

# 基于双曲线截断混沌多项式展开的地磁感应电流敏感度分析<sup>\*</sup>

刘 青, 崔茜凯, 马龙雄, 查虹丽, 周宁馨

(西安科技大学 电气与控制工程学院, 西安 710054)

**摘要:** 地磁感应电流(GIC)可能会引起变压器直流偏磁从而威胁电力设备和电网的安全。鉴于GIC计算所需的很多输入参数是不确定变量,全面评估电网GIC水平及对电网的威胁有必要研究GIC的不确定度及GIC对输入变量的敏感度。基于混沌多项式展开(PCE)提出了一种GIC的不确定度量化方法,利用双曲线截断技术进一步提高了计算效率,计算了GIC对输入参数的敏感度指标。以新疆750 kV规划电网为例,利用提出的方法对GIC进行了不确定度量化,得到了GIC的均值和标准差等统计量。根据混沌多项式系数计算了Sobol敏感度指标,得到了GIC对电场幅值和电网直流电阻等输入参数的敏感度。与蒙特卡罗法(MC)相比,此方法在保证精度的前提下大大提高了计算效率。

**关键词:** 地磁感应电流; 混沌多项式展开; 不确定度量化; 敏感性分析; 稀疏展开

**中图分类号:** TM727      **文献标志码:** A      **doi:**10.11884/HPLPB201931.190106

## Sensitivity analysis of geomagnetically induced current based on hyperbolic scheme for truncating polynomial chaos expansion

Liu Qing, Cui Xikai, Ma Longxiong, Zha Hongli, Zhou Ningxin

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology,  
Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Geomagnetically Induced Current (GIC) can cause DC bias of the transformer. The derivative effect of DC bias may threaten the safety of power equipment and power grid. In view of the fact that many input parameters are uncertain variables in GIC calculations, it is necessary to study the uncertainty of GIC and the sensitivity of GIC to input variables. In this paper, based on polynomial chaos expansion (PCE) and hyperbolic scheme for truncating the polynomial chaos expansion, a GIC uncertainty quantification method is proposed. Using the constructed polynomial chaos expansion, the sensitivity index of GIC to input parameters is derived. For the planned Xinjiang power grid, the proposed method is used to measure the uncertainty of GIC, and the statistics of mean and variance of GIC are obtained. The Sobol sensitivity index is calculated according to the chaotic polynomial coefficient, and the sensitivity of GIC to input parameters such as electric field amplitude and grid DC resistance is obtained. Compared with the Monte Carlo method (MC), this method is not only precise, but also greatly improves the computational efficiency.

**Key words:** geomagnetically induced current; polynomial chaos expansion; uncertainty analysis; sensitivity analysis; sparse expansion

**PACS:** 94.30.Lr; 91.25.Qi

太阳剧烈活动期间引起的地球磁场扰动(GMD)可能严重影响电力系统的安全运行。关于GMD对电网干扰的基本机制国内外已达到共识,即GMD引起地面感应电场在输电线路、中性点接地的变压器和大地构成的回路中产生准直流性质的地磁感应电流(GIC)。GIC会导致变压器铁芯半波饱和即直流偏磁,其次生效应会引起电网谐波电流增大、电压跌落、无功波动、保护装置误动作等一系列危害,严重时甚至造成电力系统崩溃<sup>[1-3]</sup>。

\* 收稿日期:2019-04-11; 修订日期:2019-06-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0800100)

作者简介:刘青(1978—),女,博士研究生,副教授,从事电力系统电磁暂态计算、电磁脉冲耦合计算方面的教学及科研工作;  
liuqing623nn@163.com。

历史上地磁暴侵害电网最严重的事件是 1989 年的加拿大魁北克电网大停电。此后,北美、北欧等高纬度国家针对电网 GIC 展开了大量研究,提出了地电场的多种算法<sup>[4-6]</sup>、电网 GIC 计算的 LP 法和节点导纳法<sup>[7]</sup>,提出了电网 GIC 计算的标准算例,并基于此算例分析了 GIC 的分布规律、影响因素及抑制措施等<sup>[8]</sup>。

超高压输电线路的单位长度电阻较小,电网的 GIC 水平将会更高。此外,超、特高压电网中变压器一般采用三个单相自耦变压器组的结构,对 GIC 的耐受能力更低<sup>[9]</sup>。因此,虽然我国处于中低纬度地区,但我国电网电压等级高,建设规模大,GIC 对电网的潜在威胁不容忽视<sup>[10]</sup>。近年来,电网的地磁暴灾害越来越引起人们的关注。我国在中低纬度电网的 GIC 研究方面取得了一定的成果<sup>[11-13]</sup>。

