resistivity Interpretation and Error Estimation Using Electrostatic Images [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 21(4): 1954-1960.
- [23] Bo Z, Xiang C, Lin Li, et al. Parameter Estimation of Horizontal Multilayer Earth by Complex Image Method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1394-1401.
- [24] 刘曲, 李立涅, 郑健超. 复合土壤模型下 HVDC 系统单极大地运行时的电流分布. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 8-13.
- [25] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 半岛地址条件下计算高压直流输电地中直流分布的扩展镜像法[J]. 高电压技术 2011, 37(2): 444-452.
- [26] 曾嵘, 张波, 赵杰, 等. HVDC 地中直流对交流系统的影响及规律分析[J]. 高电压技术 2009, 35(3): 678-682.
- [27] 曾嵘, 赵杰, 尚春, 等. HVDC 地中直流对交流系统影响的防范措施[J]. 高电压技术 2009, 35(4): 919-925.
- [28] 张波, 赵杰, 曾嵘, 等. 直流大地运行时交流系统直流电流分布的预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 84-88.
- [29] 魏畅. 直流输电接地极电流场的直流通路网络建模与分析 [D]. 上海: 上海交通大学 2008: 4-20.
- [30] 杜松怀. 接地技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [31] 全江涛, 谢志成, 陈科基, 等. 特/超高压直流输电系统单极运行下变压器中性点直流电流分布规律仿真分析[J]. 高电压技术 2015, 41(3): 787-793.
- [32] 陈先禄, 刘渝根, 黄勇. 接地 [M]. 重庆: 重庆大学出版社 2002.
- [33] 潘卓洪, 张露, 谭波, 等. 高压直流输电入地电流在交流电网分布的仿真分析[J]. 电力系统自动化 2011, 35(21): 110-115.
- [34] 于永军, 杨琪, 侯志远, 等. 天中直流入地电流对新疆哈密地区交流电网的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2298-2303.
- [35] 阮玲, 文习山, 康钧, 等. 考虑深层大地电阻率的交流系统直流网络模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2888-2893.

作者简介:

李 瑾 (1991), 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。 (收稿日期: 2016-11-27)