

基于视电阻率数据的电网地磁感应电流计算方法

王泽忠¹, 司远¹, 刘连光², 张彩友³, 姚辉³, 陈水耀³

(1. 华北电力大学 高电压与电磁兼容北京重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

3. 国网浙江省电力有限公司检修分公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:快速准确地计算地磁感应电流是利用电网调度预防地磁扰动(GMD)灾害的基础。基于大地电性结构模型利用有限元计算GMD地电场的方法,具有工作量大、耗时长、耗资源的缺点,不能满足调度防灾的需求。提出对输电线路进行微元化处理,利用变异函数和滑动加权平均进行视电阻率估计,结合地磁台地磁场实测数据直接计算微元GMD地电场。仿真实验结果表明,与建立大范围大地电导率模型并采用有限元计算的方法相比,利用视电阻率计算GMD地电场的方法省略了复杂的大地建模过程,提高了计算精度,缩短了运算时间,可为电网调度防治GMD灾害提供基础算法。

关键词:视电阻率;GMD;地电场;变异函数;地磁感应电流

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101019

0 引言

电网地磁扰动(GMD)灾害防治有设备防治、调度防治2种方法。设备防治方法受限于资金投入,无法大量使用^[1];调度防治方法需利用电网运行调度及时补偿地磁感应电流(GIC)引起的无功损耗^[2],因此研究计算精度高、速度快的GIC计算方法成为关键。

GMD地电场是计算GIC的关键,传统的计算GMD地电场的方法首先需建立大地电导率模型,均匀^[3]、水平分层^[4]及分层分区大地电导率模型^[5]都是基于土壤电导率数据,在建模过程中都会遇到实测电导率数据不足的问题,因此需要一种既考虑地质变量的随机性又考虑其自相关性的散乱点插值方法。P. A. Fernberg在研究地磁暴扰动下管地电位分布时未将重点放在建立大地电导率模型上,而是从具体的测点入手,提出基于各测点的视电阻率数据研究发生地磁暴时管道中感应电流的思路^[6],整个过程省略了建立大地电导率模型的复杂过程。但对于计算GMD地电场所需地磁场数据,只是使用了其假设值,而未使用地磁场的实测数据,所以该方法能否用于电网GIC的计算仍是需要研究的问题。

关于GMD地电场的计算方法,平面波法^[7]、分区平面波法^[8]认为整个研究区域或某块区域的GMD地电场是相同的,没有充分考虑GMD地电场的实际分布情况。有限元法^[9]的基础是准确的分层分区三维大地电导率模型。大地模型中存在尺度较小的突变区域,而有限元计算采用自适应网格划分,要求网

格尺寸小于模型中最小的单元,使网格数量增加,所需存储空间大,计算成本过高。此外,由电网GIC计算中等效直流电压源的计算方法^[10-11]可知:关于地磁暴对电网的影响,真正需要关心的是有输电线路区域的感应地电场,即准确计算变压器接地点的电位才是关键。而使用有限元法研究地电场时需要对整个区域进行计算,不能做到针对性地计算指定区域的感应电场。

本文借鉴P. A. Fernberg等人的研究成果,对广东500 kV输电线路进行微元化处理,将微元中点作为待估点,将实测视电阻率作为基础数据,将地质统计学中的空间-频率变异函数^[12]引入视电阻率估算,并结合2004年11月9日地磁暴广东肇庆地磁台监测到的GMD数据直接计算微元GMD地电场,省略了复杂的大地建模过程,利用微元地电场和输电线路方向矢量做内积运算得到等效电压源,进而计算电网的GIC,以期能为运行调度防治地磁暴灾害提供基础算法。

1 空间-频率变异函数

视电阻率并不是指某岩层真实的电阻率,而是电场分量和磁场分量的比值,在大地电磁测深MT(MagnetoTelluric sounding)中能够反映地下电性结构^[9]。利用变异函数对未知点的视电阻率进行估计,由于视电阻率与测量位置和场源频率有关,故将空间变异函数拓展为空间-频率变异函数。

1.1 假设条件

当区域化变量 $Z(x_i, f_i)$ 满足以下2个条件时为二阶平稳^[12]。

(1)在研究区域内, $Z(x_i, f_i)$ 的数学期望存在,且为常数,即:

