

DOI: 10.7667/PSPC170425

电力变压器绕组电气参数对绕组变形的全局灵敏度分析

李妍^{1,2}, 周洪伟^{1,2}, 沈小伟^{1,2}, 曹程杰^{1,2}, 吴昊³, 胡国伟^{1,2}, 范逸斐^{1,2}, 赵雪霖^{1,2}

(1. 南京电力工程设计有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 国网江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏 南京 210000;
3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 目前已有利用变压器绕组电气参数检测绕组变形的的方法, 但对电气参数变化与绕组变形之间的联系的研究还不够深入。为此, 提出一种分析绕组电气参数对不同种类变形的全局灵敏度方法。该方法首先采用响应面法, 建立显式化的绕组电感电容参数响应面模型。然后基于蒙特卡罗的 Sobol' 全局灵敏度分析法计算各电气参数对不同变形种类的全局灵敏度, 分析各电气参数反映不同类型绕组变形的灵敏度。进一步分析其变异系数, 以比较不同电气参数针对同一类型绕组变形的灵敏度。以某型号变压器为例进行了分析, 分析结果表明利用本方法可以揭示各电气参数与绕组变形种类的内在联系。依据结果可将灵敏度较高的参数信息引入变形判据, 为基于电气参数的绕组变形检测提供了理论基础和新的思路。

关键词: 变压器; 绕组变形; 响应面法; Sobol'法; 全局灵敏度分析

Global sensitivity analysis of winding electrical parameters on power transformer winding deformation

LI Yan^{1,2}, ZHOU Hongwei^{1,2}, SHEN Xiaowei^{1,2}, CAO Chengjie^{1,2}, WU Hao³, HU Guowei^{1,2}, FAN Yifei^{1,2}, ZHAO Xuelin^{1,2}

(1. Nanjing Electric Power Engineering Design Co., Ltd, Nanjing 210000, China;

2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing, 210000, China;

3. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: At present, some methods have been put forward to detect the winding deformation by using the electrical parameters of the transformer winding, but the research on the relationship between the variation of electrical parameters and the types of deformation is not enough. For this reason, this paper presents a novel method to calculate the global sensitivity of winding parameters to different kinds of deformation. First, this method uses the Response Surface (RS) method to build RS models of winding inductance and capacitance parameters, and then combines them with the Sobol' global sensitivity analysis based on Monte Carlo method to calculate the global sensitivity of each electrical parameter to different deformation types and analyzes the sensitivity of each electrical parameter reflecting different types of winding deformation. Further, it figures the Coefficient of Variation (CV) on certain deformation to compare the sensitive indexes between different electrical parameters. Based on a certain type of transformer, the analysis result shows that the corresponding relationship between the electrical parameters and the winding deformation. Further, the parameters with high sensitivity can be introduced into the deformation criterion, which provides the theoretical basis and new ideas for the winding deformation detection method based on electrical parameters.

This work is supported by Technological Project of Nanjing Electric Power Engineering Design Co., Ltd (JE201606).

Key words: transformer; winding deformation; response surface method; Sobol' method; global sensitivity analysis

0 引言

变压器在运行过程中常常受到短路故障产生的短路电流冲击, 在由此产生的电磁力的作用下变压

器绕组会产生扭曲、倾斜、塌陷等永久失稳变形^[1], 如不能及时发现上述变形, 积累效应会使变形加剧, 导致绝缘损坏, 出现短路、主绝缘击穿等故障^[2]。现有的电气量检测法利用变形后电气量发生变化的特点判断绕组状态^[3-5], 但是对电气量与绕组变形对应关系的研究还不够深入, 导致通过电气量能够获得的信息很少。因此, 研究绕组结构变化对电

基金项目: 南京电力工程设计有限公司科技项目资助 (JE201606)

气参数的影响,分析电气参数对不同变形种类的灵敏度,对完善和发展绕组变形检测方法及变压器安全稳定运行具有重要的意义。

在计算绕组电气参数的研究中,有限元方法可以充分考虑绕组各部分间的耦合关系,对于分析复杂变形具有很高的精度^[6-8]。但是,有限元法计算效率低且电感电容是绕组结构的隐式函数,难以用于灵敏度分析。在工程优化领域,多项式响应面法是将隐函数关系揭示为显函数关系的成熟方法^[9-10],而且显式化使计算效率大幅提高^[11]。本文引入响应面法,建立电气参数显式模型用于灵敏度分析。