上述研究成果为中低纬度国家的地磁暴灾害评估奠定了较好的理论基础。基于这些方法进行 GIC 计算时所使用的输入参数均为确定值。实际上,电网分布广,获得电网覆盖区域精确的大地参数不容易,由此所计算的感应地电场方向和幅值也会受到影响。此外,输电线路和变压器绕组的直流电阻值会随着温度的变化而变化,变电站接地电阻也会受接地网腐蚀情况的影响。因此,研究输入参数变化引起的 GIC 的不确定度以及 GIC 对这些参数的敏感度对全面评估电网 GIC 水平更有参考价值。

本文提出一种基于多项式混沌展开(PCE)的地磁感应电流的不确定度量化方法。此方法将目标函数在一组正交多项式基底上进行投影,即用一组包含有不确定参数的正交多项式来逼近原函数。将电场幅值、电场方向、输电线路单位长度电阻、变压器等效直流电阻以及变电站接地电阻看成多维随机输入变量,对新疆 750 kV 规划电网进行了 GIC 的不确定度量化,引用方差分解的 Sobol 敏感度指标计算了变电站流入大地 GIC 对输入变量的敏感度。相对于蒙特卡罗方法,该方法计算效率高。

## 1 GIC 的混沌多项式展开

对电网 GIC 进行计算时有必要考虑电场幅值、电网参数等输入参数的不确定性。不确定性分析可以用蒙特卡罗方法进行,但随着变量维数和目标函数的复杂程度的提高,计算效率大大降低。

### 1.1 GIC 的混沌多项式展开式

基于 PCE 方法对 GIC 进行不确定度量化,关键在于构造 GIC 的混沌多项式展开式。根据 PCE 方法的定义<sup>[14-15]</sup>,将不确定输入参数用集合  $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$  来表示,则 GIC 的混沌多项式展开式为

$$I \approx \sum_{i=0}^P \alpha_i \psi_i(\xi) \quad (1)$$

式中: $\alpha_i (i=0,1,2,\dots)$  是混沌多项式的系数; $\psi_i(\xi)$  为多维正交多项式基底,由各维随机变量  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$  所对应的 1 维正交多项式基函数  $\varphi_k^i(\xi_k)$  的乘积确定,即

$$\psi_i(\xi) = \prod_{k=1}^n \varphi_k^i(\xi_k) \quad (2)$$

式(1)共有  $(P+1)$  项,即需要确定的多项式系数为  $(P+1)$  个。其中,  $P$  由变量个数  $n$  和展开式中多项式的最高阶数  $d$  共同决定,对于全阶展开法

$$P = \frac{(n+d)!}{n! d!} - 1 \quad (3)$$

可见,混沌多项式展开式的构造有两步主要工作:正交多项式基底以及对应系数的确定。当输入参数的分布类型已知时,多项式基底可以根据 Askey 方案得到,因此系数的精度直接关系到构建模型的精度。

### 1.2 多项式系数的确定

构建目标函数的 PC 展开式时,关键的问题是如何求解多项式的系数。为了提高计算效率,本文计算系数基于全因子数值积分法选取样本,且对比了 Galerkin 投影法和随机响应面法(SRSM)两种方法,算法主要思想如下:

#### (1) 投影法

基于正交多项式的性质,在式(1)两边同时乘以  $\psi_i(\xi)$ ,之后对等式两边同时求期望,则多项式系数为

$$\alpha_i = \frac{\langle I, \psi_i(\xi) \rangle}{\langle \psi_i(\xi), \psi_i(\xi) \rangle} \quad (i = 0, 1, \dots, P) \quad (4)$$

其中分母可以直接求出,分子则利用式(5)所表述的全因子数值积分法求解

$$\langle I(\xi), \psi_i(\xi) \rangle \approx \sum_{j=1}^N I(\xi_j) \psi_i(\xi_j) W_j \quad (5)$$

其中  $N = (d+1)^n$  个  $n$  维样本  $\xi_j = (j=1, 2, \dots, N)$ ;  $W_j$  为每个  $n$  维样本的权值<sup>[16]</sup>。

## (2) 随机响应面法

随机响应面法(RSM)的思想是,在标准随机空间选取  $N'$  个有效样本,将样本点从标准随机空间( $\xi$  空间)变换到原随机空间( $X$  空间);将变换后的样本代入目标函数,得到各样本点真实响应函数值  $I$ ;将上述样本代入目标函数的 PC 展开式中,得到基于 PCE 模型的函数响应;利用线性最小二次回归即可求取多项式系数。根据文献[17],用两倍于未知 PCE 系数个数的样本便可以得到比较满意的结果,即样本数  $N' = 2(P+1)$ 。