收稿日期:2020-06-22;修回日期:2020-11-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0800100)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFC0800100)

$$E[Z(x_i, f_i)] = m \quad (1)$$

其中, m 为常数; $E[\cdot]$ 为数学期望; x_i 为某一点的空间位置; f_i 为某一点的频率。

(2) $Z(x_i, f_i)$ 的协方差函数存在且相同, 不依赖空间绝对位置, 而依赖相对位置(只依赖滞后距 h_s 、 h_ω , 而与 x_i 、 f_i 无关), 即:

$$\begin{aligned} C_{\text{cov}}\{Z(x_i, f_i), Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)\} &= C(h_s, h_\omega) = \\ &E[Z(x_i, f_i)Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)] - \\ &E[Z(x_i, f_i)]E[Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)] = \\ &E[Z(x_i, f_i)Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)] - m^2 \quad (2) \end{aligned}$$

其中, $C_{\text{cov}}\{\cdot, \cdot\}$ 为协方差函数; h_s 为空间距离; h_ω 为频率间隔; $Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)$ 为与 $Z(x_i, f_i)$ 空间距离相距 h_s 、频率相距 h_ω 的实测点; $C(h_s, h_\omega)$ 为仅与空间滞后距离和频率间隔有关的协方差函数。

当 $Z(x_i, f_i)$ 的增量 $Z(x_i, f_i) - Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)$ 满足以下 2 个条件时, 称 $Z(x_i, f_i)$ 满足本征假设。

(1) $Z(x_i, f_i)$ 的增量的数学期望存在, 且为常数, 即:

$$E[Z(x_i, f_i) - Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)] = 0 \quad (3)$$

(2) 增量 $Z(x_i, f_i) - Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)$ 的方差函数(变异函数)存在且平稳, 即:

$$\begin{aligned} V_{\text{var}}(Z(x_i, f_i) - Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)) &= \\ &E[(Z(x_i, f_i) - Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega))^2] - \\ &E^2[Z(x_i, f_i) - Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega)] = \\ &E[(Z(x_i, f_i) - Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega))^2] = 2v(h_s, h_\omega) \quad (4) \end{aligned}$$

其中, $V_{\text{var}}(\cdot)$ 为方差函数; $v(h_s, h_\omega)$ 为空间-频率变异函数。

1.2 实验变异函数的估计

将视电阻率 $Z(x_i, f_i)$ 作为区域化变量, 其空间-频率变异函数定义为:

$$\begin{aligned} v(h_s, h_\omega) &= \frac{1}{2} V_{\text{var}}(Z(x, f) - Z(x + h_s, f + h_\omega)) = \\ &\frac{1}{2} E[(Z(x, f) - Z(x + h_s, f + h_\omega))^2] - \\ &\frac{1}{2} E^2[Z(x, f) - Z(x + h_s, f + h_\omega)] = \\ &\frac{1}{2} E[(Z(x, f) - Z(x + h_s, f + h_\omega))^2] \quad (5) \end{aligned}$$

其中, x 为视电阻率实测点的位置坐标; f 为视电阻率测量时的频率。

利用所有实测点的视电阻率计算空间-频率变异函数 $v(h_s, h_\omega)$ 的估计值 $v^*(h_s, h_\omega)$, 见式(6)。

$$v^*(h_s, h_\omega) = \frac{1}{2n(h_s, h_\omega)} \sum_{i=1}^{n(h_s, h_\omega)} (Z(x_i, f_i) - Z(x_i + h_s, f_i + h_\omega))^2 \quad (6)$$

其中, $n(h_s, h_\omega)$ 为实测点对数量。

1.3 变异函数理论模型

利用估计值分别绘制实验空间、频率变异函数

的散点图, 然后采用式(7)所示的球形变异函数拟合变异函数均值数据点, 得到理论变异函数曲线参数。

$$v(h_{s/\omega}) = \begin{cases} c_0 & h_{s/\omega} = 0 \\ c + c_0 \left[\frac{3}{2} \frac{h_{s/\omega}}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h_{s/\omega}}{a} \right)^3 \right] & 0 < h_{s/\omega} \leq a \\ c + c_0 & h_{s/\omega} > a \end{cases} \quad (7)$$

其中, c 为偏基台值; a 为变程; c_0 为块金值; $c + c_0$ 为基台值; $v(h_{s/\omega})$ 为空间/频率变异函数。

将变异函数拓展到空间-频率域, 常用的积和式空间-频率变异函数 $v(h_s, h_\omega)$ 如式(8)所示。

$$\begin{cases} v(h_s, h_\omega) = (k_1 C_\omega(0) + k_2) v(h_s) + \\ \quad (k_1 C_s(0) + k_2) v(h_\omega) - k_1 v(h_s) v(h_\omega) \\ k_1 = \frac{C_s(0) + C_\omega(0) - C_{s\omega}(0, 0)}{C_s(0) C_\omega(0)} \\ k_2 = \frac{C_{s\omega}(0, 0) - C_\omega(0)}{C_s(0)}, \quad k_3 = \frac{C_{s\omega}(0, 0) - C_s(0)}{C_\omega(0)} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $C_{s\omega}(0, 0)$ 、 $C_s(0)$ 、 $C_\omega(0)$ 为 3 种变异函数的基台值; $k_1 - k_3$ 为系数。