电气参数对绕组变形的灵敏度分析包括局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。局部灵敏度分析主要考察单个变量对输出的影响,无法考虑变量的相互作用,其灵敏度为某点(局部)的灵敏度,在强非线性、非单调系统中不能代表整个定义域的灵敏度。全局灵敏度分析中,Sobol'法是一种基于方差分析的灵敏度分析法。通过计算各输入变量在整个定义域内变化时对模型输出方差的影响,得到各输入变量单独作用和交互作用的灵敏度。分析中各变量可以同时变化,能够对非线性强、不能叠加、非单调的模型进行分析^[12-13]。但是该方法不能比较分析不同电气参数对绕组变形的灵敏度大小,为此本文定义变异系数,对各参数灵敏度进行对比。

本文以某型号实际变压器为研究对象,首先采用响应面法,建立变压器电感电容参数的响应面模型,并与基于蒙特卡罗的 Sobol'全局灵敏度分析法相结合,计算各电气参数对不同类型绕组变形的灵敏度;进一步计算各电气参数的变异系数,比较各参数间的灵敏度大小,并根据灵敏度计算结果分析了各电气参数与不同类型绕组变形间的内在关系。

1 变压器电气参数响应面模型

1.1 多项式响应面法基本原理

响应面法是构造显式近似模型来代替实际模型的方法。该方法在特定的多项式模型基础上,通过适当的试验设计对输入变量多次独立采样并计算样本值,再利用最小二乘法计算多项式函数中的待定系数,最终得到实际模型的显式函数。

二阶和三阶响应面模型表达式分别为^[9-10]

$$\tilde{y}(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1 < j}^n a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

$$\tilde{y}(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n a_{iii} x_i^3 + \quad (2)$$

$$\sum_{1 \leq i < j}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j}^n a_{ij} x_i^2 x_j + \sum_{1 \leq i < j < k}^n a_{ijk} x_i x_j x_k$$

式中: $\tilde{y}(x)$ 为响应面函数; x_i, x_j, x_k 为输入变量,共 n 个; $a_0, a_i, a_{ii}, a_{iii}, a_{ij}, a_{ijj}, a_{ijk}$ 为待定系数,其个数与变量个数及项数有关,以二阶为例,其个数为

$$N = 1 + 2 \times n + \frac{n!}{2!(n-2)!}$$

对待分析的实际模型进行 M 次采样,得到各样本对应的样本值为 $\mathbf{y} = (y^{(1)}, \dots, y^{(M)})^T$,满足式(3)。

$$\mathbf{y} = \Phi \cdot \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\alpha}$ 为待定系数向量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为误差矩阵; Φ 为采样点数据矩阵,可表示为

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & \phi_1^{(1)} & \dots & \phi_{N-1}^{(1)} \\ 1 & \phi_1^{(2)} & \dots & \phi_{N-1}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & \phi_1^{(M)} & \dots & \phi_{N-1}^{(M)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

这样可利用最小二乘法来确定待定系数^[11],即

$$\boldsymbol{\alpha} = (\Phi^T \Phi)^{-1} (\Phi^T \mathbf{y}) \quad (5)$$

1.2 D-最优实验设计

为了保证响应面函数达到较高的精度,必须适当地选取样本数据。D-最优试验设计方法,是在给定模型结构的基础上,从给定的初始试验计划出发,在各输入变量取值范围内寻求最优试验设计的一种方法^[14],本文采用该方法来完成样本数据的选取。

响应面模型的信息矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = (\Phi^T \Phi) / M \quad (6)$$