## 2 电网 GIC 的不确定度量化

本文将以新疆 750 kV 规划电网为例,进行 GIC 的不确定度量化和敏感度分析。电网的地理接线如图 1 所示。线路的长度及变电站地理位置信息见文献[13]。规划电网包括 37 个 750 kV 变电站,共 40 条线路。其中输电线路主要采用型号为 LGJ-400/50 的 6 分裂导线,变压器均为自耦变压器。在 GIC 计算过程中,由于将 GIC 等效为准直流,因此只考虑电网中各元器件的直流参数<sup>[18]</sup>。其中,线路单位长度电阻  $R_l$  的典型值为 0.012 05 Ω/km,变压器等效直流电阻  $R_x$  和变电站接地电阻  $R_d$  的典型值均为 0.3 Ω。

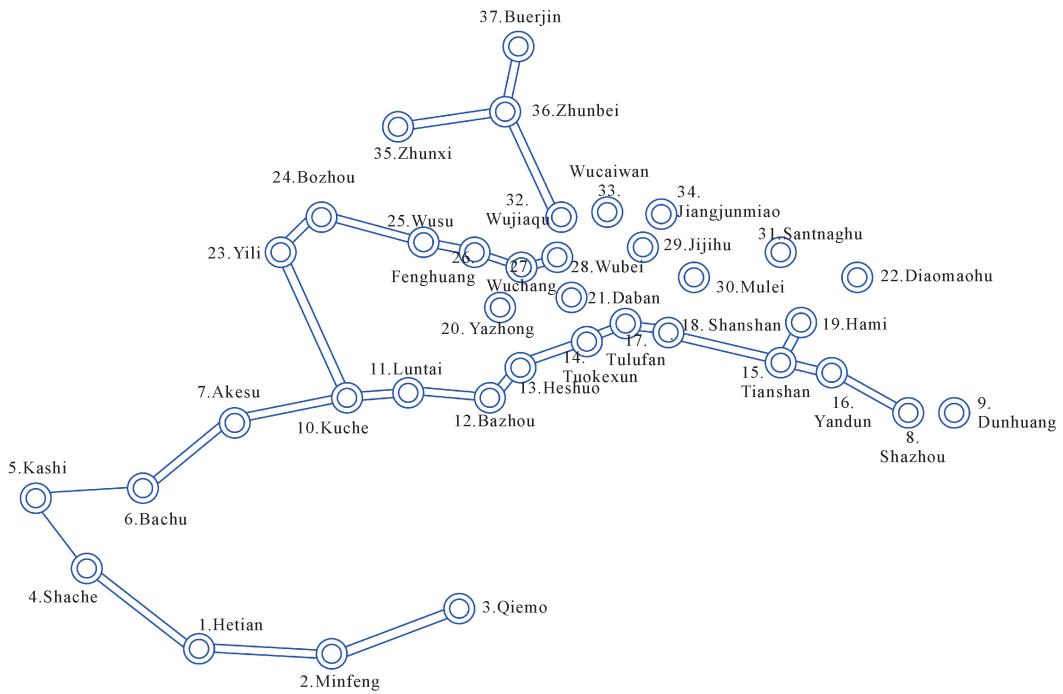


Fig. 1 Geographic view of Xinjiang planned grid in 2020

图 1 新疆 2020 年规划电网地理视图

输电线路和变压器绕组的直流电阻通常是从产品手册中查得,一般是特定温度下的值。考虑到输电线路和变压器运行允许的温度变化范围,计算中输电线路单位长度电阻变化范围为典型值的  $-8.06\% \sim 20.16\%$ ,变压器绕组等效直流电阻变化范围为典型值的  $-28.88\% \sim 7.7\%$ 。对于变电站的接地电阻的选取,应综合考虑接地短路电流水平、短路电流分流系数、接触电压等因素<sup>[19]</sup>。变电站土壤状况、接地网腐蚀情况等可能会引起变电站接地电阻的变化。按设计手册规定大电流接地系统当短路电流  $I > 4$  kA 时接地电阻  $R_g \leqslant 0.5 \Omega$ ,在满足取值要求的基础上考虑到不确定影响因素,保守估计接地电阻在典型值的  $\pm 10\%$  内变化。本文假设上述直流电阻为在其变化范围内服从均匀分布的随机输入变量,分析三个参数同时变化时电网 GIC 的不确定度。

