

基于正交试验的空心线圈偏心误差影响因素敏感性分析

杨世海^{1,2}, 胡 琛³, 焦 洋³, 李红斌³, 赵双双^{1,2}, 陈 刚^{1,2}

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国家电网公司电能计量重点实验室, 江苏 南京 211103; 3. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:空心线圈偏心误差影响变电站保护、测量和计量单元功能的实现。为了研究偏心误差影响因素敏感性, 建立线圈传感模型, 计算理想情况下的线圈互感; 针对绕组均匀和不均匀这 2 种情况, 分析了互感和偏心距离、不均匀度、相对位置的关系, 仿真结果表明如果载流体不偏心, 则不均匀度不会影响偏心误差, 否则偏心误差将随着各影响因素的变化而变化。提出基于正交试验法的影响因素敏感性评价方法, 通过方差分析研究各影响因素的敏感程度, 试验结果表明, 各影响因素对偏心误差均有显著影响, 其中偏心距离的影响程度最大, 不均匀度的影响程度最小。

关键词:空心线圈; 影响因素; 偏心误差; 不均匀度; 相对位置; 正交试验

中图分类号: TM 55

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.030

0 引言

空心线圈具有无磁饱和、线性度好、测量范围大、频带宽等优良特性, 在电力系统及其他工业控制领域得到了诸多应用^[1-4]。理论上, 空心线圈的测量准确度不受载流体位置的影响, 可以实现 0.2 级甚至更高的准确度等级。然而, 一方面, 由于一次载流体振动或者设计工艺等问题, 实际中载流体可能出现偏心的现象; 另一方面, 理想空心线圈不可制造, 由于不含集磁环铁芯, 故空心线圈易受到载流体偏心的影响^[5]。非理想空心线圈的偏心误差将对变电站保护、测量和计量单元的功能实现造成不利影响^[6-8]。研究空心线圈偏心误差的影响因素, 可以为提高空心线圈测量精度的措施提供理论依据。

目前, 相关研究成果主要集中于空心线圈误差和偏心距离的关系。文献[9]分析了一次导体偏离空心线圈中心时, 空心线圈精度的变化, 并对实际空心线圈进行了偏心试验, 得到了电磁屏蔽能够减小偏心误差影响的结论, 但是该研究没有考虑空心线圈绕组不均匀度的影响; 文献[10]推导了插板式空心线圈参数的计算方法, 给出了偏心误差的计算公式, 然而该研究同样没有计及绕组不均匀度的影响。近年来, 一些学者研究了一次导体位置变动对非理想空心线圈性能的影响, 得到了理论情况下一次导体位置变动引起的误差^[11-12], 但是这些研究没有对

空心线圈偏心误差影响因素的敏感性进行深入解析, 对各个影响因素的作用程度还不够明确。另一方面, 由于空心线圈偏心误差的影响因素较多, 且各个影响因素之间交互作用, 要区分各个影响因素的作用程度也非常复杂^[13-14]。

正交试验法是实现多影响因素作用重要性分析的手段之一, 被广泛应用于电气、煤炭、生物等领域^[15-17], 可用于空心线圈偏心误差影响因素敏感性的分析。本文首先提出了空心线圈的传感模型, 给出理想情况下空心线圈的互感系数; 然后研究空心线圈偏心误差, 并分析各个误差的影响因素; 最后设计了正交试验方法, 通过统计分析对偏心误差的影响因素进行敏感性分析。

1 空心线圈传感模型

空心线圈的传感方式基于全电流定律和法拉第电磁感应定律, 通过感知由一次电流产生的穿过线圈的磁场, 在线圈两端感应电压信号, 根据电压信号重构一次电流信息。

空心线圈的基本等效电路如图 1 所示。图中, i 为一次电流; i_s 为二次电流; u_o 为空心线圈二次输出; L_p 为载流体自感; L_s 为线圈自感; M 为载流体和线圈之间的互感; R_s 为线圈电阻; R_b 为负载电阻; C 为线圈分布电容。

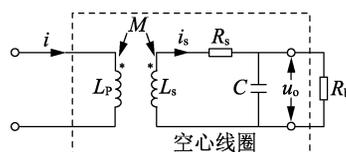


图 1 空心线圈基本等效电路

Fig.1 Basic equivalent circuit of air-core coil

在工频测量场合, 一般不计及分布电容的影响, 当 $R_b \gg L_s$ 时, 空心线圈的输出可以近似为:

收稿日期: 2017-05-25; 修回日期: 2018-05-11

基金项目: 国家电网公司科技项目(智能变电站电子式互感器复杂环境下运行性能评估关键技术研究)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC (Research on the Key Technologies of Operational Performance Evaluation for Electronic Transformers under Complex Environment in Smart Substation)

$$U_o(s) \approx \frac{R_b M_s}{R_s + R_b} i(s) \quad (1)$$

由式(1)可见,空心线圈输出和互感系数 M 以及一次电流对时间的微分成正比,只要对 $U_o(s)$ 做积分运算即可还原一次电流 i 。另一方面, i 、 R_s 、 R_b 不会受载流体偏心的影响,故空心线圈偏心误差实质上可等效为载流体偏心对互感的影响。

矩形截面的空心线圈性能稳定、易于制作、使用广泛,其几何结构示意图如图2所示。图中, r_1 为线圈绕组内壁和圆心之间的距离; r_2 为线圈绕组外壁和圆心之间的距离; h 为线圈的高度。空心线圈的互感受线圈尺寸、结构以及一次载流体位置的影响。当空心线圈满足理想空心线圈的条件(截面均匀、绕组分布均匀)时,有以下关系式成立:

$$\begin{cases} B = \frac{\mu_0 i}{2\pi x} \\ \phi_1 = NBS = NBh \int_{r_1}^{r_2} dx \\ M_1 = \frac{\phi_1}{i} \end{cases} \quad (2)$$

其中, μ_0 为真空磁导率; x 为距离载流体中心的距离; ϕ_1 为穿过线圈的磁链; N 为线圈匝数; S 为线圈截面积。根据式(2)可以求得理想情况下空心线圈互感 M_1 为:

$$M_1 = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3)$$

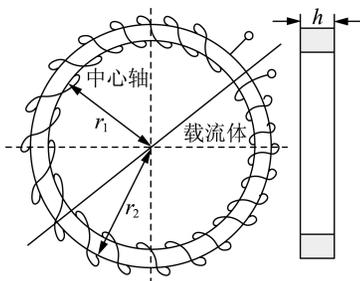


图2 空心线圈几何结构

Fig.2 Geometrical structure of air-core coil

2 空心线圈偏心误差影响因素

实际应用中,空心线圈要实现绕组均匀分布是非常困难的,首先由于线圈制作工艺的局限性,空心线圈各绕组很难做到均匀分布;其次即使线圈通过数字印刷板设计技术实现了精确制造^[18],但是在线圈的第一匝和最后一匝之间由于要接入线圈负载,绕组必然存在不连续性。为了深入解析空心线圈偏心误差的影响因素,本节区分线圈绕组均匀和绕组不均匀2种情况,研究空心线圈的偏心误差及其影响因素。

2.1 绕组均匀情况下线圈误差

首先研究载流体偏心且绕组均匀情况下空心线圈互感的变化,磁场计算示意图如图3所示。图中, d 为偏心距离; r 、 x_1 、 θ 、 δ 的定义见图3; B 为电流产生的平均磁感应强度; B_1 为在线圈切向方向的磁感应强度。

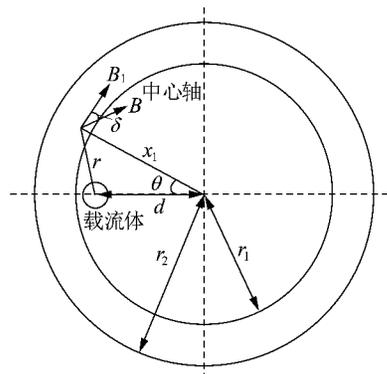


图3 绕组均匀情况下空心线圈示意图

Fig.3 Schematic diagram of air-core coil with even windings

根据安培环路定理以及图3中的几何关系,可以得到:

$$\begin{cases} B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \\ r = \sqrt{x_1^2 + d^2 - 2x_1 d \cos \theta} \\ B_1 = B \cos \delta \\ \cos \delta = \frac{r^2 + x_1^2 - d^2}{2rx_1} \\ \phi_2 = NB_1 S = NB_1 h \int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_0^{2\pi} d\theta \\ M_2 = \frac{\phi_2}{i} \end{cases} \quad (4)$$

其中, ϕ_2 为此时穿过线圈的磁链; M_2 为线圈的互感器系数,由式(4)求得空心线圈互感如式(5)所示。

$$M_2 = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_0^{2\pi} \frac{x_1 - d \cos \theta}{x_1^2 + d^2 - 2x_1 d \cos \theta} dx_1 d\theta \quad (5)$$

化简式(5)可以得到:

$$M_2 = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{x_1} dx_1 \quad (6)$$

