

# 基于短路阻抗及 $\Delta U-I_1$ 轨迹特征联合分析的 变压器绕组变形故障在线检测方法

李振华<sup>1,2</sup>, 蒋伟辉<sup>1</sup>, 喻彩云<sup>1</sup>, 陈兴新<sup>1</sup>, 李振兴<sup>1</sup>, 徐艳春<sup>1</sup>

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为解决短路阻抗法不能进行故障类型识别及其与 $\Delta U-I_1$ 轨迹法均易受设备测量误差干扰的问题,提出了基于短路电抗及 $\Delta U-I_1$ 轨迹特征联合分析的绕组变形在线检测方法。介绍了在线短路阻抗法的原理,并根据互感器测量误差的短时不变性提出了减小测量误差的计算方法。介绍了 $\Delta U-I_1$ 轨迹法的原理,然后给出基于短路阻抗及 $\Delta U-I_1$ 轨迹特征联合分析的变压器绕组变形在线检测步骤和判据。通过建立变压器的仿真模型,对所提方法的有效性及考虑测量误差时的准确性进行了验证。结果表明,所提方法能在考虑测量误差时准确识别变压器的绕组变形故障,具有工频带电监测和故障类型识别的优点,提高了绕组变形故障识别的精度。

**关键词:**电力变压器;绕组变形;短路阻抗; $\Delta U-I_1$ 轨迹;在线检测

**中图分类号:**TM 407

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202104028

## 0 引言

电力变压器是电力系统中最昂贵的资产之一,一旦发生损坏,将会造成较大的经济损失<sup>[1-3]</sup>。轻度的绕组变形是指绕组仍能保持正常运行的不明显变形,但其随着故障程度的增加可能会导致绕组绝缘损坏或机械强度降低并破坏变压器的正常工作状态<sup>[4]</sup>。因而,及时准确地对任何轻度的绕组变形故障进行监测并预警,能有效避免绕组进一步的损坏。

随着智能电网技术的快速发展,深入应用与发展电力设备故障在线诊断技术已是必然趋势。因此,传统的变压器绕组变形故障离线诊断技术已经不符合智能电网的发展趋势。为实现变压器绕组变形故障的在线诊断,学者们进行了大量的研究<sup>[5-12]</sup>。文献[5-6]提出了基于短路阻抗在线参数辨识的在线短路阻抗法;文献[7-8]提出了通过电容和电感耦合将扫频信号注入变压器套管抽头的在线频率响应法;文献[9-10]提出了基于变压器油箱振动信号分析的振动检测法;文献[11-12]提出了基于变压器一、二次侧电压和电流测量数据的 $\Delta U-I_1$ 轨迹特征分析法。振动检测法虽然具有较好的应用前景,但传感器精度、传感器价格以及电磁干扰等因素限制了该方法目前在现场中的应用。在线频率响应法虽然也实现了绕组变形故障的在线诊断,但其缺点在

于需要专业人员对绕组故障类型和程度进行评估,且频响曲线可能会受到杂散电容以及绝缘套管特性的影响<sup>[13]</sup>。在线短路阻抗法及 $\Delta U-I_1$ 轨迹特征分析法最大的优势是在工频条件下进行的,不需要额外的设备或传感器。但这2种方法均依赖测量设备的准确度,设备的测量误差将不可避免地对结果造成一定的影响,且在线短路阻抗法仅依靠短路阻抗单一的变化规律,难以进行绕组故障类型的识别,且诊断灵敏度较低。

本文将在线短路阻抗法及改进后的 $\Delta U-I_1$ 轨迹特征分析法相结合,提出一种基于短路阻抗及 $\Delta U-I_1$ 轨迹特征联合分析的变压器绕组变形故障在线检测方法。该方法不需要增加额外的设备,具备工频带电检测以及可识别故障类型的优点,弥补了仅依靠在线短路阻抗法不能进行故障类型识别的不足。同时,根据测量误差的短时不变性及短路阻抗与 $\Delta U-I_1$ 轨迹的变化规律,提出了减小互感器测量误差的方法,能够有效减少互感器测量误差导致的误判。