其行列式为

$$|\mathbf{A}| = |\Phi^T \Phi| / M^N \quad (7)$$

$|\mathbf{A}|$ 值越大,说明待定系数的估计越准确。因此这里以该值最大为目标,采用D-最优试验设计方法来选取样本数据。

1.3 响应面模型误差分析

响应面模型拟合优度指标 R^2 与 R_{adj}^2 如式(8)、式(9)所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - \tilde{y})^2}{\sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

$$R_{\text{adj}}^2 = 1 - \frac{M-1}{M-(N+1)} (1-R^2) \quad (9)$$

式中: y 为样本值; \bar{y} 为样本均值。

这两个指标反映了拟合值与各样本值的接近程度,后者用于比较具有不同项数的模型。拟合优度越接近1,说明精度越高。

对于采样点以外的拟合程度,均匀随机取样并

计算响应面拟合值与样本值的最大相对误差。

1.4 多项式响应面建模流程

综合以上分析, 可得响应面建模流程如图 1 所示, 其中精度检验环节要求拟合优度指标大于 0.99, 样本点以外最大相对误差不超过 5%。

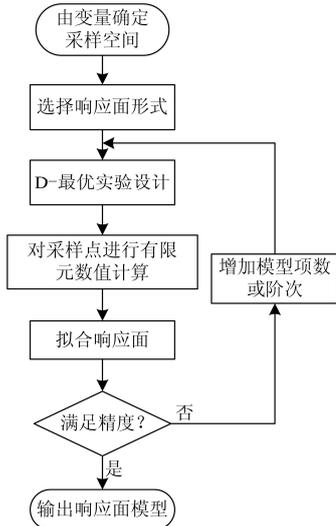


图 1 响应面构建流程

Fig. 1 Process of building response surface

1.5 变压器电气参数响应面模型举例

以某型号三相双绕组变压器为例分析其电气参数响应面模型的建立过程, 该变压器容量为 20 MVA, 电压为 $18 \pm 2 \times 2.5\%/6.3$ kV, 其他结构参数如表 1 所示。

表 1 变压器结构参数

Table 1 Structural parameters of transformer

参数	数值	参数	数值
铁芯半径	245 mm	铁芯窗高	1 130 mm
铁轭高	490 mm	油箱宽	1 300 mm
低压绕组匝数	97	高压绕组匝数	291
低压绕组高	954.7 mm	高压绕组高	965 mm
低压绕组内/外半径	263/336.5 mm	高压绕组内/外半径	356.5/438.5 mm

应用 ANSYS 软件建立一相绕组的二维轴对称有限元模型, 如图 2 所示。模型分为四个区域: A1、A2 分别为低压、高压绕组, A3 为铁芯及铁轭, A4 为绝缘油。

变压器绕组变形后, 电容、电感等参数均会随之改变, 本文将建立低压、高压绕组的对地自电容 (C_{11})、(C_{22})、互电容 (C_{12}) 和低压、高压绕组自感 (L_{11})、(L_{22})、互感 (L_{12}) 的响应面模型。由于在外部短路故障时, 绕组受径向和轴向电动力作用, 径向力使低压绕组内径缩短、高压绕组内径增加, 轴向力使两

绕组高度缩短^[15]。因此, 选取低压绕组内半径(r_1)、高压绕组内半径(r_2)、低压绕组轴向高度(h_1)、高压绕组轴向高度(h_2)作为响应面模型的输入变量, 通过输入变量的不同取值模拟绕组不同程度的变形。各输入变量的取值范围由模型实际结构确定。本文各变量初值、变化范围如表 2 所示。

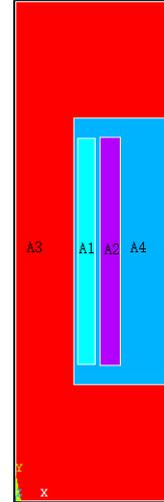


图 2 变压器 ANSYS 模型

Fig. 2 ANSYS model of transformer

表 2 输入变量初始取值及变化范围

Table 2 Initial values and ranges of the input variables

输入变量	初始值/mm	变化范围/mm	变形程度/%
r_1	263	246.8~263	0~6
r_2	356.5	356.5~366.85	0~3
h_1	954.7	668.29~954.7	0~30
h_2	965	675.5~965	0~30