2 基于变异函数的视电阻率估计算法

根据线路两端变电站的经纬度坐标, 对线路进行微元化处理, 将线路平均分为多个线段, 得到每个微元中点的地理坐标, 将其作为视电阻率的待估点。地理属性既具有空间相关性, 又具有随机性。根据地理学第一定律及地质统计学中的 Kriging 法, 利用所有已知点的数据加权估计微元中点的视电阻率, 其中权重系数需满足无偏性、估计误差最小的要求。

2.1 无偏性

设某一视电阻率实测点 $x_i (i=1, 2, \dots, n, n$ 为实测点数量) 在某一频率 f_i 下的值为 $Z_i(x_i, f_i)$, 则待估点的视电阻率 $Z_0(x, f)$ 的预测结果 $Z_0^*(x, f)$ 定义为已知实测点视电阻率 $Z_i(x_i, f_i)$ 的加权和, 如式(9)所示。

$$Z_0^*(x, f) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i(x_i, f_i) \quad (9)$$

其中, λ_i 为待定权重系数。

根据无偏估计条件 $E[Z_0^*(x, f) - Z_0(x, f)] = 0$, 代入式(9)可得:

$$E[Z_0^*(x, f) - Z_0(x, f)] =$$

$$E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i(x_i, f_i) - Z_0(x, f)\right] = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right) m - m = 0 \quad (10)$$

进而可得到:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (11)$$

2.2 估计误差最小

为了使视电阻率估计误差最小, 对估计误差进行分析。

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= V_{\text{var}}(Z_0^*(x, f) - Z_0(x, f)) = \\ &V_{\text{var}}\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i(x, f_i) - Z_0(x, f)\right) = \\ &\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_{\text{cov}}\{Z_i(x, f_i), Z_j(x, f_j)\} - \\ &2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{\text{cov}}\{Z_i(x, f_i), Z_0(x, f)\} + \\ &C_{\text{cov}}\{Z_0(x, f), Z_0(x, f)\} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, σ 为标准差。

利用 Lagrange 乘数法进一步整理式(12)可得式(13),具体推导过程见附录 A 式(A1)~(A9)。

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j v_{i,j}(h_s, h_w) + \mu = v_{i,0}(h_s, h_w) & i, j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中, $v_{i,j}(h_s, h_w) = v(Z_i, Z_j) = v(Z_i - Z_j)$ 。

求解式(13),得到一组加权系数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 将其代入式(9)估算待估点的视电阻率。

3 基于微元法的 GMD 地电场计算

根据每条线路两端变电站的经纬度坐标,对线路做微元化处理,得到每个微元中点的地理坐标,将这些点作为地电场的计算区域。将时域地磁场数据经快速傅里叶变换(FFT)得到频域数据,利用第 2 节的方法计算微元中点对应地理坐标的视电阻率。基于视电阻率 ρ 、波阻抗间的关系,根据式(14)计算微元中点 GMD 地电场的南北向分量 E_{xi} 、东西向分量 E_{yi} , 然后进行快速傅里叶逆变换(IFFT)即可得到每个线路微元中点的时域微元地电场分量。

$$\mathbf{E}_{xi} = \mathbf{H}_y \sqrt{\omega \mu_0 \rho_i}, \quad \mathbf{E}_{yi} = \mathbf{H}_x \sqrt{\omega \mu_0 \rho_i} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{H}_y, \mathbf{H}_x$ 分别为地磁场东西、南北向分量; μ_0 为真空的磁导率; ρ_i 为微元 i 中点的视电阻率; ω 为角频率。

在电网 GIC 的模型中,电网受地磁暴影响产生 GIC 的原理相当于在不同的变电站间施加直流电压源^[13]。利用每条线路两端变电站的经纬度计算每条线路单位长度方向矢量,微元地电场 $\mathbf{E}_{xi}, \mathbf{E}_{yi}$ 与相应的线路方向矢量做内积并进行叠加得到等效电压源 V , 可将等效电压源的积分公式简化为式(15)。

$$V = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \langle \mathbf{E}_{xi}, \mathbf{l} \rangle s_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \langle \mathbf{E}_{yi}, \mathbf{l} \rangle s_i\right)^2} \quad (15)$$

其中, $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示矢量做内积运算; \mathbf{l} 为线路方向矢量; s_i 为微元 i 的长度。