### 2.1 电网参数引起的 GIC 不确定性量化

为了简化计算,本文中电场幅值均取 1 V/km。根据式(1)所表述内容,以  $R_l$ ,  $R_x$  和  $R_d$  为输入变量,构建出电网中各变电站入地 GIC 关于  $R_l$ ,  $R_x$  和  $R_d$  的 2 阶展开式。以传统模型  $10^5$  采样点的蒙卡(MC)方法 GIC 计算结果作为参考,验证了本方法的有效性,限于篇幅,仅给出和田变电站和吐鲁番变电站 GIC 的累计概率曲

线与 MC 结果的对比,如图 2 所示。

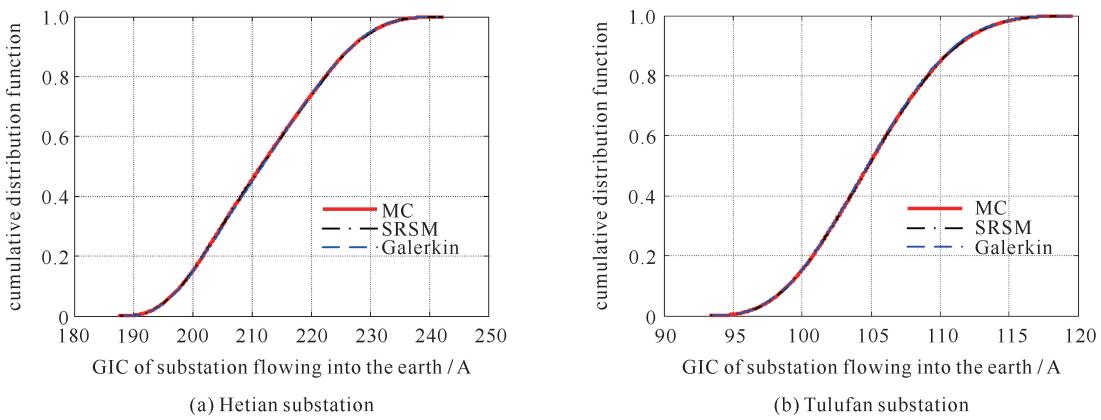


Fig. 2 Comparison of GIC in the substations by PC and MC method

图 2 参数对  $I$  影响的 PC 与 MC 方法对比

从图中可以看出无论是采用随机响应面法还是投影法计算系数,计算结果与 MC 计算结果都基本上完全吻合,可见混沌多项式展开方法对于电网 GIC 计算的有效性。根据混沌多项式的构建过程,利用多项式的系数很容易得到输出变量 GIC 的期望和标准差,即

$$E[I(\xi)] = \int_{\Omega} \left( \sum_{i=0}^P \alpha_i \psi_i(\xi) \right) p(\xi) d\xi = \alpha_0 \quad (6)$$

$$\sigma[I(\xi)] = \sqrt{\sum_{k=1}^P \alpha_k^2 \langle \psi_k^2 \rangle} \quad (7)$$

式中: $p(\xi)$ 是  $\xi$  的联合概率密度函数,等于各不确定输入参数  $\xi_i$  的概率密度函数相乘。

表 1 给出了 4 个变电站入地 GIC 的统计信息,可以看出,两种方法都能达到很好的计算精度;同时从表 1 给出的计算效率对比结果可以看出,2 阶随机响应面法和投影法在运行时间上都明显少于蒙卡方法。本算例仅为单电压等级,节点较少,且输入变量维数不高,对于规模更大的电网或更多的输入变量,PC 方法优势更加明显。

表 1 PCE 和 MC 方法的运行结果对比

Table 1 Operating result comparison of PCE and MC

substation	mean current/A			standard deviation			time/s		
	MC	SRSM	Galerkin	MC	SRSM	Galerkin	MC	SRSM	Galerkin
Hetian	212.149 5	212.145 3	212.149 3	10.833 8	10.844 5	10.828 4			
Kashi	175.208 7	175.195 6	175.197 7	10.900 1	10.913 7	10.899 2			
Tulufan	104.987 8	104.999 7	105.001 3	4.635 6	4.629 8	4.629 3	52.72	6.07	8.13
Wubei	62.446 0	62.456 0	62.456 6	2.973 2	2.968 3	2.969 5			

## 2.2 电场及电网参数共同引起的 GIC 不确定性分析

地磁暴期间中低纬地区任何方向的感应地电场都可能发生,即电场方向在  $[0^\circ \sim 360^\circ]$  之间都有可能。又因为电场角度相差  $180^\circ$  时,GIC 幅值相同,所以在考虑电场不确定性时本文取东向电场  $E_x$  在  $[-1, 1]$  V/km 之间服从均匀分布,北向电场  $E_y$  在  $[0, 1]$  V/km 之间服从均匀分布。在电网参数的基础上增加  $E_x$  和  $E_y$  两个变量。利用上述方法重新构建 GIC 的混沌多项式,随着变量维数增加到 5 维,GIC 的展开式展开到 9 阶时才能具有较好的精度;然而这种情况下,展开项的项数将增加 2002 项,求解原目标函数的次数也增加到 4004 次,虽然相对于 MC 方法的  $10^5$  次依然存在优势,但是相对于低阶展开式效率有所下降;因此对于多维高阶展开式,本文提出采用双曲线截断方案,该截断方案所保留的独立变量组成的展开项和低阶交互作用项比高阶交互作用项对模型的构建更有影响。

