

# 基于两点估计法的直流偏磁不确定因素建模

韩明明, 陈博, 朱文兵, 辜超, 伊锋  
(国网山东省电力公司电力科学研究院 济南 250002)

## Modeling of DC Bias with Uncertain Factors Based on two Point Estimation Method

Han Mingming Chen Bo Zhu Wenbing Gu Chao Xu Wei  
(State Grid Shandong Electric Power Research Institute Jinan 250002 China)

**ABSTRACT:** The distortion of ground potential caused by the DC earth electrode current in the converter station is affected by the uncertain factors such as earth resistivity, grounding resistance and operation mode of the power grid. Considering the limitation of the field-path analysis method in the analysis and calculation of the DC bias model which contains the uncertain factors, the two point estimation method is proposed in combination with the analytical calculation model of DC bias. The estimation of the uncertain parameters and the error analysis of the point estimation method is completed in this paper. The simulation of two point estimation method is carried out, and the potential of some substations is compared.

**KEY WORD:** DC bias; uncertain factors; two point estimation method; error analysis

**摘要:** 换流站直流接地极入地电流引起的地表电位畸变, 受大地电阻率、接地电阻、电网运行方式等不确定因素影响。考虑到场路分析方法在分析计算含不确定因素直流偏磁模型时的局限性, 结合直流偏磁解析计算模型, 提出了两点估计法, 对不确定参数进行估计, 完成了点估计法的误差分析。对两点估计法进行仿真验证, 选取部分变电站电位进行了方法比较, 给出了应用两点估计法的直流偏磁计算流程。

**关键词:** 直流偏磁; 不确定因素; 两点估计法; 误差分析

## 1 引言

直流输电系统在单极大地回路或双极不对称运行时, 直流电大多经接地极, 以大地作为回路, 将引起接地极附近直流地电位升高<sup>[1-3]</sup>。处于不同位置的交流接地设备, 在不等电位的作用下, 经过交流设备接地点、交流输电线路及大地形成直流回路, 直流电流会在变压器、电流互感器等交流设备内部产生直流磁通, 与交流磁通叠加会改变交流设

备铁芯磁密, 使励磁电流发生畸变, 增加交流系统的谐波分量, 降低变压器的有效电能输送容量, 甚至可能会让保护系统发生误动, 对电网安全稳定运行构成威胁<sup>[4,5]</sup>。现今仅山东省内就有三条高于±600kV的直流落地工程, 迫切需要简洁有效的直流偏磁计算模型对入地电流进行评估。直流偏磁问题定量模型已经比较清晰, 但这部分直流回路的电流幅值受交、直流输电参数, 大地土壤参数等因素影响, 采用不同的参数模型, 定值计算的直流偏磁会出现较大偏差, 影响直流偏磁抑制设备的正确选型。

目前, 国外专家对太阳磁暴引起的地磁感应电流进行了大量的建模计算, 将磁暴作为的干扰源看待, 采用电磁感应原理, 分析其电力系统与电力变压器, 尤其是对无功和电压降落的影响<sup>[6-8]</sup>。由于国外直流工程较少, 对直流线路单极运行或双极不平衡运行引起的直流偏磁问题研究较少。随着国内直流工程不断增加, 上述问题逐渐引起了更多国内专家的关注, 关注点主要集中在直流偏磁幅值计算、直流偏磁对交流设备的影响及直流偏磁抑制等方面。在直流偏磁幅值运算方面, 专家多采用等值复数镜像法、有限元法、电磁波的折射、反射规律, CDEGS 软件等方式方法来进行直流偏磁作用下的接地极周边电位计算, 通过场路解耦的方式进行直流偏磁计算<sup>[9,10]</sup>。上述方法存在两方面的问题, 其一是场模型的搭建工作繁重, 计算周期长, 且参数不易修正; 其二是影响直流偏磁幅值的大地内部结构复杂, 难以测的真实的大地电阻率。

针对上述两个问题, 本文在已知电位与相关参数经典函数的基础上, 充分考虑线路参数、接地电阻、大地电阻率等的不确定性因素, 采用两点估计法, 根据随机因素或随机扰动的概率分布求取待求