再求解式(6)所示积分,得到载流体偏心绕组均匀情况下空心线圈的互感为:

$$M_2 = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

比较式(3)和式(7)可见:只要空心线圈的绕组均匀分布,即使载流体出现偏心情况,空心线圈的互感也不发生变化,即没有测量误差。

2.2 绕组不均匀情况下线圈误差

本节考虑载流体偏心且绕组不均匀情况下空心

线圈互感的误差。为了简化分析,假设空心线圈不均匀绕组部分集中在图 4 所示的一个弧度为 α 的阴影区域,下文用 α 表示线圈的不均匀度。当载流体所在平面和均匀绕组所在平面的相对位置为 τ 时,磁场求解依然可按照 2.1 节的思路,但此时沿线圈的积分路径不再是 2π ,而为 $\tau+\alpha/2\sim 2\pi+\tau-\alpha/2$ 。根据安培环路定理以及图 4 所示的几何关系可以得到:

$$\begin{cases} B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \\ B_2 = B \cos \delta \\ \cos \delta = \frac{r^2 + x_1^2 - d^2}{2rx_1} \\ r^2 = x_1^2 + d^2 - 2x_1 d \cos \theta \\ \phi_3 = NB_2 S = B_2 h \frac{N}{2\pi - \alpha} \int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_{\tau+\frac{\alpha}{2}}^{2\pi+\tau-\frac{\alpha}{2}} d\theta \\ M_3 = \frac{\phi_3}{i} \end{cases} \quad (8)$$

其中, ϕ_3 为此时穿过线圈的磁链; M_3 为线圈的互感器系数,化简式 (8) 可以得到载流体偏心且绕组不均匀情况下空心线圈的互感 M_3 ,如式 (9) 所示。

$$\begin{aligned} M_3 = \frac{\mu_0 N h}{4\pi(2\pi - \alpha)} & \left[\int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{x_1} dx_1 \int_{\tau+\frac{\alpha}{2}}^{2\pi+\tau-\frac{\alpha}{2}} d\theta + \right. \\ & \int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_{\tau+\frac{\alpha}{2}}^{2\pi+\tau-\frac{\alpha}{2}} \frac{x_1}{x_1^2 + d^2 - 2x_1 d \cos \theta} d\theta + \\ & \left. \int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_{\tau+\frac{\alpha}{2}}^{2\pi+\tau-\frac{\alpha}{2}} \frac{d^2}{x_1(x_1^2 + d^2 - 2x_1 d \cos \theta)} d\theta \right] \quad (9) \end{aligned}$$

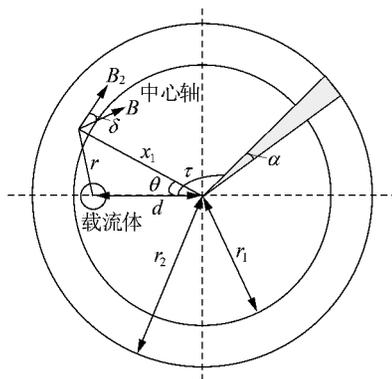


图 4 绕组不均匀情况下空心线圈示意图

Fig.4 Schematic diagram of air-core coil with uneven winding

实际中考虑制造工艺或制造水平的问题,空心线圈可能存在多个不均匀区域。图 5 中的阴影区域表示空心线圈的 2 个不均匀区域,且不均匀度均为 α ,载流体平面和 2 个不均匀绕组所在平面的相对位置分别为 τ_1, τ_2 时,积分路径分别改变为 $\tau_1+\alpha/2\sim \tau_2$ 以及 $\tau_2+\alpha\sim 2\pi+\tau_1-\alpha/2$,从而可得到以下关系:

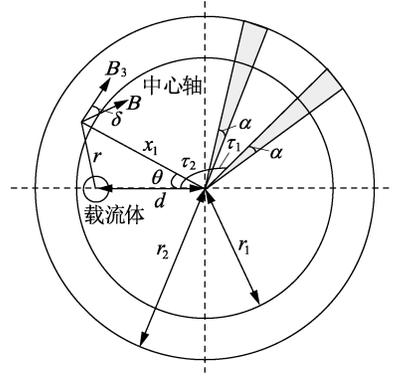


图 5 存在 2 个绕组不均匀情况下空心线圈示意图

Fig.5 Schematic diagram of air-core coil with two uneven windings

$$\begin{cases} B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \\ B_3 = B \cos \delta \\ \cos \delta = \frac{r^2 + x_1^2 - d^2}{2rx_1} \\ r^2 = x_1^2 + d^2 - 2x_1 d \cos \theta \\ \phi_4 = NB_3 S = B_3 h \frac{N}{2\pi - \alpha} \int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_{\tau_1+\frac{\alpha}{2}}^{\tau_2} d\theta + \\ \quad B_3 h \frac{N}{2\pi - \alpha} \int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_{\tau_2+\alpha}^{2\pi+\tau_1-\frac{\alpha}{2}} d\theta \\ M_4 = \frac{\phi_4}{i} \end{cases} \quad (10)$$