具体计算流程如图 1 所示。

4 算例分析

本文采用地磁台地磁场测量数据计算 GMD 地电场,结合广东 500 kV 电网结构参数计算 GIC,同时

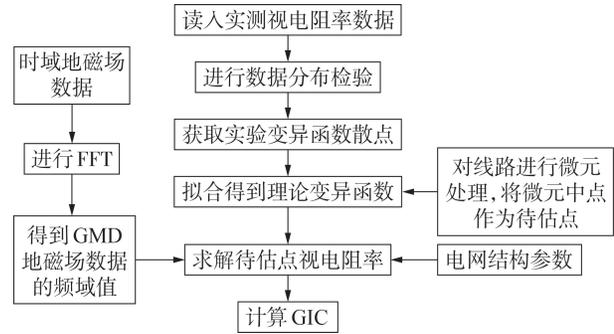


图 1 计算流程

Fig.1 Computation process

利用文献[5]中的方法建立大地电导率模型并利用有限元法进行计算,然后对比分析 2 种方法的计算结果。

4.1 基础数据

广东省地震局与国家地震局地质研究所在广东增城—深圳剖面的增城朱村、东莞谢岗、宝安龙岗、深圳大鹏等地开展了大地电磁测深研究,将频率在 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz 范围内的实测视电阻率作为原始数据。

视电阻率实测点有 14 个,每个实测点对应 20 个频点,由于个别实测点缺失频点数据,总的实测数据不少于 14×20 个。利用 ArcGIS 中的 Geostatistical Analyst 工具箱进行数据检验,并对数据进行对数变换,处理后的数据图形接近直线(见附录 B 图 B1),可见数据服从正态分布,即数学期望和方差都存在,满足二阶平稳假设。

本文算例采用肇庆地磁台在 2004 年 11 月 9 日监测到的 GMD 数据计算广东 500 kV 电网的 GIC。根据广东电网数据和资料,广东 500 kV 电网共有 54 座变电站和 62 条线路。各站点的经纬度和线路的具体参数参见文献[14],根据数据构建电网等效模型^[15]从而计算 GIC。

4.2 微元中点视电阻率计算

将每条线路分为 100 个微元,得到各微元中点的地理坐标。用变异函数计算各微元对应地理坐标的视电阻率,实验空间、频率变异函数散点图分别见图 2(a)、(b),利用式(7)球形理论变异函数拟合所得理论空间、频率变异函数曲线分别见图 2(c)、(d)。

根据实验变异函数散点拟合得到的球形理论空间变异函数、球形理论频率变异函数分别如式(16)和式(17)所示。

$$v(h_s) = \begin{cases} 0.52 & h_s = 0 \\ 0.52 + 3.58 \left[\frac{3}{2} \frac{h_s}{583} - \frac{1}{2} \left(\frac{h_s}{583} \right)^3 \right] & 0 < h_s \leq 583 \\ 4.1 & h_s > 583 \end{cases} \quad (16)$$

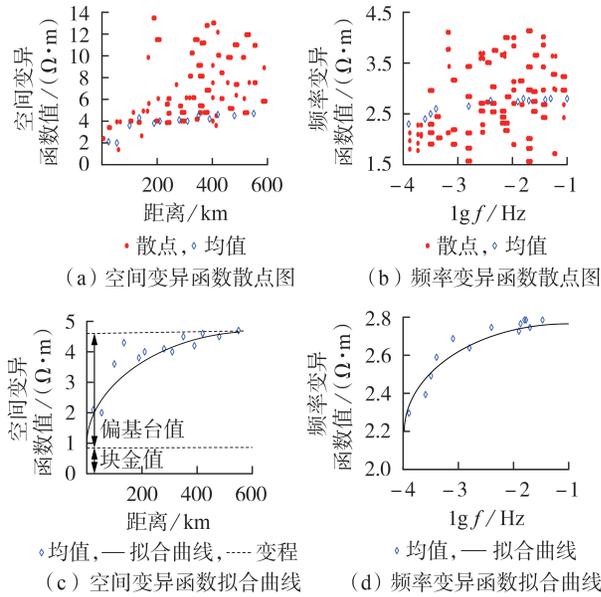


图2 空间、频率变异函数拟合结果

Fig.2 Fitting results of spatial and frequency variation functions

$$v(h_\omega) = \begin{cases} 2.01 & h_\omega = 0 \\ 2.01 + 0.72 \left[\frac{3}{2} \frac{h_\omega}{1.36} - \frac{1}{2} \left(\frac{h_\omega}{1.36} \right)^3 \right] & 0 < h_\omega \leq 1.36 \\ 2.73 & h_\omega > 1.36 \end{cases} \quad (17)$$