随机变量各阶矩的概率统计,对函数关系式进行泰勒展开,完成了对两点估计法的截断误差分析及模型验证。

## 2 直流偏磁计算模型

### 2.1 地表电位与相关参数函数关系

据大地构造学所给出的模型,大地可分为地壳、地幔、地核三层,地壳层由地表土壤层、原始岩层组成。受外界因素影响,地表土壤电阻率会随不同季节的温度、湿度变化而变化。目前,大地电阻率的测量方法通常有四极法和大地电磁测深法(MagnetoTelluric, MT),可以测量到深入地幔层的电阻率。由于土壤存在不均匀性,无论是四极法还 MT 法,测出的数据都不能完全真实的反映土壤电阻率的实际情况。因本文后会采用估计法对土壤电阻率进行修正,故在此采用图 1 给出的土壤模型为初始值,进行地表电位与接地极距离、地表电阻率、岩层电阻率的关系计算。

在多层水平土壤的分层模型下,将直流电极的入地电流分为地表回流与地底回流两部分,其中地表回流比例大约为 40%。假定地表回流部分在垂直面上均匀分布,且地表电流锥形扩散。

对于点电流源在第  $m$  层、场点在第  $i$  层的格林函数的表达式为

$$\phi_i^m(r, z) = \frac{\rho_i I}{4\pi} \left[ \frac{\delta(m-i)}{\sqrt{r^2 + (z-z_0)^2}} + \sum_{i=1}^p \frac{a_i}{\sqrt{r^2 + (z-z_0-b_i)^2}} + \sum_{i=1}^q \frac{g_i}{\sqrt{r^2 + (z-z_0-d_i)^2}} \right] \quad (1)$$

式中,  $\rho_i$  为第  $i$  层的土壤电阻率,  $z_0$  所在场源的深度,  $z$  为垂直位置,  $r$  为距离场源的半径水平投射距离,  $a_i, b_i, g_i, d_i$  均为镜像系数,  $p, q$  为镜像层数,  $\delta$  为狄利克雷函数。

通过式 1 可以看出,电位与  $r, z$  呈倒数关系,随着距离的增大,电位会迅速下降,当距离大到一定程度,相邻两点的电位差越来越小。为了简化初始地表电位,本文选择镜像层为 3 层,边界条件取

当待测位置与场源之间的距离  $d$  趋向于无穷,  $l$  趋向于 0。当  $d=0, l=l_0$ , 可得到地表电位的计算式为

$$U(d) = I_0 j \frac{\rho_1}{4S_1} H_0(j\beta d) \quad (2)$$

式中:  $V$  为地表电位,  $S_1$  为土壤层的厚度,  $H_0(j\beta d)$  为第三类零阶贝塞尔函数。

### 2.2 交流输电设备的直流偏磁模型

交流电网中的直流分布计算,除了要考虑换流站接地极注入大地后在地表感应出的电位之外,还要考虑不同变电站接地点电位差在变压器绕组和输电线路构成的交流电网中形成的直流。

在特、超高压变电站中,多选用自耦变压器,考虑到高压侧与中压侧回路不同,直流作用下的等效直阻  $R_T$  按其端部接线计算。线路直流  $R_L$  采用单位长度的电阻典型值与长度的乘积进行表示,接地电阻  $R_G$  采用直流接地网阻值。

直流输电系统入地电流进入交流变压器中性点的电流  $I_{BA}$  可以表示为<sup>[3]</sup>

$$I_{BA} = \frac{U_B - U_A}{R_{GB} + R_{GA} + \frac{R_{TB} + R_{TA} + R_{LAB}}{3}} \quad (3)$$

$$U_B - U_A = I_{BA0} \times M_{AB}$$

式中:  $R_{GB}, R_{GA}$  为分别为变电站 B、A 的接地电阻,  $R_{TB}, R_{TA}$  为变电站 B、A 中接地变压器的直阻,  $R_{LAB}$  为变电站 B、A 的线路电阻,上述参数为可测值。  $I_{BA0}$  与  $M_{AB}$  分别为变电站 A、B 之间地中电流与互阻,一般需要通过算式进行粗略计算,两变电站之间的电位差由  $M_{AB}$  与  $I_{BA0}$  共同确定。