以低压绕组对地自电容 C_{11} 为例分析响应面模型建立过程, 为了使待定系数与样本值的线性关系更明显, 对 C_{11} 取倒数^[16]。初始模型为二阶不含交叉项多项式, 根据 D-最优设计法得到的 19 个样本点数据进行有限元分析, 并得到样本值, 进一步得到响应面方程并校验该方程拟合度, 结果如表 3 所示。

表 3 C_{11} 响应面模型拟合度及误差分析

Table 3 Fitting and error analysis of RS model of C_{11}

模型形式	R^2	R_{adj}^2	ε
二阶(不含交叉项)	0.986 6	0.975 8	38.62%
二阶(含交叉项)	0.999 9	0.999 9	6.42%
三阶(含交叉项)	0.999 9	0.999 9	2.81%

可见, 不含交叉项的二阶多项式响应面拟合优度及最大误差均不满足要求, 因此在模型中增加交叉项并增加采样点为 25 个, 此时拟合优度有所提高, 但对样本点以外的其他点的拟合误差仍较大,

进一步增加模型阶次为三阶，并增加采样点为 45 个，此时拟合精度满足要求，得到低压绕组对地自电容随绕组变形的响应面方程如式(10)所示。

$$C_{11} = (-2.70189 \times 10^5 + 7.34928 \times 10^5 r_1 + 1.4724 \times 10^6 r_2 + 17010.79722 h_1 + 50200.84592 h_2 + 1.16276 \times 10^6 r_1 r_2 - 1.28785 \times 10^5 r_1 h_1 - 1.00557 \times 10^5 r_1 h_2 + 74229.28627 r_2 h_1 - 2.11863 \times 10^5 r_2 h_2 - 818.93618 h_1 h_2 - 2.92346 \times 10^6 r_1^2 - 4.34587 \times 10^6 r_2^2 - 10468.34430 h_1^2 + 1082.32083 h_2^2 - 17275.32496 r_1 r_2 h_1 - 25012.27924 r_1 r_2 h_2 + 3965.39240 r_1 h_1 h_2 - 450.44173 r_2 h_1 h_2 + 1.31772 \times 10^6 r_1^2 r_2 + 9893.07009 r_1^2 h_1 + 234300 r_1^2 h_2 - 2.48951 \times 10^6 r_1 r_2^2 + 48847.05218 r_1 h_1^2 - 5432.52428 r_1 h_2^2 - 99371.76094 r_2^2 h_1 + 2.88308 \times 10^5 r_2^2 h_2 + 1398.8 r_2 h_1^2 + 5817.71911 r_2 h_2^2 - 317.53638 h_1^2 h_2 + 322.87 h_1 h_2^2 + 2.66725 \times 10^6 r_1^3 + 4.46693 \times 10^6 r_2^3 - 711.88859 h_1^3 - 861.87 h_2^3)^{-1} \quad (10)$$

为了更直观地分析该方程的拟合效果，在样本点以外重新取值，假定只有某一变量变化，得到 C_{11} 的真实值和响应面拟合值随该变量变化的曲线，如图 3 所示。由基本理论可知，低压绕组对地电容(C_{11})应反比于低压绕组内径(r_1)且正比于低压绕组高度(h_1)，而与高压绕组外径(r_2)无关；同时，由于计及绕组对油箱壁的电容，而高压绕组高度(h_2)的变化使低压绕组正对油箱壁的面积改变，这使得 C_{11} 反比于 h_2 ，对照图 3 可知，本文的计算结果与理论分析完全一致，图 3 分图中中最大拟合误差分别为 1.60%、0.66%、0.38%和 0.56%，可见总体上拟合误差都很小，响应面建模精度满足要求。