根据式(6)建立空间-频率变异函数的实验模型,结果如图3所示。

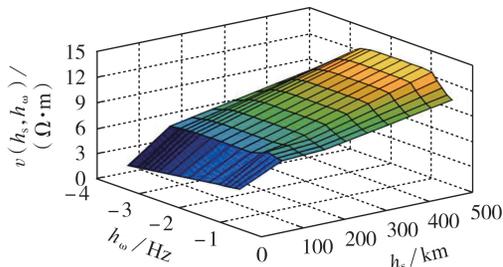


图3 空间-频率变异函数的实验模型

Fig.3 Experimental model of spatial-frequency variation function

拟合得到的空间变异函数基台值 $C_s(0) = 2.73$, 频率变异函数基台值 $C_\omega(0) = 4.1$, 实验空间-频率变异函数的基台值 $C_{\omega s}(0, 0) = 3.25$, 将其代入式(8)得到 $k_1 = 0.32$, $k_2 = -0.311$, $k_3 = 0.13$, 则理论空间-频率变异函数如式(18)所示。

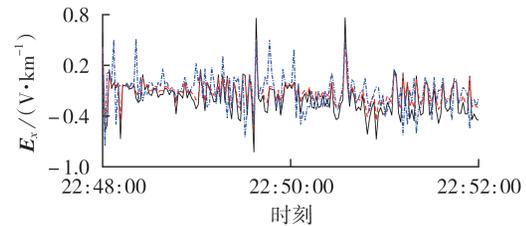
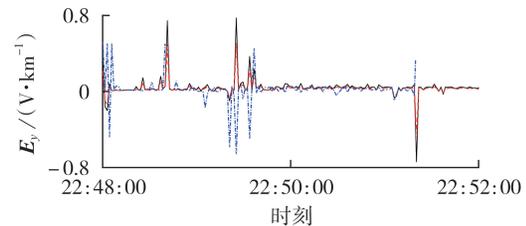
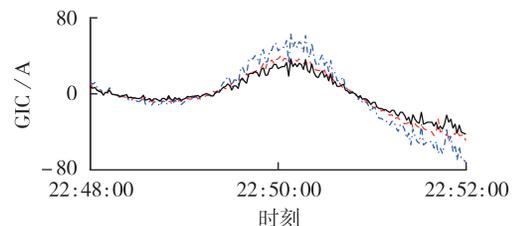
$$v(h_s, h_\omega) = 1.001 v(h_s) + 0.5626 v(h_\omega) - 0.32 v(h_s) v(h_\omega) \quad (18)$$

得到变异函数后,将微元中点作为预测点,计算权重系数,进而得到待估点的视电阻率。

4.3 微元GMD地电场计算

计算得到各微元中点的视电阻率后,将肇庆地磁台的地磁场时域数据进行FFT得到频域数据,结合式(14)计算得到各微元的GMD地电场,然后进行IFFT得到时域下微元的GMD地电场^[16]。广东地区2004年11月9日22:48:00时刻存在输电线路区域的GMD地电场见附录B图B2。图中每个矢量的方向代表微元GMD地电场的方向,长短表示微元GMD地电场的大小,可以看出各微元的GMD地电场是不同的,从而证明了在利用GMD地电场沿线路积分求等效直流电压源时,将某一区块或者某一层的GMD地电场认为是同一值是不符合实际情况的。

计算得到肇庆站在22:48:00—22:52:00时段内的GMD地电场分量 E_x 、 E_y , 结果分别见图4(a)、(b)。根据式(15)计算等效电压源,并结合广东地区的电网参数计算得到岭澳站的GIC,结果见图4(c)。

(a) 地电场分量 E_x (b) 地电场分量 E_y 

(c) GIC

— 测量值, - - - 本文算法计算值, ····· 有限元法计算值

图4 地电场分量和GIC的计算结果

Fig.4 Calculative results of geoelectric field components and GIC

4.4 对比分析

由于可查到肇庆地磁台的地电场监测数据、岭澳站的GIC监测数据,选择这2个站点进行2种算法的准确度比较。将计算所得肇庆站的300个GMD地电场数据、岭澳站的300个GIC数据与实测值进行对比分析,结果见表1(表中数据样本数量为300)。

表1 2种算法的计算结果与实测值对比

Table 1 Comparison between calculative results of two algorithms and measured values

变量	实测平均值	最大计算误差		最小计算误差		平均计算误差		计算结果均方差	
		有限元法	本文算法	有限元法	本文算法	有限元法	本文算法	有限元法	本文算法
$E_x / (\text{V} \cdot \text{km}^{-1})$	0.93	2.51	1.13	1.02	0.25	1.55	0.56	1.821	0.711
$E_y / (\text{V} \cdot \text{km}^{-1})$	0.78	2.40	0.90	0.50	0	1.85	0.20	2.068	0.634
GIC / A	3.56	2.86	0.86	0.98	0.11	2.32	0.53	2.150	0.380