## 3 点估计法的直流参数估计

### 3.1 参数估计

在直流偏磁计算过程中,无论采用何种计算模型,由于不确定因素(场站接地电阻值、土壤分层结构及电阻率)存在,使得仿真计算的系统参数难以测量。此外,高压直流输电一般为长距离输电,数千公里的沿途地表结构变化较大,也会对仿真结果产生影响。

为了降低不确定因素对直流偏磁计算的影响,文中采用点估计法,根据不确定因素的概率分布求取待求随机变量各阶矩的概率统计,假定  $\mathbf{x}=[X_1, X_2, \dots, X_n]$  为随机因素,假定各随机因素相互独立,

$\mathbf{Y}=[Y_1, Y_2, \dots, Y_m]$ 为待求量, 可以通过函数关系式将  $\mathbf{Y}$  表示为  $f(\mathbf{X})$ 。对  $f(\mathbf{X})$  进行泰勒级数展开, 用  $\mathbf{X}_k$  的各阶矩构成的  $r$  个估计点, 对于具有  $n$  个不确定因素的系统, 点估计法仅需要确定  $r \times n$  次确定性计算即可获得待求随机变量  $\mathbf{Y}$  的前  $2r-1$  阶矩。 $\mathbf{X}_k$  的估计点  $x_{k,j}$  由以下公式确定

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^r r_{k,j} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^r r_{k,j} = \frac{1}{n} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^r r_{k,j} (\xi_{k,j})^l = \lambda_{k,l} \quad (6)$$

$$x_{k,j} = \mu_k + \xi_{k,j} \sigma_k \quad (k=1, 2, \dots, n; j=1, \dots, r) \quad (7)$$

式中,  $\xi_{k,j}$  为待定系数;  $r_{k,j}$  为权重系数;  $\mu_k$ 、 $\sigma_k$  分别为随机变量  $X_k$  的期望值和标准差;  $\lambda_{k,l}$  为随机变量  $X_k$  的第  $l$  阶标准中心矩; 即第  $l$  阶中心矩, 即第  $l$  阶中心矩  $M_{k,l}$  与标准差  $\sigma_k$  的  $l$  次方的比值

$$\lambda_{k,l} = M_{k,l} / (\sigma_k)^l \quad (8)$$

其中

$$M_{k,l} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_k)^l h(x) dx \quad (9)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_k)^2 h(x) dx} \quad (10)$$

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x h(x) dx \quad (11)$$

式中,  $h(x)$  为随机变量  $X_k$  的概率密度函数。

在本文中采用两点估计法, 即取值定为不确定值均值两侧的各一个点, 在计算过程中, 要确定  $x_{k,1}$  或者  $x_{k,2}$ , 其他不确定元素取其均值。系统中有  $n$  个不确定元素, 需要进行  $2n$  次确定性计算, 待求量为随机变量  $\mathbf{Y}$  的前 3 阶矩。根据式 (9) 可以得出  $\lambda_{k,1}=0$ 、 $\lambda_{k,2}=1$ , 联立代入式 (4)、(5) 可以得出两点估计法的权重系数  $r_{k,j}$  如下:

$$r_{k,j} = \frac{(-1)^{3-j} \xi_{k,3-j}}{n(\xi_{k,2} - \xi_{k,1})} \quad (12)$$

$$\xi_{k,j} = \frac{\lambda_{k,3} + (-1)^{3-j} \sqrt{4n + \lambda_{k,3}^2}}{2} \quad (13)$$

当待求系数  $\xi_{k,j}$  和权重系数  $r_{k,j}$  确定后, 随机变量  $\mathbf{Y}$  的  $l$  阶原点矩的计算公式为

$$E(Y_k^l) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^r r_{k,j} [f(\mu_1, \dots, x_{k,j}, \dots, \mu_n)^l] \quad (14)$$

$$(l=1, \dots, 2r-1)$$

### 3.2 误差分析

采用两点估计法计算得到的待求量  $\mathbf{Y}$ , 与实际值之间存在截断误差, 文中为了简单起见, 仅考虑单个随机变量  $x_1$ 。通过式 7 可以得到, 两点估计法的估计点可以写为:

$$x_{1,i} = \mu_1 + \xi_{1,i} \sigma_1, (i=1, 2) \quad (15)$$

将非线性函数  $f(x_1)$ , 在  $\mu_1$  处泰勒级数展开

$$f(x_1) = f(\mu_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} f^{(k)}(\mu_1) (x_1 - \mu_1)^k \quad (16)$$