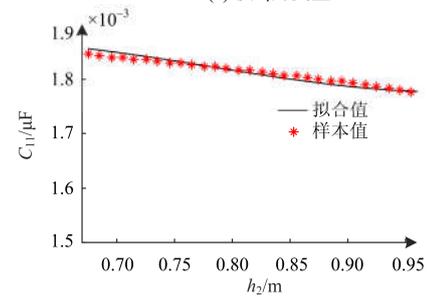
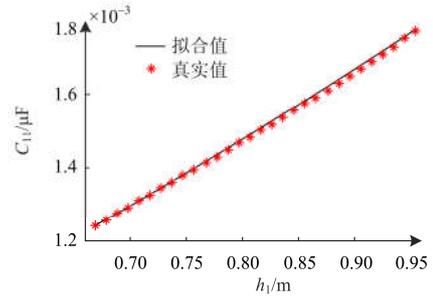
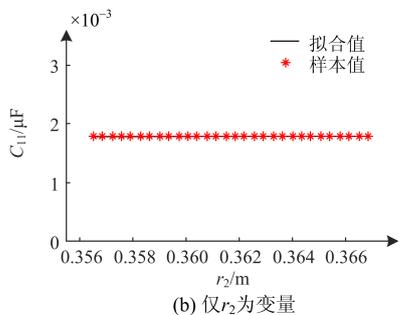
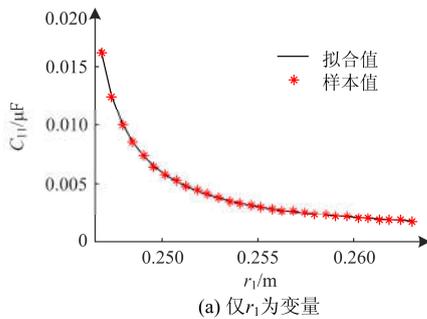


图 3 C_{11} 三阶响应面模型拟合情况

Fig. 3 Fitness of 3rd-order response surface model of C_{11}

其他几个参数的响应面函数中电容均为三阶模型，电感均为二阶模型。各参数响应面函数拟合度及误差分析结果如表 4 所示，可见响应面模型与真实值逼近程度高，能够满足要求。

表 4 响应面拟合度及误差分析

Table 4 Fitting and error analysis of response surface model

电气参数	R^2	R_{adj}^2	$\varepsilon / \%$
C_{11}	0.999 9	0.999 9	2.81
C_{12}	0.999 9	0.999 8	1.73
C_{22}	0.999 9	0.999 9	0.59
L_{11}	0.999 9	0.999 9	3.44×10^{-5}
L_{12}	0.999 9	0.999 9	8.36×10^{-5}
L_{22}	0.999 9	0.999 9	3.34×10^{-5}

2 电气参数对形变的灵敏度分析

本文在各参数的响应面函数的基础上，采用 Sobol' 法分析灵敏度，该方法的基本原理为：对某一参数 $\tilde{y}(x)$ ，用方差分析法(ANOVA)将其分解为单个变量和变量间组合的形式，计算 $\tilde{y}(x)$ 的总方差及各分解项的偏方差，从而得到各项的灵敏度。方差计算中的多重积分可以通过蒙特卡罗算法实现^[17]。

在输入变量的单位空间域 $\Omega^n = \{x | 0 \leq x_i \leq 1; i = 1, 2, \dots, n\}$ 内，将函数 $\tilde{y}(x)$ 分解成 2^n 项之和。

$$\tilde{y}(x) = \tilde{y}_0 + \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i(x_i) + \sum_{1 \leq i < j}^n \tilde{y}_{i,j}(x_i, x_j) + \dots + \tilde{y}_{1,2,\dots,n} \quad (11)$$

(x_1, x_2, \dots, x_n)

式中, \tilde{y}_0 为常数项。

各子项对其所包含的任一变量积分均零:

$$\int_0^1 \tilde{y}_{i_1, i_2, \dots, i_s}(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_s}) dx_k = 0 \quad (k = i_1, \dots, i_s) \quad (12)$$

根据 Sobol'法, 式(11)分解形式唯一, 且各阶子项可由多重积分计算^[18], 如式(13)~式(15)所示。

$$\tilde{y}_0 = \int_{\Omega} \tilde{y}(x) dx \quad (13)$$

$$\tilde{y}_i(x_i) = -\tilde{y}_0 + \int_0^1 \dots \int_0^1 \tilde{y}(x) \prod_{k \neq i} dx_k \quad (14)$$

$$\tilde{y}_{ij}(x_i, x_j) = -\tilde{y}_0 - \tilde{y}_i(x_i) - \tilde{y}_j(x_j) + \int_0^1 \dots \int_0^1 \tilde{y}(x) \prod_{k \neq i, j} dx_k \quad (15)$$