由表1可知,本文所提算法的计算精度较高,但所提算法的计算结果与实测值之间仍然存在误差,主要是因为以下2点原因:①计算微元中点GMD地电场时均采用肇庆地磁台提供的地磁场数据,没有考虑地磁场的实际分布;②只是将每条线路分为100个微元,各微元过长。如果将线路分成更多的微元,并综合多个地磁台的地磁场测量数据,通过插值得到不同微元对应地理位置的地磁场数据,并将其应用到GMD地电场计算中可进一步提高计算精度。

在相同的计算机上完成2种算法用于对比其计算速度。当采用有限元法计算GMD地电场时,大地电导率模型的南北边界范围为600 km,东西边界范围为800 km,深度为300 km,网格总数约为 10^7 个,整个有限元法占用内存约为45 152 961 MByte,计算时间为9 385 s。此外,还需考虑在ANSYS中进行复杂的分层分区大地电导率建模过程所用时间和内存。相比于先建立分层分区大地电导率模型后采用有限元法计算GMD地电场的方法,本文算法省略了复杂的大地建模过程,同时使用空间-频率变异函数结合滑动加权平均法进行视电阻率散点插值,利用视电阻率与地磁场的关系代替复杂的有限元计算,不再以大地模型为导向,而是以输电线路所在位置为出发点,进行针对性的计算,仅需计算存在输电线路区域的GMD地电场,即只需要计算6 200个微元中点的地电场,同时考虑微元中点的视电阻率散点插值过程,共占用内存130 426 MByte,计算时间为1 082 s。可见,即使考虑了进一步提高计算精度而将线路分为更多的微元,但所分微元的数量相比于有限元的网格总数仍很少,所以基于视电阻率和微元法的GIC计算方法可节省计算时间和内存,适用于电网调度的实时计算。

5 结论

(1)本文首次将地质统计学中的变异函数引入GMD地电场计算中,从线路角度出发,将研究区域内实测视电阻率作为原始数据,利用变异函数求解线路微元中点对应的视电阻率。结合地磁台地磁场的测量数据计算每个微元的地电场,GIC和GMD地电场的计算结果与实际监测结果之间的拟合程度更高、更准确。

(2)使用地磁场实测数据和视电阻率实测数据,为计算GMD地电场提供了一种非常简单的方法,省

略了复杂的大范围大地电性结构建模的过程。此外,本文所提算法只需研究存在输电线路区域的GMD地电场就可以计算不同站点之间的等效直流电压源,提高了计算速度。

(3)各微元的地磁场数据使用的均为同一地磁台的地磁场测量数据,仍存在一定的误差。若能根据太阳风的参数、数据,结合全球三维磁层数值模型实时提供各微元的地磁场扰动数据,就可以用于进一步提高本文算法的精确度,有利于GIC事故高风险点GIC预测及运行调度的GIC事故在线分析。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王开让,刘连光,魏恺,等. 基于行星际太阳风信息和三维磁流体学模型预测电网GIC的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24):6341-6350.
WANG Kairang, LIU Lianguang, WEI Kai, et al. A GIC forecasting algorithm for power grid based on interplanetary solar wind information and three dimensional magnetohydrodynamics model[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24):6341-6350.
- [2] 徐旖旎,康小宁,赵冲,等. 基于GIC无功损耗严重度指标的电网地磁暴易损区识别方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11):211-216.
XU Yini, KANG Xiaoning, ZHAO Chong, et al. Identification method of power system geomagnetic storm vulnerable area based on GIC reactive power loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11):211-216.
- [3] 杨培宏,刘连光,刘春明,等. 基于粒子群优化算法的电网GIC-Q多目标优化策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3):93-99.
YANG Peihong, LIU Lianguang, LIU Chunming, et al. Multi-objective optimization strategy based on PSO algorithm for GIC-Q of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):93-99.
- [4] MARTI L, YIU C, REZAEI Z A, et al. Simulation of geomagnetically induced currents with piecewise layered-earth models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4):1886-1893.
- [5] 王泽忠,董博,刘春明,等. 华北地区大地电性结构三维建模及磁暴感应地电场有限元计算[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3):61-66.
WANG Zezhong, DONG Bo, LIU Chunming, et al. Three-dimensional earth conductivity structure modelling in North China and calculation of geoelectromagnetic fields during geomagnetic disturbances based on finite element method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3):61-66.
- [6] FERNBERG P A, SAMSON C, BOTELER D H, et al. Earth conductivity structures and their effects on geomagnetic induction in pipelines[J]. Annales Geophysicae, 2007, 25(1):207-218.