式中,  $f^{(k)}(\mu_1)$  为  $f(x)$  的  $k$  阶倒数在  $\mu_1$  处的值。

随机变量  $x_1$  的  $j$  阶中心矩  $M_{1,j}$  可通过式 (9) 得到, 随机变量函数  $f(x_1)$  的一阶原点矩  $m_1$  可以写为

$$m_1 = E[f(x_1)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1) h(x_1) dx_1$$

$$= f(\mu_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} f^{(k)}(\mu_1) M_{1,k} \quad (17)$$

$$= f(\mu_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} f^{(k)}(\mu_1) \lambda_{1,k} \sigma_1^k$$

通过式 (8) 可以得到  $x_1$  的  $j$  阶标准中心矩  $\lambda_{1,j}$  为

$$\lambda_{1,j} = \frac{M_{1,j}}{\sigma_1^j} = \frac{E[(x_1 - \mu_1)^j]}{\sigma_1^j} \quad (18)$$

通过式 (4~6) 可以得出

$$\begin{cases} r_{1,1} + r_{1,2} = 1 \\ r_{1,1}\xi_{1,1}^j + r_{1,2}\xi_{1,2}^j = \lambda_{1,j}, (j=1,2,3) \end{cases} \quad (19)$$

将式 (16) 分别乘以权重系数  $r_{1,i}(i=1,2,3)$  后, 与式 (18~19) 联立, 代入式 (17) 可以得到  $f(x_1)$  的一阶原点矩为

$$m_1 = r_{1,1}f(x_{1,1}) + r_{1,2}f(x_{1,2}) + \sum_{k=4}^{\infty} \frac{1}{k!} f^{(k)}(\mu_1) [\lambda_{1,k} - (r_{1,1}\xi_{1,1}^k + r_{1,2}\xi_{1,2}^k)] \sigma_1^k \quad (20)$$

通过比较式 (14) 与式 (20) 可以发现,  $f(x)$  的泰勒级数展开的 4 阶及以上函数项, 是两点估计法产生截断误差的原因。

#### 4 参数验证

本文以山东省 ±800kV 直流工程受端接地极单极运行对周边交流变电站的影响为例, 因换流站附近不同电压等级的线路较多, 为了能够更好的对上述方法进行验证, 文中从换流站接地极四个方向附近的各选取了两条不同电压等级交流线路的变电站, 进行两点估计法与 ANSYS 模型计算对比分析。

采用多种大地电磁反演方法对观测的大地电磁阵列数据整理, 得到了不同地区电阻率数据作为初始值, 如图 1 所示。

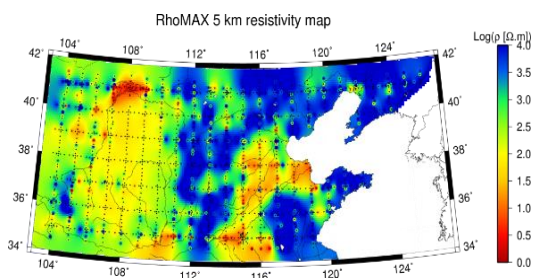


图 1 大地电阻率分布图

图 1 给出了接地极为中心的 20 万平方公里范围的大地电阻率模型, 可以看出在 5km 深处, 山东境内大地电阻率不是理想的水平均匀分布, 其中西南部高山地区及东部岩石区电阻率偏高, 可达上万欧米。图中白色区域为海水, 其电阻率远陆地小于陆地。线路参数、变压器参数、接地电阻的初值采用典型值。

采用上述电阻率数据, 以接地极为中心, 运用有限元分析软件 ANSYS, 以接地极为中心构造东西长为 410km, 南北长为 495 km, 深入地下 310 km