其中, ϕ_4 为此时穿过线圈的磁链; M_4 为线圈的互感器系数,化简式 (10) 可得到此时线圈互感 M_4 如式 (11) 所示。

$$\begin{aligned} M_4 = \frac{\mu_0 N h}{2\pi(2\pi - \alpha)} & \times \\ & \left[\int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_{\tau_1+\frac{\alpha}{2}}^{\tau_2} \frac{x_1^2 + d^2 - x_1 d \cos \theta}{x_1(x_1^2 + d^2 - 2x_1 d \cos \theta)} d\theta + \right. \\ & \left. \int_{r_1}^{r_2} dx_1 \int_{\tau_2+\alpha}^{2\pi+\tau_1-\frac{\alpha}{2}} \frac{x_1^2 + d^2 - x_1 d \cos \theta}{x_1(x_1^2 + d^2 - 2x_1 d \cos \theta)} d\theta \right] \quad (11) \end{aligned}$$

由式 (9) 和式 (11) 可见:当绕组分布不均匀且载流体出现偏心现象时,空心线圈互感不再等于式 (3) 的计算结果,两者之间的误差 e 定义如式 (12) 所示。

$$e = \frac{M_4 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (12)$$

2.3 影响因素分析

当线圈结构参数固定而绕组分布不均匀时,空心线圈偏心误差的影响因素包括 3 个因素:载流体偏心距离 d ;空心线圈绕组不均匀度 α (以下简称为不均匀度);载流体和不均匀绕组的相对位置 τ_1 以

及 τ_2 (以下简称为相对位置, 为了简化分析, 固定 $\tau_2 = 90^\circ$)。

假设空心线圈的尺寸参数如下: 内半径 $r_1 = 40$ mm, 外半径 $r_2 = 60$ mm, 厚度 $h = 20$ mm; 线圈匝数 $N = 500$ 匝。固定不均匀度 $\alpha = 0.5^\circ$, 载流体偏心距离 d 在 $0 \sim 0.8r_1$ 范围内变化、相对位置 τ_1 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内变化时, 空心线圈偏心误差 e 和偏心距离、相对位置的关系如图 6 所示。

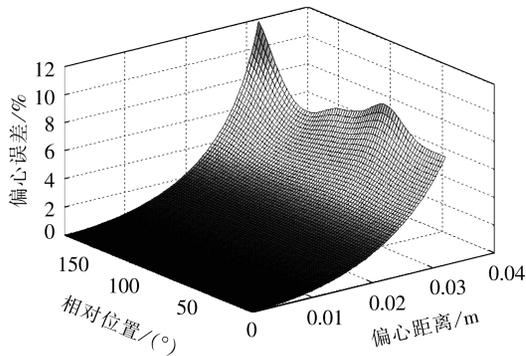


图 6 偏心误差和偏心距离、相对位置的关系

Fig.6 Relationship among eccentricity error, eccentric distance and relative position

当固定载流体偏心距离 $d = 0.25r_1$ 、不均匀度 α 在 $0.1^\circ \sim 1^\circ$ 范围变化、相对位置 τ_1 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内变化时, 空心线圈偏心误差 e 和不均匀度、相对位置的关系如图 7 所示。

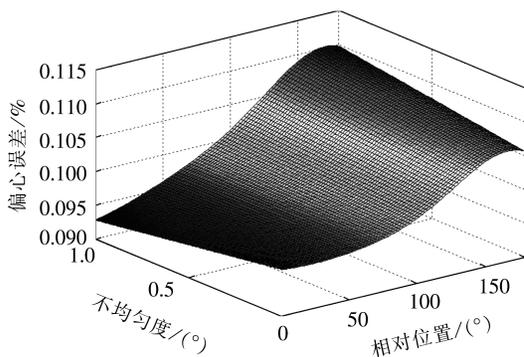


图 7 偏心误差和不均匀度、相对位置的关系

Fig.7 Relationship among eccentricity error, inhomogeneity and relative position

当固定相对位置 $\tau_1 = 0^\circ$ 、载流体偏心距离 d 在 $0 \sim 0.8r_1$ 范围内变化、不均匀度 α 在 $0.1^\circ \sim 1^\circ$ 范围内变化时, 偏心距离、不均匀度对空心线圈偏心误差 e 的影响如图 8 所示。