## 1 在线短路阻抗法原理及减小互感器测量误差的方法

### 1.1 短路阻抗的在线测量

在理想情况下,将变压器二次侧归算到一次侧后的单相变压器T型等效电路如图1所示<sup>[14]</sup>。图中, $U_1$ 、 $U_2$ 和 $I_1$ 、 $I_2$ 分别为变压器一、二次侧的电压和电流; $U_d$ 为变压器端口一、二次侧的电压差; $R_1$ 、 $R_2$ 和 $X_1$ 、 $X_2$ 分别为变压器一、二次侧的电阻和电抗; $R_m$ 、 $X_m$ 分别为励磁支路的电阻、电抗; $I_m$ 为励磁电流。

收稿日期:2020-07-03;修回日期:2021-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507091);三峡大学学位论文培优基金资助项目(2020SSPY052)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51507091) and the Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University(2020SSPY052)

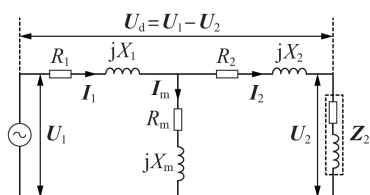


图1 单相变压器T型等效电路

Fig.1 T-type equivalent circuit of single-phase transformer

在工程实际中,考虑到励磁支路的阻抗  $R_m + jX_m$  相对较大,通常认为  $I_m = 0$ ,从而有  $I_1 = I_2$ 。由图1所示的等效电路模型可得:

$$U_1 - U_2 = U_d = I_1(R_1 + jX_1) + I_2(R_2 + jX_2) \quad (1)$$

由于  $I_1 = I_2$ ,故变压器的短路阻抗  $Z_k$  可表示为:

$$Z_k = (U_1 - U_2) / I_1 = R_1 + R_2 + j(X_1 + X_2) \quad (2)$$

式(2)所得结果的虚部即为变压器的短路电抗值,绕组短路电抗的大小与绕组的尺寸和布置有着直接的关系。若变压器绕组正常,则短路电抗保持不变或变化很小(与出厂数据相比);当变压器存在一定程度的绕组变形故障时,则利用式(2)计算得到的短路电抗值就会发生改变。

该方法同样适用于三绕组变压器,如在Y形连接的绕组中,相电压可以通过将线电压的幅值除以  $\sqrt{3}$  并将其相位角减去  $30^\circ$  计算得到。

## 1.2 减小测量误差的方法

短路阻抗的在线计算依赖于变压器一、二次侧电压和电流数据的采集。在现场应用中,采集变压器运行数据的设备为互感器。互感器在长期运行过程中不可避免地受到环境变化、电磁干扰和设备故障等因素的影响,其准确度可能会显著降低。因此,短路电抗的计算精度也会受到测量误差的影响,这也是在线短路阻抗法在实际应用中准确性不高的主要原因。文献[15]分析了在短路电抗参数辨识过程中存在的各种误差问题,测量误差最严重时的电抗计算误差达到了3.25%,这会对绕组变形故障的判断造成严重的干扰。为解决这个问题,本文根据互感器测量误差在较短采样时间内变化较小的特点,提出了一种减小互感器测量误差的方法,理论分析如下。