的长方体模型, 构造由不同颜色代表不同的电阻率的模型, 如图 2 所示。

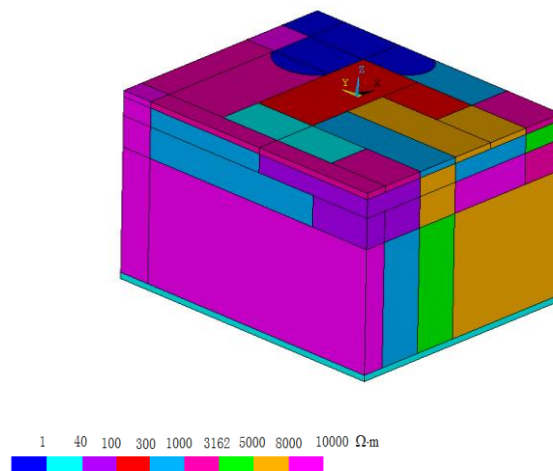


图 2 接地极周边电阻率 Ansys 模型

通过 Ansys 仿真, 可以得到接地极周边的电位分布如图 3 所示。

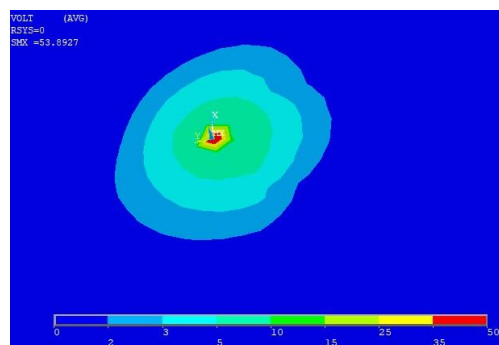


图 3 接地极周边电位分布

通过图 3 可以看出, 接地极处电位峰值为 55V, 在接地极附近电场下降速度高于周边, 在离接地极 180km 之外, 电位基本下降到零。将两点估计法、Ansys 计算得到接地极附近的电位与测量值相比较, 得到不同变电站的直流偏磁如表 1 所示

表 1 不同方法直流偏磁电流数据对比

变电站名称	电位 $\varphi$ : V	
	两点估计法	Ansys 仿真
莱芜电厂	1.29	1.23
济南水屯变电站	2.29	2.17
滨州明集站	4.23	3.97
淄博郑家站	1.27	1.32
潍坊羊口电厂	0.54	0.51

通过表 1 可以看出, 两点估计法得到的数值与通过 Ansys 仿真误差小于 10%, 考虑到直流偏磁影

响因素众多,此误差在计算中可以在模型修正的过程中进行抵消,说明了两点估计法的有效性,可以用于直流偏磁的仿真计算。基于点估计法的直流偏磁计算流程如图4所示。

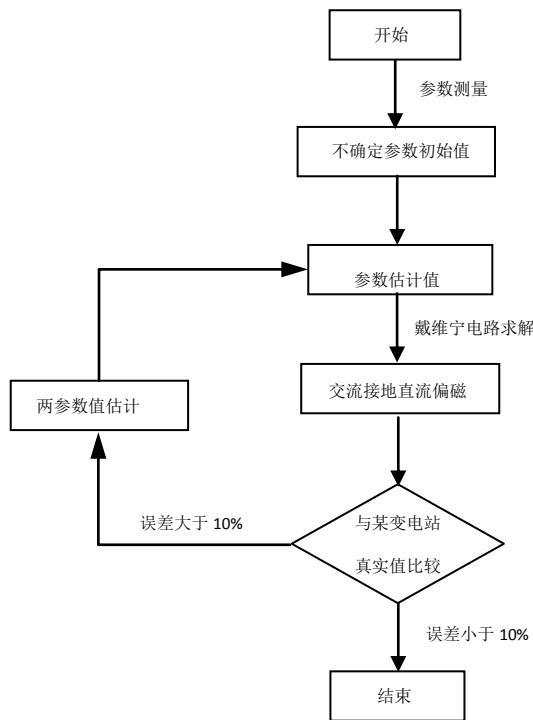


图4 直流偏磁计算流程

通过图4给出的计算流程,得到两点估计法与真实值之间的误差,对两点估计法的初始参数值进一步校正,对直流偏磁随各个不确定参数的变化进行估计。

## 5 结论

本文提出了通过两点估计法研究了大地电阻率、接地电阻等不确定因素变化对直流偏磁的影响,得到以下结论:

(1) 为了降低不确定因素对直流偏磁计算的影响,采用点估计法,对函数关系式进行泰勒展开,泰勒级数展开的高阶函数项,是两点估计法产生截断误差的原因。

(2) 两点估计法得到的数值与通过 Ansys 仿真误差小于 10%,说明了两点估计法的有效性,可以用于直流偏磁的仿真计算。

## 参 考 文 献

[1] 邹国平,姚晖,何文林,等.溪洛渡—浙西±800 kV 特高压直流输电工程受端电网直流偏磁治理[J].高电压技

术,2016,42(2):543-550.

Zou Guoping, Yao Hui, He Wenlin, et al. DC Bias Suppression of Receiving-end Power Grid in ±800 kV Xiluodu-Zhexi UHVDC Project [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2):543-550.

[2] 徐碧川,鲁海亮,潘卓洪,等.直流接地极址勘测的研究[J].电力自动化设备,2016,36(1):149-154.

Xu Bichuan, Lu Hailiang, Pan Zhuohong, et al. Research of DC ground electrode site survey [J]. Electric Power Automation Equipment 2016,36(1):149-154.

[3] 周运鸿,李强,叶红枫,等.N层土壤模型下HVDC系统大地回路运行时ESP分布研究[J].电测与仪表,2017,54(10):1-6.

Zhou Yunhong, Li Qiang, Ye Hongfeng, et al. ESP distribution analysis in HVDC system with the operation of ground return in N-layer soil model [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(10): 1-6.

[4] 杨晓辉,王丰华,段若晨,等.500 kV 电力变压器直流偏磁耐受性能的仿真研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(14):60-66.

YANG Xiao-hui, WANG Feng-hua, DUAN Ruo-chen, et al. Simulation study of DC bias enduring ability of 500 kV power transformer [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 60-66.

[5] 全江涛,童歆,文习山,等.复杂运行工况下变压器直流偏磁的抑制[J].高电压技术,2015,41(7):2464-2472.

QUAN Jiangtao, TONG Xin, WEN Xishan, et al. Mitigation of Transformer DC Bias in Complicated Operation Conditions [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2464-2472.

[6] 黄义隆,张波,国建宝,等.改善直流电流地中分布的接地极互联技术研究[J].电网技术,2017,41(4):1338-1344.

HUANG Yilong, ZHANG Bo, GUO Jianbao, et al. Research on Improving DC Current Distribution in Earth by Interconnecting DC Grounding Electrodes [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1338-1344.

[7] 陈志伟,白保东,陈德志,等.电力变压器直流偏磁现象形成机理及一种抑制措施的研究[J].电工技术学报,2015,30(14):208-214.

Chen Zhiwei, Bai Baodong, Chen Dezhi, et al. Research on the Formation Mechanism and Suppression Method of Transformer DC Bias [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 208-214.

[8] 刘连光,闫旭东,马成廉换流变压器编组和受端电网结构对其直流偏磁的影响研究[J].电网技术,2016,40(1):323-327.

Research of Converter Transformer Marshalling and Receiving-End Grid Structure's Effect on Converter Transformer DC Bias [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 323-327.

[9] 王泽忠,谭瑞娟,李书连,等.基于动态电感-励磁电流曲线的特高压变压器空载直流偏磁计算[J].电工技术学报,2017,32(10):154-161.

Wang Zezhong, Tan Ruijuan, Li Shulian, et al. DC-Bias Calculation for UHV Transformer in No-Load Based on the Curve of the Relationship between Dynamic Inductance and Exciting Current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 154-161.

[10] 刘鹏,郭倩雯,杨铭,等.抗直流偏磁的变压器中性点接



地方式探讨[J]. 高电压技术,2015, 41(3): 794-799.

LIU Peng, GUO Qianwen, YANG Ming, et al. Discussion About Neutral Point Connection Mode of Transformer to Inhibit DC Bias [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 794-799.

收稿日期:

作者简介:

韩明明 (1984 年-), 男, 济南, 博士研究生, 工程师, 变电站接地仿真与影响因素分析