$\tilde{y}(x)$ 的总方差为

$$D = \int_{\Omega} \tilde{y}^2(x) dx - \tilde{y}_0^2 \quad (16)$$

定义 S 阶偏方差为

$$D_{i_1, i_2, \dots, i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 \tilde{y}_{i_1, i_2, \dots, i_s}^2 dx_{i_1} \dots dx_{i_s} \quad (17)$$

由式(11)、式(12)和式(16)可得:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,n} \quad (18)$$

S 阶灵敏度系数定义为 S 阶偏方差与总方差的比值。

$$S_{i_1, i_2, \dots, i_s} = \frac{D_{i_1, i_2, \dots, i_s}}{D} \quad (19)$$

总灵敏度系数定义为各阶灵敏度系数之和:

$$ST_i = S_i + \sum_{i < j \leq n} S_{ij} + \dots + S_{1,2,\dots,n} \quad (20)$$

Sobol'法的一阶灵敏度系数反映了变量单独作用时, 其对函数值的影响程度; 总灵敏度反映了考虑变量交叉作用后对函数值的影响程度; 参数中变量的灵敏度越高, 则灵敏度系数越接近于 1。

一阶灵敏度与总灵敏度的差值, 体现了该变量与其他变量间交互作用的强弱, 差值为正表明该变量与其他变量同时变化时, 参数变化更灵敏。

由于 Sobol'法是基于方差分析的, 只能对比电气参数对自己的不同变量间的灵敏度, 没有办法比较不同电气参数对同一变量的灵敏度, 为此本文将随着某一变量变化, 电气参数相对于初始值的离散程度定义为电气参数对该变量的变异系数 U , 如式(21)所示。

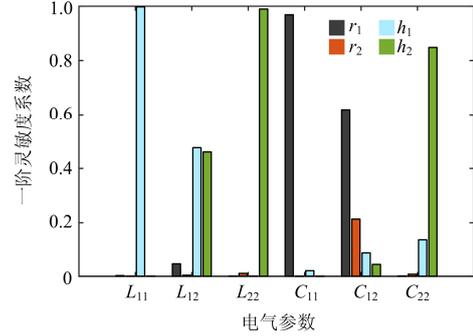
$$U = \frac{1}{\tilde{y}^{(0)}} \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\tilde{y}^{(i)} - \tilde{y}^{(0)})^2} \times 100\% \quad (21)$$

式中: $\tilde{y}^{(0)}$ 为初始值; $\tilde{y}^{(i)}$ 为样本值; M 为采样次数。

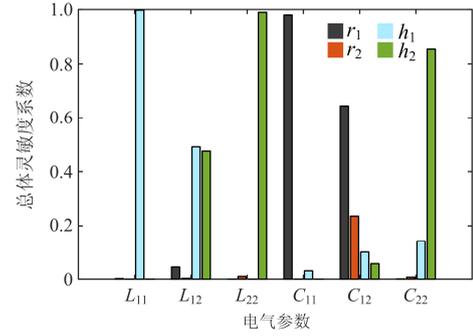
电气参数对某变量的变异系数越大, 表示参数

样本值距初值的差异越大, 说明参数对该变量的改变越灵敏。

将响应面与 Sobol'法结合, 利用蒙特卡罗法实现方差的计算, 表 2 中所给定的变量范围内对输入变量进行均匀采样, 得到 10 000 个采样点, 计算各电气参数的一阶灵敏度系数与总体灵敏度系数, 结果如图 4 所示。