根据文献[16]的研究,互感器总的测量误差主要由自由噪声组成的随机误差  $v_i$ 、系统误差  $s_i$  以及部件工作异常造成的测量偏差  $f_i$  构成,其中  $t$  为时间。即由互感器所测得的数据  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $I_1$  均可以表示为  $x_i + v_i + s_i + f_i$  的形式,其中  $x_i$  为  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $I_1$  的真实值。因此变压器端口一、二次侧的电压差  $U_d$  和一次侧电流  $I_1$  的真实值可以表示为:

$$\begin{cases} U_d = U_1 - U_2 = U_d^* - v_{ut} - s_{ut} - f_{ut} \\ I_1 = I_1^* - v_{it} - s_{it} - f_{it} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $U_d^*$  为根据互感器得到的一、二次侧电压测量值计算得到的电压差;  $I_1^*$  为电流互感器测得的一次侧电流;  $v_{ut}$ 、 $s_{ut}$  和  $f_{ut}$  分别为电压差测量的随机误差、系统误差和测量偏差;  $v_{it}$ 、 $s_{it}$  和  $f_{it}$  分别为一次侧电流测量的随机误差、系统误差和测量偏差。

由于互感器的误差是在较长时间运行的过程中累积的,主要受温度、湿度、电磁环境等因素的影响,在较短的采样时间内,这些外部环境变化很小。因此,对于同一台互感器而言,在较短采样时间内可认为其系统误差  $s_i$  及测量偏差  $f_i$  保持不变。而由自由噪声组成的随机误差  $v_i$  本身十分小且均值一般为0,因此可以忽略。故若在较短采样时间内测取的2组一、二次侧电压及一次侧电流数据分别为  $U_{11}^*$ 、 $U_{21}^*$ 、 $I_{11}^*$  和  $U_{12}^*$ 、 $U_{22}^*$ 、 $I_{12}^*$ ,则一、二次侧电压差和一次侧电流的真实值可分别表示为:

$$\begin{cases} U_{d1} = U_{d1}^* - s_{ut} - f_{ut} \\ I_{11} = I_{11}^* - s_{it} - f_{it} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_{d2} = U_{d2}^* - s_{ut} - f_{ut} \\ I_{12} = I_{12}^* - s_{it} - f_{it} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $U_{d1}^* = U_{11}^* - U_{21}^*$ ;  $U_{d2}^* = U_{12}^* - U_{22}^*$ 。

由于电力系统的电压及负载电流是波动的,当2次采集所得的电流满足  $I_{11}^* - I_{12}^* \neq 0$  时,根据式(1)有:

$$U_{d1} - U_{d2} = U_{d1}^* - U_{d2}^* = (I_{11} - I_{12}) Z_k = (I_{11}^* - I_{12}^*) Z_k \quad (6)$$

因此,可得:

$$Z_k = \frac{U_{d1}^* - U_{d2}^* - (U_{21}^* - U_{22}^*)}{I_{11}^* - I_{12}^*} \quad (7)$$

式(7)中的  $Z_k$  值是根据互感器的测量值计算得到的,但它在理论上与根据变压器一、二次侧的真实电压、电流数据所计算的值是相等的。根据式(7)计算的短路阻抗值比直接利用所测数据按式(2)计算的值更为准确,这是因为式(7)在一定程度上减小了测量误差对计算结果的干扰,具体将在下文中进行验证。

## 2 $\Delta U - I_1$ 轨迹特征分析法及其改进方法

### 2.1 基本原理

在图1所示的单相变压器等效电路中,变压器端口一、二次侧的电压差和一次侧电流还可以通过正弦函数的形式表示,即:

$$\begin{cases} \Delta u(t) = u_1(t) - u_2(t) = \Delta U \cos(\omega t + \theta) \\ i_1(t) = I_1 \cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\Delta u(t)$  和  $i_1(t)$  分别为变压器一、二次侧电压差和一次侧电流的瞬时值;  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  分别为变压器一、二次侧电压的瞬时值;  $\Delta U$  和  $I_1$  分别为变压器一、二次侧电压差和一次侧电流的幅值;  $\theta$  和  $\varphi$  分别为一、二次侧电压差和一次侧电流的初相角;  $\omega$  为角

频率。

通过三角变换,可将时间参数  $\omega t$  消去,则可得新的参数方程为:

$$\frac{(\Delta U)^2}{(\Delta U)^2} + \frac{i_1^2}{I_1^2} - 2 \frac{i_1 \Delta U}{I_1 \Delta U} \cos(\varphi - \theta) - \sin^2(\varphi - \theta) = 0 \quad (9)$$