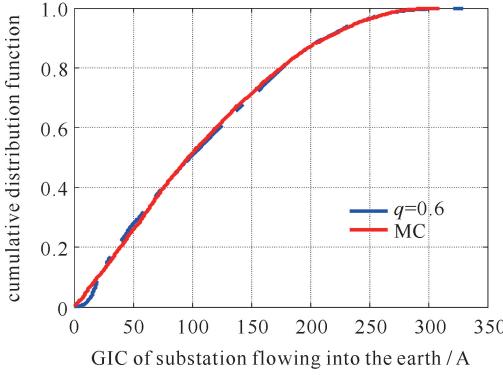
首先,由式(2)可知, $n$  维  $d$  阶展开式的正交多项式基底的阶数为各维变量阶数之和,则我们可以定义正交多项式基底的阶数为  $p_{a_i}$ ,其中各维变量的阶数为  $l_k$ ,那么对于全阶展开  $p_{a_i} \leq d$ ,且  $p_{a_i}$  和  $l_k$  之间的关系表示为

$$p_{a_i} = \sum_{k=1}^n l_k = l_1 + l_2 + \dots + l_n \quad (8)$$

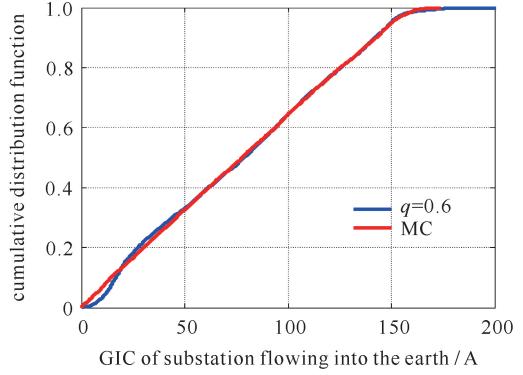
而双曲线截断展开则引入范数的概念,  $p_{a_i}$  重新定义为

$$p_{a_i} = \left( \sum_{k=1}^n (l_k)^q \right)^{1/q} \leq d \quad (9)$$

其中  $q$  为截断因子, 在 0 到 1 之间取值,  $q$  取 1 时为全阶展开, 随着  $q$  的减小, 截断保留项逐渐减少。以上节两变电站流入大地 GIC 的 5 维 9 阶展开式为例, 采用双曲线截断, 当  $q$  取 0.6 时, 拟合对比图如图 3 所示。



(a) Hetian substation



(b) Tulufan substation

Fig. 3 Comparison of GICs in substations by hyperbolic scheme for truncating the PCE and MC methods

图 3 双曲线截断的 PCE 与 MC 方法结果对比

可以看出, 当  $q$  取 0.6 时, 双曲线截断多项式混沌展开式与传统 MC 方法所得到的累计概率曲线基本上完全重合, 整体拟合效果良好。而且展开式的展开项数仅有 206 项, 相对于原来的 2002 项, 大大减少了原函数的求解次数, 进而提高了计算效率。

### 3 敏感度分析

为了定量分析各随机输入变量对 GIC 的影响程度, 本节利用 GIC 的混沌多项式, 基于方差分解法对参数的敏感度进行分析。 $d$  阶混沌多项式展开式可以写成

$$I(\xi) = \alpha_0 + \sum_{i_1=1}^n \alpha_{i_1} \psi_{i_1}(\xi_{i_1}) + \cdots + \sum_{i_1=1}^n \cdots \sum_{i_d=1}^{i_{d-1}} \alpha_{i_1, \dots, i_d} \psi_{i_1, \dots, i_d}(\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_d}) \quad (10)$$

式中:  $\psi_{i_1, \dots, i_d}(\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_d})$  是以不确定参数  $\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_d}$  为变量的  $d$  阶正交多项式基底;  $\alpha_{i_1, \dots, i_d}$  为与之对应的  $d$  阶混沌多项式展开系数。

由式(7)可推导出, 对于 2 阶展开式的方差  $Var$  表达式为

$$Var [I(\xi)] = \sum_{i_1=1}^n \alpha_{i_1}^2 \langle \psi_{i_1}^2 \rangle + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \alpha_{i_1, i_2}^2 \langle \psi_{i_1, i_2}^2 \rangle \quad (11)$$