根据以上理论分析及仿真结果可知: 当线圈不均匀度 α 固定时, 偏心距离 d 越大, 则偏心误差越大, 如果不偏心, 相对位置不会对偏心误差造成影响; 当偏心距离 d 固定时, 偏心误差在相对位置 168° 附近出现最大值, 最大相对误差约为 0.18% ; 当相对位置 τ_1 固定时, 偏心距离越大, 则偏心误差越大, 如果不偏心, 不均匀度不会对偏心误差造成影响。

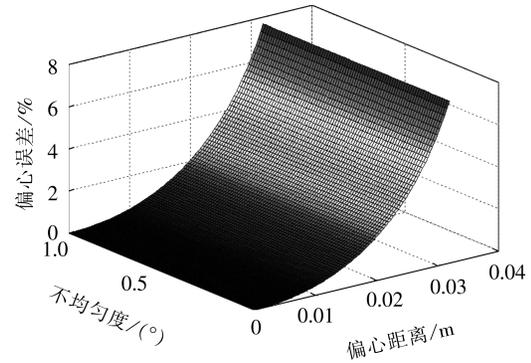


图 8 偏心误差和偏心距离、不均匀度的关系

Fig.8 Relationship among eccentricity error, eccentric distance and inhomogeneity

3 影响因素敏感性分析

本节分析偏心距离、不均匀度和相对位置这 3 个主要影响因素对空心线圈偏心误差的影响程度。由于影响因素较多, 且各影响因素存在相互作用, 如果逐个方案试验, 则试验次数较多, 数据处理复杂。为此, 本文基于正交试验法, 以偏心误差为指标, 通过正交试验表确定试验方案, 对 3 个影响因素的敏感程度进行分析。

3.1 正交试验方案

设计了一个矩形截面空心线圈, 样品骨架尺寸为 $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (内径 \times 外径 \times 厚度), 线圈由 0.5 mm 漆包铜线绕成, 匝数 $N = 500$ 匝, 线圈的变比为 $100 \text{ A}/4 \text{ V}$ 。测试系统原理图如图 9 所示, 在额定电流 100 A 情况下, 将空心线圈输出和标准电磁式互感器 (TA) 输出接至电子式互感器校验仪^[19], 标准电流转换器包括一个 $5 \text{ A}/0.05 \text{ A}$ 的小互感器以及一个 10Ω 高精度的无感电阻, 0.02 级标准 TA 变比为 $100 \text{ A}/5 \text{ A}$ 。空心线圈输出经过积分环节^[20]后, 和标准 TA 的数据同时被 NI PCI-4474 采集卡采集, 采集卡将采集后的数字信号通过 RTSI 接口发送给上位机, 上位机基于 LabVIEW 环境^[21] 实现数据基波分量的提取、空心线圈误差计算、结果显示等功能。

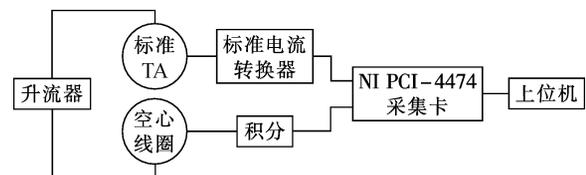


图 9 测试系统原理图

Fig.9 Schematic diagram of testing system

由前文理论分析可知, 空心线圈偏心误差有 3 个影响因素, 本试验中每个影响因素选取了 5 个水平值, 本试验为 3 因素 5 水平试验。正交试验方案首先需要明确影响因素的水平值。试验过程中, 偏心距离和相对位置通过调整载流体位置进行改变,

不均匀度通过改变绕组匝数的方式进行调节。对于偏心距离而言,由仿真结果可知,偏心距离越大,则误差越大,为了得到显著的试验结果,应当尽量增大偏心距离,又考虑到空心线圈内径(40 mm)的约束,偏心距离调整范围在 4~32 mm 之间,本试验选择 4 mm、10 mm、16 mm、22 mm、32 mm 这 5 个水平;对于相对位置而言,由于对称性,只需要考虑 0°~180°水平,而 180°~360°的结果和 0°~180°一致,本试验选取 0°、45°、90°、135°、180°这 5 个水平;对于不均匀度而言,虽然实际运行过程中不均匀度非常小(如前文数值仿真选取的 1°),但是一方面为了得到更大的空心线圈输出,有利于减少采集卡的量化误差以及上位机计算误差,另一方面 1°的不均匀度难以控制,故试验中增大了不均匀度水平,本试验选取了 0°~60°区间内的 0°、15°、30°、45°、60°这 5 个水平。表 1 列出了各影响因素的水平值。