- [7] 刘春明,林晨翔,王璇,等. 大地电导率横向变化对地磁暴感应电场H极化及地磁感应电流的影响[J]. 电工技术学报,2016,31(24):113-119.
LIU Chunming, LIN Chenxiang, WANG Xuan, et al. Evaluating the influence of lateral change of conductivity on the "H polarization" of induced geoelectric field and geomagnetically induced currents[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24):113-119.
- [8] 董博,王泽忠,刘连光,等. 大地电导率横向突变处磁暴感应电场的邻近效应[J]. 地球物理学报,2015,58(1):238-246.
DONG Bo, WANG Zezhong, LIU Lianguang, et al. The proximity effect on the induced geoelectric field at the interface of different conductivity structures with lateral variations during geomagnetic storms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1):238-246.
- [9] 刘春明,王璇,刘连光,等. 考虑海岸效应影响的电网地磁感应电流的计算方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6059-6066.
LIU Chunming, WANG Xuan, LIU Lianguang, et al. Calculation method of geomagnetically induced currents in the power grid considering the influence of the coast effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22):6059-6066.
- [10] SUN R, BALCH C. Comparison between 1-D and 3-D geoelectric field methods to calculate geomagnetically induced currents: a case study[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6):2163-2172.
- [11] 郑宽,刘连光,David H. Boteler,等. 多电压等级电网的GIC-Benchmark建模方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):179-186.
ZHENG Kuan, LIU Lianguang, BOTELER D H, et al. Modeling geomagnetically induced currents in multiple voltage levels of a power system illustrated using the GIC-Benchmark case[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):179-186.
- [12] 杨明远,刘海砚,季晓林,等. 面向稀疏分布数据集的时空Kriging优化[J]. 地球信息科学学报,2018,20(4):505-514.
YANG Mingyuan, LIU Haiyan, JI Xiaolin, et al. An improved spatio-temporal Kriging algorithm to sparse scattered dataset [J]. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(4):505-514.
- [13] ZHENG K, TRICHTCHENKO L, PIRJOLA R, et al. Effects of geophysical parameters on GIC illustrated by benchmark network modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):1183-1191.
- [14] LIU C M, LIU L G, PIRJOLA R. Geomagnetically induced currents in the high-voltage power grid in China[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4):2368-2374.
- [15] 刘连光,王开让,魏恺,等. 基于地电场实测数据的广东电网地磁感应电流计算[J]. 电力建设,2015,36(12):102-107.
LIU Lianguang, WANG Kairang, WEI Kai, et al. GIC calculation of Guangdong Power Grid based on geoelectric field data [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12):102-107.
- [16] 郑涛,高小芊,杨国生. 地磁感应电流在三相电力变压器绕组中的流通路径分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):104-112.
ZHENG Tao, GAO Xiaoqian, YANG Guosheng. Analysis of GIC flow path in windings of three-phase power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):104-112.

作者简介:



王泽忠

王泽忠(1960—),男,北京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统电磁兼容(**E-mail**:wzz@ncepu.edu.cn);

司远(1993—),男,北京人,博士研究生,主要研究方向为电网安全运行(**E-mail**:1172201017@ncepu.edu.cn);

刘连光(1954—),男,吉林汪清人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电网安全运行(**E-mail**:llguang@ncepu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Calculation method of power grid GIC based on apparent resistivity data

WANG Zezhong¹, SI Yuan¹, LIU Lianguang², ZHANG Caiyou³, YAO Hui³, CHEN Shuiyao³

(1. Beijing Key Laboratory of High Voltage and EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. Maintenance Branch of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Rapid and accurate calculation of GIC (Geomagnetically Induced Current) is the basis of using power grid scheduling to prevent GMD (GeoMagnetic Disturbance) disaster. The geoelectric structure model-based GMD geoelectric field calculation method using finite element has the disadvantages of extensive workload and time-consuming, which cannot meet the requirements of disaster prevention. The transmission line is treated with micro elements, the apparent resistivity is estimated by using variation function and sliding weighted average method, and the GMD geoelectric field of micro element is calculated directly by combining the measured data of geomagnetic field at geomagnetic platform. Simulative results show that, compared with the method based on the establishment of large-range earth electrical conductivity model and finite element calculation, the proposed method can omit the complex modeling process of earth, improve the calculation accuracy, shorten the calculation time, and provide a basic algorithm for power grid dispatching to prevent GMD disasters.