(a) 各参数一阶灵敏度



(b) 各参数总体灵敏度

图 4 灵敏度柱状图

Fig. 4 Sensitivity bar chart

由图 4 结果可知, 各电气参数对四个输入变量呈现不同的灵敏程度, 且灵敏度差异较大。以图 4(b) 中的 C_{11} 为例, 该参数对变量 r_1 的灵敏度最高, 为 0.974 9, 其次为 h_1 , 其灵敏度为 0.030 3; 而对变量 r_2 和 h_2 灵敏度较低, 分别为 9.80×10^{-5} 和 1.79×10^{-4} , 这也与图 3 中得到的直观结果吻合。分析结果说明低压绕组对地自电容对低压绕组径向变形最灵敏, 而对其他变形的不灵敏。同理可得低压绕组自感仅对低压绕组高度变化灵敏; 低、高压绕组互感对低、高压绕组高度变化均较灵敏; 低压绕组对地电容仅对低压绕组内径变化最灵敏; 低、高压绕组间电容对低压绕组内径变化最灵敏, 对其他结构参数变化也有一定灵敏度; 高压绕组对地电容对高压绕组高度变化最灵敏, 对低绕组高度变化也有一定灵敏度。

各参数对各变量的总体灵敏度与一阶灵敏度差值如表 5 所示, 可见各差值均为零或很小的正数,

表明不同结构参数同时变化,即绕组发生比较复杂的变形时,和发生单一变形时,电气参数的变化是一致的或仅有较小的差别,也就是说对于特定的电气参数,仅在某个或某些特定绕组结构参数变化时才有较大的改变。

表 5 总体灵敏度与一阶灵敏度之差

Table 5 Error between global sensitivity parameters and 1st-order sensitivity parameters

参数	r_1	r_2	h_1	h_2
C_{11}	0.001	0.000	0.001	0.000
C_{12}	0.025	0.022	0.015	0.014
C_{22}	0.000	0.000	0.006	0.006
L_{11}	0.000	0.000	0.000	0.000
L_{12}	0.000	0.000	0.015	0.015
L_{22}	0.000	0.000	0.000	0.000

各电气参数对不同结构参数的变异系数如表 6 所示。可见,各变异系数的差别是很大的,例如对 r_1 来说, C_{11} 的变异系数最大,为 224.462 3, L_{22} 的变异系数最小,几乎为 0,表明当 r_1 变化时, C_{11} 的变化最大, L_{22} 几乎不变,也就是说 C_{11} 可以灵敏地反应这种绕组变形,而 L_{22} 几乎不反应。整体来看,电容参数的变异系数普遍高于电感参数的变异系数。

表 6 电气参数变异系数

Table 6 Coefficient of variation of electrical parameters

参数	r_1	r_2	h_1	h_2
C_{11}	224.462 3	0.258 1	17.764 8	2.379 5
C_{12}	30.641 9	20.915 4	15.404 3	13.486 1
C_{22}	1.078 3	2.403 0	13.544 4	23.805 1
L_{11}	0.001 0	$4.884 8 \times 10^{-6}$	0.013 6	$1.248 0 \times 10^{-5}$
L_{12}	0.001 7	2.2367×10^{-4}	0.004 1	0.004 0
L_{22}	$2.897 8 \times 10^{-6}$	0.001 3	$4.339 7 \times 10^{-6}$	0.011 9

综合以上灵敏度分析结果,低压绕组对地自电容和互电容均对低压绕组径向变形灵敏度最高,且后者对高压绕组径向变形的灵敏度远高于其他参数;高压绕组对地自电容对高压绕组轴向变形灵敏度最高。总体上电容参数灵敏度远高于电感参数。据此,可将电容参数引入绕组变形的检测判据中,为变压器绕组变形检测提供更充分的依据。

3 结论

实际情况中变压器变形类型复杂,结构参数较多且各部分耦合明显。为了系统地分析绕组的电气参数对各种变形的灵敏度,提高灵敏度分析计算速度,本文以某型实际变压器为例,通过引入响应面法,建立显式化的电气参数响应面模型,并结合基

于蒙特卡罗的 Sobol' 全局灵敏度分析法分析了各电气参数对不同变形种类的全局灵敏度,确定了各参数中最能灵敏度反映的变形类型;依据变异系数进一步比较了各电气参数间的灵敏度大小。分析结果表明各电气参数变化与绕组变形类型的内在关系,丰富了绕组变形判据,为进一步研究绕组变形检测方法提供了理论依据和新思路。