表 1 影响因素水平值

Table 1 Level values of influencing factors

| 影响因素 | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| d/mm | 4 | 10 | 16 | 22 | 32 |
| $\tau/(\text{°})$ | 0 | 45 | 90 | 135 | 180 |
| $\alpha/(\text{°})$ | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 |

采用 $L_{25}(5 \wedge 6)$ 正交试验表进行正交试验方案设计,试验方案如表 2 所示,其中空列表示没有影响因素作用,反映随机因素引起的误差。以此为依据建立各影响因素的试验方案,试验计算结果如表 3 所示。表中, K_{jl} 为第 $j(j=2,3,4,5)$ 列中影响因素相应于 l 水平的 5 个试验结果之和,记:

$$K = \sum_{l=1}^5 K_{jl} \quad (13)$$

其中, K 为全体试验结果之和,与列数无关。又令:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{25} K^2 \\ Q_j = \frac{1}{5} \sum_{l=1}^5 K_{jl}^2, S_j = Q_j - P \\ Q = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^{25} Y_i^2, S_i = Q - P \end{cases} \quad (14)$$

其中, Y_i 为各次试验结果。由式(14)可以得到:

$$S_i = \sum_{j=2}^5 S_j \quad (15)$$

3.2 方差分析

根据正交试验理论,对表 2 中 25 次试验的结果进行方差分析,各中间变量计算结果见表 4。表中,平方和为式(14)中的 S_j ,偏差的平方和与空列 S_i 之和对应;自由度由影响因素所取的水平数减 1 得到;均方和为平方和除以自由度后的值; F 值由各影响因素的均方和除以偏差均方和得到。

表 2 正交试验方案表

Table 2 Schemes of orthogonal test

| 试验序号 | 影响因素水平值 | | | | 空心线圈误差/% |
|------|---------|----------|--------|----|----------|
| | d | α | τ | 空列 | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.078 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1.052 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 1.326 |
| 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 3.041 |
| 5 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5.447 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 3 | 0.833 |
| 7 | 2 | 2 | 3 | 4 | 1.117 |
| 8 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5.332 |
| 9 | 2 | 4 | 5 | 1 | 4.399 |
| 10 | 2 | 5 | 1 | 2 | 4.290 |
| 11 | 3 | 1 | 3 | 5 | 3.410 |
| 12 | 3 | 2 | 4 | 1 | 4.010 |
| 13 | 3 | 3 | 5 | 2 | 3.791 |
| 14 | 3 | 4 | 1 | 3 | 2.064 |
| 15 | 3 | 5 | 2 | 4 | 3.332 |
| 16 | 4 | 1 | 4 | 2 | 2.023 |
| 17 | 4 | 2 | 5 | 3 | 7.929 |
| 18 | 4 | 3 | 1 | 4 | 2.625 |
| 19 | 4 | 4 | 2 | 5 | 8.101 |
| 20 | 4 | 5 | 3 | 1 | 6.875 |
| 21 | 5 | 1 | 5 | 4 | 6.848 |
| 22 | 5 | 2 | 1 | 5 | 6.697 |
| 23 | 5 | 3 | 2 | 1 | 5.495 |
| 24 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3.512 |
| 25 | 5 | 5 | 4 | 3 | 7.969 |

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal test

| 变量 | 数值 | | | |
|----------|---------|----------|----------|--------|
| | d | α | τ | 空列 |
| K_{j1} | 10.944 | 13.191 | 15.754 | 20.856 |
| K_{j2} | 15.972 | 20.806 | 18.813 | 14.668 |
| K_{j3} | 23.417 | 20.116 | 18.351 | 13.449 |
| K_{j4} | 27.554 | 21.118 2 | 22.375 5 | 16.963 |
| K_{j5} | 30.520 | 27.913 | 28.414 7 | 28.987 |
| K | 101.59 | | | |
| P | 412.87 | | | |
| Q_j | 468.274 | 435.361 | 434.782 | 436.61 |
| S_j | 55.395 | 22.483 | 21.903 | 23.732 |
| Q | 551.89 | | | |
| S_i | 139.01 | | | |

表 4 方差分析结果

Table 4 Results of variance analysis

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方和 | F | 显著性 |
|------|---------|-----|--------|-------|-----|
| 偏心距离 | 55.395 | 4 | 13.849 | 7.022 | * |
| 不均匀度 | 22.483 | 4 | 5.621 | 2.769 | (*) |
| 相对位置 | 21.903 | 4 | 5.476 | 2.842 | (*) |
| 偏差 | 23.732 | 12 | 1.978 | — | — |
| 总和 | 139.014 | 24 | — | — | — |