根据 Sobol 非线性总敏感度指标的定义<sup>[20]</sup>, 参数  $\xi_i$  的总敏感度指标  $S_i^{\text{tot}}$  为

$$S_i^{\text{tot}} = \frac{\alpha_i^2 \langle \psi_i^2 \rangle + \sum_{1 \leq i \leq j \leq n} \alpha_{i,j}^2 \langle \psi_{i,j}^2 \rangle + \sum_{1 \leq j \leq i \leq n} \alpha_{j,i}^2 \langle \psi_{j,i}^2 \rangle}{Var} \quad (12)$$

#### 3.1 GIC 对电网参数的敏感度

根据上文得到的 GIC 混沌多项式, 利用式(12)计算得到各个变电站 GIC 对三维输入变量的敏感度指标, 如图 4 所示。

从图中可以看出, 37 个变电站中, 有 24 个变电站流入大地的 GIC 对输电线路单位长度电阻  $R_l$  敏感度超过 0.5, 其中敏感度高达 0.9 以上的有 11 个; 而 GIC 对变压器等效直流电阻  $R_x$  的敏感度最大的达坂城变电站仅有 0.27。由此可以得出, 对于本算例,  $R_x$  的变化对 GIC 影响程度小于  $R_d$  和  $R_l$ 。

为了验证上述结果的正确性, 基于 1000 次抽样对含上述 3 个不确定参数的 GIC 计算模型进行蒙特卡罗模拟, 以和田变电站为例, 获得变电站流入大地 GIC 关于输电线路单位长度电阻、变压器等值电阻和接地电阻的散点图。

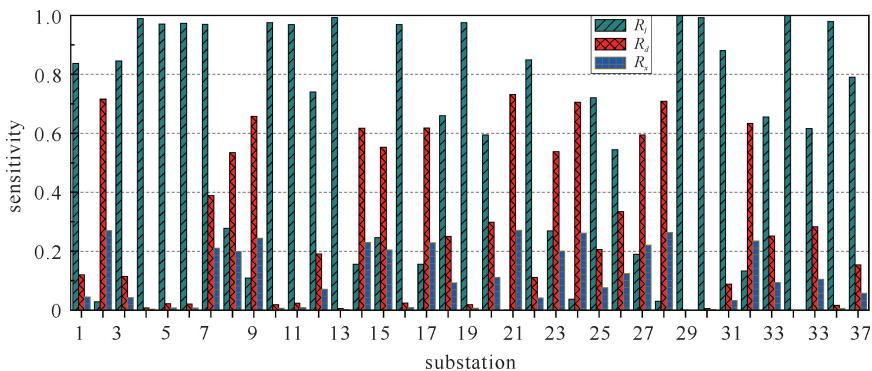


Fig. 4 Comparison of GICs in substations by hyperbolic scheme for truncating the PCE and MC method

图 4 双曲线截断的 PCE 与 MC 方法结果对比

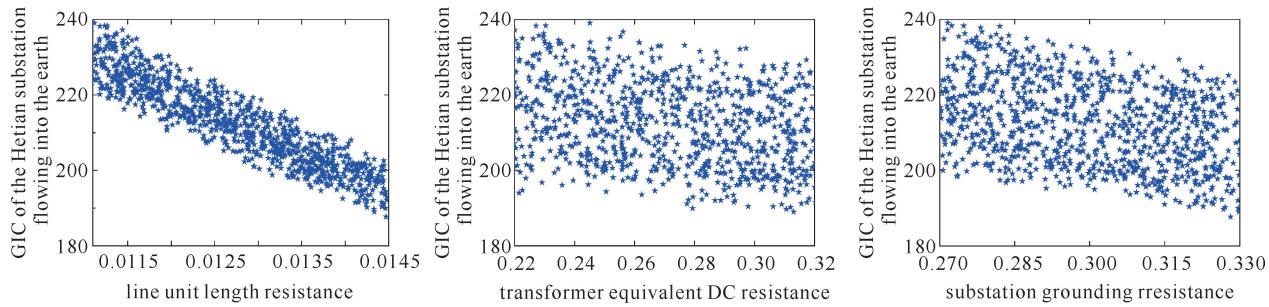


Fig. 5 Scatter diagram of grid parameters and GIC

图 5 不确定参数与 GIC 的散点图

从散点图可以看出,和田变电站流入大地的 GIC 随着输电线路单位长度电阻的增大而呈现出减小的趋势,相关性比较强;而 GIC 随着变压器等效直流电阻的增大而呈现出无规则分布,对于变电站接地电阻的增大有略微减小。因此可以得出,和田变电站流入大地 GIC 对输电线路单位长度电阻的敏感度大于对变压器等效直流电阻和变电站接地电阻的敏感度,与上述计算结果基本一致。