参考文献

- [1] 郑含博, 翟进乾, 李哲, 等. 大型电力变压器内绕组辐向抗短路能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 154-158.
ZHENG Hanbo, ZHAI Jinqian, LI Zhe, et al. An assessment of ability to withstand radial short circuit of large power transformer inner windings[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 154-158.
- [2] 李卓昕, 彭敏放, 黄清秀, 等. 行波反射法在变压器绕组匝间短路故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 84-89.
LI Zhuoxin, PENG Minfang, HUANG Qingxiu, et al. Application of the traveling-wave reflection method in inter-turn short fault location for transformer[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 84-89.
- [3] 刘兴平, 陈民铀. 一种配电变压器绕组变形故障的在线监测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 20-26.
LIU Xingping, CHEN Minyou. A novel method on on-line monitoring of winding deformation of transformers[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 20-26.
- [4] 蔡云峰, 徐洋, 潘琪. 基于自定义模型的变压器纵差动保护 PSCAD 仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 118-122.
CAI Yunfeng, XU Yang, PAN Qi. PSCAD simulation of transformer longitudinal differential protection based on custom model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 118-122.
- [5] 王明林, 陈民铀, 赖伟, 等. 一种改进的配电变压器短路电抗在线检测方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 127-132.
WANG Minglin, CHEN Minyou, LAI Wei, et al. Improved method of online measuring for distribution transformer short circuit reactance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 127-132.
- [6] 王泽忠, 潘超, 周盛, 等. 基于棱边有限元的变压器场路耦合瞬态模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 146-152.
WANG Zezhong, PAN Chao, ZHOU Sheng, et al. Transient

- magnetic-circuit coupled model of transformer based on edge finite element method[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2012, 27(9): 146-152.
- [7] 李龙女, 李岩, 井永腾, 等. 电力变压器漏磁场与杂散损耗计算的研究[J]. 电工技术学报, 2013(s2): 122-127. LI Longnü, LI Yan, JING Yongteng, et al. Research of leakage magnetic field and stray loss calculation in power transformer[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2013(s2): 122-127.
- [8] 闫晨光, 郝治国, 张保会, 等. 电力变压器油箱形变破裂建模及仿真[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 180-187. YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Modeling and simulation of power transformer tank deformation and rupture[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2016, 31(3): 180-187.
- [9] 宗周红, 褚福鹏, 牛杰. 基于响应面模型修正的桥梁结构损伤识别方法[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 115-122. ZONG Zhouhong, CHU Fupeng, NIU Jie. Damage identification methods of bridge structures using response surface based on finite element model updating[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 115-122.
- [10] 吕辉, 于德介, 谢展, 等. 基于响应面法的汽车盘式制动器稳定性优化设计[J]. 机械工程学报, 2013, 49(9): 55-60. LÜ Hui, YU Dejie, XIE Zhan, et al. Optimization of vehicle disc brakes stability based on response surface method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(9): 55-60.
- [11] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] 聂祚兴, 于德介, 李蓉, 等. 基于 Sobol' 法的车身噪声传递函数全局灵敏度分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(14): 1753-1757. NIE Zuoxing, YU Dejie, LI Rong, et al. Global sensitivity analysis of autobodies' noise transfer functions based on Sobol' method[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(14): 1753-1757.
- [13] 陆凌云. 基于仿真实验的灵敏度分析方法及工具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. LU Lingyun. Research on sensitivity analysis methods and tool based on simulation experiments[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] 洪伟主. 试验设计与统计分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [15] 李洪奎. 大型电力变压器绕组短路强度与稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011. LI Hongkui. Study of short-circuit strength and stability of windings in large power transformer[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [16] BYLES W E, SWEEN J J. 最优化与工业实验[M]. 谢国瑞, 沈宝欣, 郑汶玉, 译. 上海: 华东化工学院出版社, 1990.
- [17] FLAVIO C. Sensitivity analysis for volcanic source modeling quality assessment and model selection[J]. Computers & Geosciences, 2012, 44: 52-59.
- [18] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2001, 55(1-3): 271-280.

收稿日期: 2017-03-24; 修回日期: 2017-06-19

作者简介:

李妍(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划设计;
周洪伟(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划设计;
沈小伟(1979—), 男, 硕士, 经济师, 研究方向为电网建设。

(编辑 姜新丽)