假设各影响因素对空心线圈偏心误差影响不显著,查表可得 F 的临界值为:

$$\begin{cases} F_{0.90}(4, 12) = 2.480 \\ F_{0.95}(4, 12) = 3.260 \end{cases} \quad (16)$$

其中, $F_{0.90}(4, 12)$ 和 $F_{0.95}(4, 12)$ 分别为显著性水平 0.1 和显著性水平 0.05 时的临界值;“显著性”一列符号“(*)”、“*”分别表示在显著性水平 0.1、0.05 下检验的结果是拒绝原假设的,即该因素所处水平对空心线圈误差情况的影响显著。根据 F 分布检验结果得到如下结论:

a. 偏心距离对空心线圈误差情况的影响最显著,不均匀度和相对位置对空心线圈误差情况的影响比较显著;

b. 对比不均匀度和相对位置因素的 F 值可得,3 个因素中不均匀度对空心线圈误差情况的影响程度最小;

c. 为了控制空心线圈偏心误差,应优先保证导体中心与线圈中心的一致性。

4 结论

a. 绕组均匀的情况下,即使载流体出现偏心情况,空心线圈也不会产生误差;

b. 绕组不均匀的情况下,偏心距离、不均匀度、相对位置将影响空心线圈偏心误差;

c. 3 个影响因素对偏心误差均有显著影响(0.1 显著性水平),其中偏心距离对空心线圈误差的影响程度最大,其次为相对位置,不均匀度的影响程度最低,实际运行过程中应考虑固定载流体位置以减小偏心误差;

d. 结构参数对空心线圈偏心误差也有较大的影响,但是由于试验中线圈结构参数(内径、外径、厚度)难以调整,故本文没有计及结构参数的影响。今后的研究中将考虑利用 PCB 制作技术生产多种不同规格的空心线圈,分析结构参数的影响程度。

参考文献:

- [1] 李振华,王忠东,卢树峰,等. 基于空心线圈互感系数自校验原理的大电流校验系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2335-2342.
LI Zhenhua, WANG Zhongdong, LU Shufeng, et al. Heavy current calibration system based on self-calibrating of mutual inductance of air-core coil[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2335-2342.
- [2] 王永强,谢军,律方成,等. 基于复合积分罗氏线圈的过电压监测方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1450-1455.
WANG Yongqiang, XIE Jun, LÜ Fangcheng, et al. An overvoltage monitoring method based on composite integral Rogowski coil[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1450-1455.
- [3] 刘志恒,段雄英,廖敏夫,等. 罗氏线圈电子式电流互感器积分特性研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 191-196.
LIU Zhiheng, DUAN Xiongying, LIAO Minfu, et al. Reserach on integral characteristic of ECT with Rogowski coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 191-196.
- [4] RAMBOZ J D. Machinable Rogowski coil, design, and calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 511-515.
- [5] SAMIMI M H, MAHARI A, FARAHNAKIAN M A, et al. The Rogowski coil principles and applications: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 651-658.
- [6] 何瑞文,蔡泽祥,王奕,等. 空心线圈电流互感器传变特性及其对继电保护的适应性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1471-1476.
HE Ruiwen, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Analysis on transfer characteristics of air-core current transformer and its adaptability to relay protection[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1471-1476.
- [7] RAY W F, HEWSON C R. High performance Rogowski current transducers[C] // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Rome, Italy: IEEE, 2000: 3083-3090.
- [8] LUO P, LI Z, LI H, et al. A high-current calibration system based on indirect comparison of current transformer and Rogowski coil[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 52(24): 5005.
- [9] 池立江,刘伟,冉允喜. 一次导体偏心对罗氏线圈的干扰研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 67-71.
CHI Lijiang, LIU Wei, RAN Yunxi. Research on the interference of primary conductor eccentricity to the Rogowski coil[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 67-71.
- [10] 王黎明,贺旭. 插板式 PCB Rogowski 线圈的计算与仿真[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1025-1033.
WANG Liming, HE Xu. Calculation and simulation of PCB-based Rogowski coil[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1025-1033.
- [11] FERKOVI Ć L, ILI Ć D, MALARIĆ R. Mutual inductance of a precise Rogowski coil in dependence of the position of primary conductor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(1): 122-128.
- [12] 王程远,陈幼平,张冈,等. PCB 空心线圈位置误差分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 103-108.
WANG Chengyuan, CHEN Youping, ZHANG Gang, et al. Analysis and control on the position errors of PCB air-core coil[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 103-108.
- [13] MARRACCI M, TELLINI B, ZAPPACOSTA C, et al. Critical parameters for mutual inductance between Rogowski coil and primary conductor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(2): 625-632.
- [14] FERKOVI Ć L, ILI Ć D, LENIĆEK I. Influence of axial inclination of the primary conductor on mutual inductance of a precise Rogowski coil[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(11): 3045-3054.
- [15] 翟国富,梁慧敏,王喙,等. 基于正交试验设计的极化磁系统参数优化设计方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 158-163.
ZHAI Guofu, LIANG Huimin, WANG Hao, et al. Research on the parameters optimum design of polarized magnetic system based on orthogonal design[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 158-163.
- [16] 王其亚,翟国富,程贤科,等. 基于正交试验设计的电磁继电器关键调整参数及优化方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 53-58.
WANG Qiya, ZHAI Guofu, CHENG Xianke, et al. Key adjusted parameters and optimum method of electromagnetic relay based on or-