### 3.2 GIC 对电场及电网参数的敏感度

同样,根据 2.2 节中五维输入变量对应的 GIC 混沌多项式,利用式(12)计算得到各个变电站 GIC 对  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $R_d$ ,  $R_t$  和  $R_x$  五维输入变量的敏感度指标,分析结果如图 6 所示。

在本文选取的算例中,GIC 对  $E_x$ ,  $E_y$  的敏感度远大于对电网参数的敏感度。除此之外,37 个变电站中布尔津、哈密和托克逊等 7 个变电站对北向电场  $E_y$  比较敏感,另外 30 个变电站流入大地的 GIC 对东向电场  $E_x$  的敏感度大于北向电场  $E_y$ ,这与变电站所连接线路的走向有很大的关系。

## 4 结 论

本文在计算电网 GIC 时将不确定输入参数看作随机变量,基于混沌多项式展开方法对新疆 750kV 规划电网的 GIC 进行了不确定度量化,研究了 GIC 对输入参数的敏感度,得到如下结论:

PCE 方法能准确有效的反映参数变化引起的 GIC 的不确定度,且计算效率明显高于 MC 方法,随着电网电压规模的扩大,PCE 方法的优势将更加突出;在 PCE 方法计算过程中随机响应面法和投影法都具有满意的精度,但随机响应面法的采样点个数较少,效率更高,且随着展开阶数和变量维数的增加优势更加明显。

随着变量维数的增多,展开阶数的提高,本文提出的双曲截断方案,不仅可以确保精度要求,而且相比于全阶展开方式,原函数求解次数大大减少,计算效率得到提升。

对于设定的输入参数变化范围,只考虑电网参数变化的影响时,变电站入地 GIC 对输电线路单位长度直流电阻和变电站接地电阻敏感度大于变压器等效直流电阻;GIC 对电场敏感度远大于电网参数,且对东向电场  $E_x$  的敏感度大于对北向电场  $E_y$  的敏感度,这主要与变电站所连接线路的走向有关。