Key words: apparent resistivity; GMD; geoelectric field; variation function; geomagnetically induced current

附录 A

为了使视电阻率的预测误差最小，对估计误差进行如下分析。

在无偏性条件下，为了使估计误差最小，使用 Lagrange 乘数法进行求解，令 $J = \sigma^2 - 2\mu \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right)$ ， μ 为

Lagrange 函数因子。

进一步推导可得线性方程组：

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial \lambda_i} = 2 \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{\text{cov}}(Z_i(x_i, f_i), Z_j(x_j, f_j)) - 2C_{\text{cov}}(Z_i(x_i, f_i), Z_0(x, f)) - 2\mu = 0 & i=1, 2, \dots, n \\ \frac{\partial J}{\partial \mu} = -2 \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) = 0 \end{cases} \quad (\text{A1})$$

整理可得：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C_{\text{cov}}(Z_i(x_i, f_i), Z_j(x_j, f_j)) - \mu = C_{\text{cov}}(Z_i(x_i, f_i), Z_0(x, f)) & i=1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (\text{A2})$$

进一步推导协方差函数和变异函数之间的关系：

$$2v(h_s, h_w) = E^2[Z(x, f) - Z(x+h, f+h_w)] = E[Z^2(x, f)] + E^2[Z(x+h, f+h_w)] - 2E[Z(x, f)Z(x+h, f+h_w)] = 2E[Z^2(x, f)] - 2E[Z(x, f)Z(x+h, f+h_w)] \quad (\text{A3})$$

当 $h_s = 0$ 、 $h_w = 0$ 时， $\forall x$ ，由式(2)可得：

$$C(0, 0) = C_{\text{cov}}[Z(x, f), Z(x, f)] = V_{\text{var}}[Z(x, f)] = E[Z^2(x, f)] - E^2[Z(x, f)] = E[Z^2(x, f)] - m^2 \quad (\text{A4})$$

则有：

$$E[Z(x, f)]^2 = C(0, 0) + m^2 \quad (\text{A5})$$

进一步整理式(2)得：

$$E[Z(x, f)Z(x+h_s, f+h_w)] = C(h_s, h_w) + m^2 \quad (\text{A6})$$

将式(A5)、(A6)代入式(A3)中，得：

$$2v(h_s, h_w) = 2[C(0, 0) + m^2] - 2[C(h_s, h_w) + m^2] = 2C(0, 0) - 2C(h_s, h_w) \quad (\text{A7})$$

由此得到变异函数和协方差的关系，将式(A7)代入式(A2)得：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i [C(0, 0) - v_{ij}(h_s, h_w)] - \mu = [C(0, 0) - v_{i0}(h_s, h_w)] \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (\text{A8})$$

进一步整理得：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i v_{i,j}(h_s, h_0) + \mu = v_{i,0}(h_s, h_0) & i, j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (A9)$$

其中， $v_{i,j} = v(Z_i, Z_j) = v(Z_i - Z_j)$ 。

附录 B

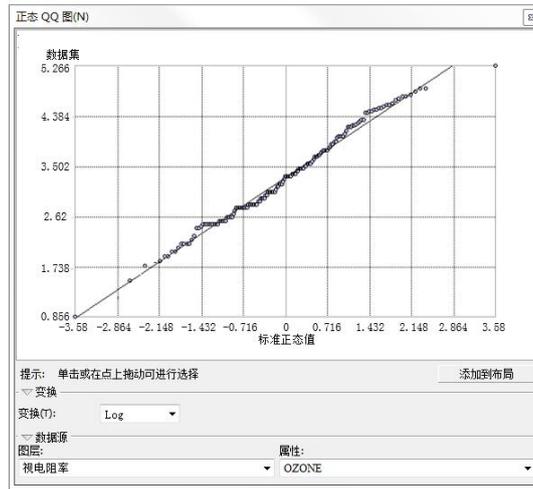


图 B1 地磁场实测值
Fig.B1 Geomagnetic field measured results

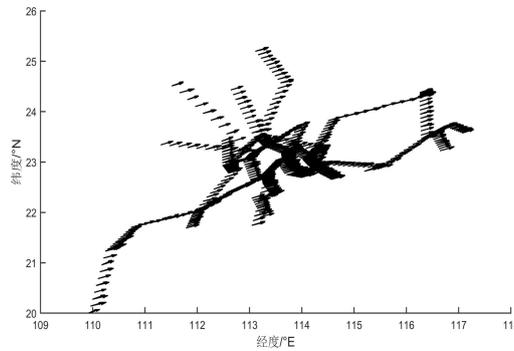


图 B2 线路微元点 GMD 地电场
Fig.B2 GMD geoelectric field of line micro points