thogonal experimental design [J]. Transactions of China Electrotechnological Society, 2009, 24(10): 53-58.

- [17] 刘伟韬,刘士亮,姬保静. 基于正交试验的底板破坏深度主控因素敏感性分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 1995-2001.
LIU Weitao, LIU Shiliang, JI Baojing. Sensitivity analysis of controlling factors on failure depth of floor based on orthogonal experiment [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 1995-2001.
- [18] 韩小涛,黄澜涛,孙文文,等. 基于 PCB 空心线圈和数字积分器的脉冲强磁场装置放电电流测量[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 13-19.
HAN Xiaotao, HUANG Lantao, SUN Wenwen, et al. Discharge current measurement of pulsed high magnetic field facility based on PCB air-core coil and digital integrator [J]. Transactions of China Electrotechnological Society, 2012, 27(12): 13-19.
- [19] 程含渺,李红斌,陈刚,等. 模拟量输入合并单元无同步信号校验技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2338-2344.
CHENG Hanmiao, LI Hongbin, CHEN Gang, et al. Calibration technique in the absence of synchronization signals for merging unit with analogue input [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2338-2344.
- [20] LUO P, LI H, LI Z. Two high accuracy digital integrators for Rogowski current transducers [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(1): 015102.
- [21] ZHANG M, LI K, WANG J, et al. An on-site calibration system for electronic instrument transformers based on LabVIEW [J]. Metrology and Measurement Systems, 2014, 21(2): 257-270.

作者简介:



杨世海

杨世海(1976—),男,安徽淮北人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电子式互感器、数字化电能计量(**E-mail**: ysh.young@163.com);

胡琛(1986—),男,江西南昌人,博士研究生,研究方向为电子式互感器评估、数字电能计量系统仿真平台(**E-mail**: huchena@126.com);

焦洋(1992—),男,湖北荆州人,博士研究生,研究方向为电子式互感器、数字电能计量系统(**E-mail**: 406381119@qq.com);

李红斌(1967—),女,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电子式互感器、数字化电能计量、大数据应用(**E-mail**: lihongbin@hust.edu.cn);

赵双双(1986—),女,江苏徐州人,高级工程师,博士,研究方向为电子式互感器、数字化电能计量(**E-mail**: zju_samira@163.com);

陈刚(1984—),男,湖北黄梅人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电子式互感器、数字化电能计量(**E-mail**: cg09_jseprc@sina.com)。

Sensitivity analysis on influencing factors of eccentricity error of air-core coil based on orthogonal test

YANG Shihai^{1,2}, HU Chen³, JIAO Yang³, LI Hongbin³, ZHAO Shuangshuang^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Key Laboratory of Energy Metering, Nanjing 211103, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The eccentricity error of air-core coil affects the function realization of protection, measurement and metering units in substations. In order to study the sensitivity of eccentricity error's influencing factors, the sensing model of coil is established and the mutual inductance of coil in the ideal condition is calculated. The relationships between the mutual inductance and the eccentric distance, the inhomogeneity and the relative position are analyzed under the conditions of even windings and uneven windings. The simulative results show that, if the conductor is not deviating from the center, the inhomogeneity has no effects on the eccentricity error, otherwise, the error will vary with the change of each influencing factor. A sensitivity evaluation method of influencing factors is proposed based on the orthogonal test, which analyzes the sensitivity of each influencing factor by variance analysis. The results of tests show that the influencing factors all have significant effects on the eccentricity error, and the influence degree of the eccentric distance is the largest, while that of the inhomogeneity is the least.

Key words: air-core coil; influencing factors; eccentricity error; inhomogeneity; relative position; orthogonal test