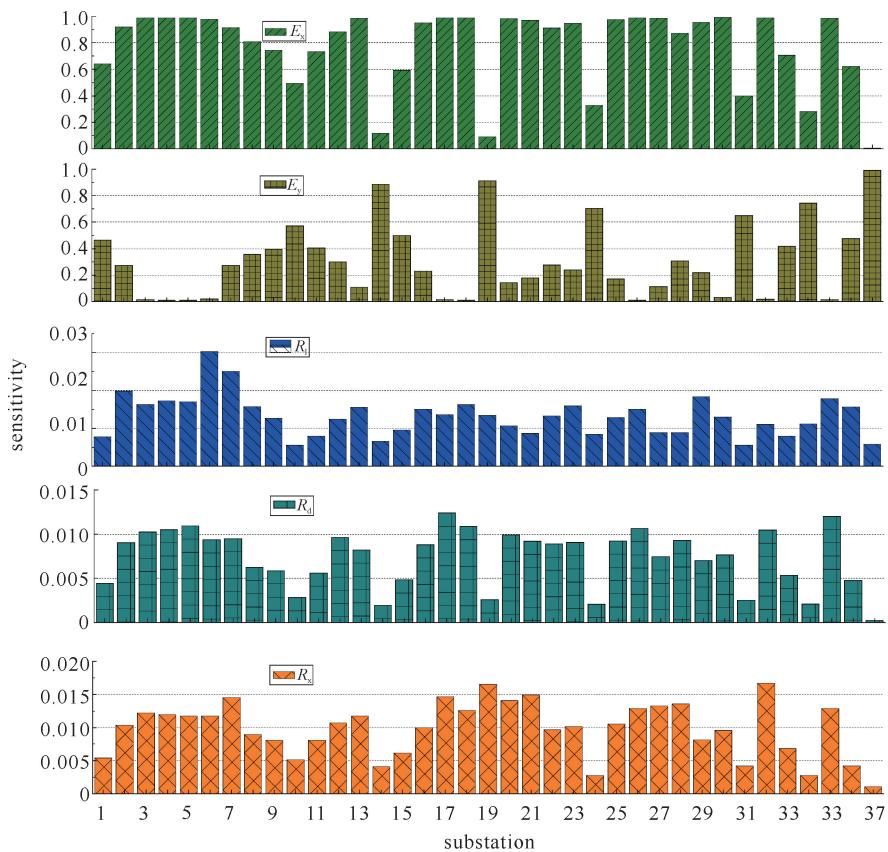


Fig. 6 Results of sensitivity of grid parameters and electric field

图 6 电网参数和电场敏感度分析结果

## 参考文献：

- [1] Albertson V D, Thorson J M, Clayton R E, et al. Solar-induced-currents in power systems: Cause and effects[J]. IEEE Trans Power Apparatus & Systems, 1973, 92(2): 471-477.
- [2] Zheng K, Liu L G, Boteler D, et al. Calculation analysis of geomagnetically induced currents with different network topologies[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2013: 1-4.
- [3] 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 Liangguang, et al. Calculation method of geomagnetically induced currents in the power grid considering the influence of the coast effect. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6059-6066)
- [4] Pirjola R, Viljanen A. Complex image method for calculating electric and magnetic fields produced by an auroral electrojet of finite length [J]. Annales Geophysicae, 1998, 16(11): 1434-1444.
- [5] Pirjola R. Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems[J]. Surv Geophys, 2002, 23(1): 71-90.
- [6] Boteler D H, Pirjola R J. The complex-image method for calculating the magnetic and electric fields produced at the surface of the Earth by the auroral electrojet[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2010, 132(1): 31-40.
- [7] Pirjola R. Calculation of geomagnetically induced currents (GIC) in a high-voltage electric power transmission system and estimation of effects of overhead shield wires on GIC modelling[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2007, 69(12): 1305-1311.
- [8] Horton R, Boteler D, Overbye T J, et al. A test case for the calculation of geomagnetically induced currents[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2012, 27(4): 2368-2373.
- [9] Takasu N, Oshi T, Miyawaki F, et al. An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents[J]. IEEE Trans Power Delivery, 1994, 9(2): 1173-1182.
- [10] 刘连光, 吴伟丽. 磁暴影响电力系统安全风险评估思路与理论框架[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1583-1591. (Liu Liangguang, Wu Weili. Security risk assessment ideas and theoretical framework for power system considering geomagnetic storm. Proceedings of the CSE, 2014, 34(10): 1583-1591)
- [11] Zheng K, Boteler D, Pirjola R J, et al. Effects of system characteristics on geomagnetically induced currents[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2014, 29(2): 890-898.

- [12] 刘连光, 郭世晓, 魏恺, 等. 基于全节点模型的三华电网地磁感应电流计算[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1946-1952. (Liu Liangguang, Guo Shixiao, Wei Kai, et al. Calculation of geomagnetically induced currents in interconnected North China- Central China-East China power grid based on full-node GIC model. Power System Technology, 2014, 38(7): 1946-1952)
- [13] 刘青, 韩康康, 徐婷, 等. 新疆 2020 年规划电网地磁感应电流的分布规律及敏感性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3678-3684. (Liu Qing, Han Kangkang, Xu Ting, et al. Analysis of distribution regularities and sensitivity of geomagnetic induced currents in planned Xinjiang 750 kV power grid in 2020. Power System Technology, 2017, 41(11): 3678-3684)
- [14] 熊芬芬, 杨树兴, 刘宇, 等. 工程概率不确定性分析方法[M]. 北京: 科学出版社. (Xiong Fenfen, Yang Shuxing, Liu Yu, et al. Engineering probability uncertainty analysis method. Beijing: Science Press, 2015)
- [15] Liu Qing, Xie Yanzhao, Ning Dong, et al. Uncertainty quantification of geo-magnetically induced currents in UHV power grid[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, to be published.
- [16] Isukapalli S S, Roy A, Georgopoulos P G. Efficient sensitivity/ uncertainty analysis using the combined stochastic response surface method and automated differentiation: Application to environmental and biological systems[J]. Risk Analysis, 2010, 20(5): 591-602.
- [17] Cooper M D, Wu W, Mccue L S. Non-intrusive polynomial chaos for efficient uncertainty analysis in parametric roll simulations[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2016, 21(2): 282-296.
- [18] 郑宽, 刘连光, Boteler D H, 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 Liangguang, Boteler D H, et al. Modelling 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)
- [19] 何金良, 张波, 曾嵘, 等. 1000 kV 特高压变电站接地系统的设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 7-12. (He Jinliang, Zhang Bo, Zeng Rong, et al. Grounding system design of 1 000 kV ultra-high voltage substation. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 7-12)
- [20] Li X, Wang J M, Tang W, et al. Stochastic analysis for crosstalk noise of coupled interconnects with process variations[C]//Proceeding of the IEEE International Conference on Integrated Circuit Design and Technology and Tutorial. 2008: 289-292.