在笛卡尔坐标系中,当  $\sin^2(\varphi - \theta) \neq 0$  时,式(9)表示的参数方程为一个椭圆。

当变压器绕组发生变形故障后,模型中的电气参数发生改变,进而在所构建的  $\Delta U - I_1$  轨迹中反映出来。文献[11]通过仿真研究了不同类型的故障对  $\Delta U - I_1$  轨迹的影响,结果表明  $\Delta U - I_1$  轨迹在不同类型的故障下表现出了不同的变化。因此,通过监测  $\Delta U - I_1$  轨迹特征(长轴、短轴、面积、旋转角度等)的变化,可检测出变压器可能发生的绕组故障及类型。

## 2.2 $\Delta U - I_1$ 轨迹与短路阻抗的关系

式(2)所示的短路阻抗的模可以表示为:

$$|R_k + jX_k| = \Delta U / I_1 \quad (10)$$

在  $\Delta U - I_1$  轨迹中,横、纵坐标的最大值分别为  $I_1$ 、 $\Delta U$ ,因此根据  $\Delta U - I_1$  轨迹中的数据可以计算出短路阻抗的模值,如图2所示。图中, $a$ 和 $b$ 分别为  $\Delta U - I_1$  轨迹椭圆的长轴和短轴的  $1/2$ ;  $\beta$  为椭圆的倾斜角,即长轴与坐标横轴的夹角。

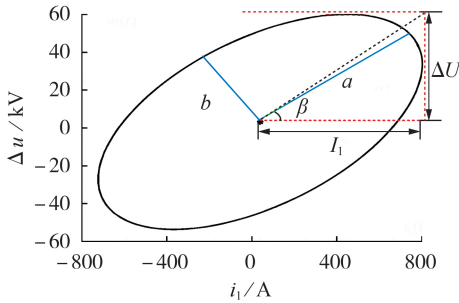


图2  $\Delta U - I_1$  轨迹与短路阻抗关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of relationship between  $\Delta U - I_1$  locus and short circuit impedance

## 2.3 考虑励磁电流的误差补偿方法

由上述分析可知,除了根据  $\Delta U - I_1$  轨迹特征变化情况判断绕组变形故障外,还可以在  $\Delta U - I_1$  轨迹中计算短路阻抗的模值。然而,直接在  $\Delta U - I_1$  轨迹中计算短路电抗的模值将存在较大的误差,这是因为该计算方式忽略了励磁支路。当变压器一次侧电压较小时,励磁电流较小,不会对计算结果造成明显的影响。当一次侧电压非常大时,即使励磁阻抗很大,励磁支路通过的电流也会变大,此时忽略励磁电流可能会对短路阻抗的计算带来一定的误差,影响计算结果。

当考虑到励磁支路时,变压器端口关系式变为:

$$U_d = U_1 - U_2 = (R_1 + jX_1)I_1 + (R_2 + jX_2)I_2 = (R_1 + jX_1)I_1 + (R_2 + jX_2)(I_1 - I_m) = (R_k + jX_k)I_1 - (R_2 + jX_2)I_m \quad (11)$$

对于大型电力变压器而言,  $R_2 \ll X_2$ , 即  $R_2 I_m \ll X_2 I_m$ 。在变压器正常运行状况下,励磁阻抗的电抗分量远大于电阻分量,故励磁电流  $I_m$  的幅值近似正比于一次侧电压  $U_1$  的幅值,相位滞后  $90^\circ$ ,故有:

$$(R_2 + jX_2)I_m = jX_2 \frac{U_1}{jX_m} = \alpha U_1 \quad (12)$$

其中,  $\alpha$  为补偿系数,且  $\alpha = X_2/X_m$ 。

故变压器端口关系式变为:

$$U_1 - U_2 + \alpha U_1 = (1 + \alpha)U_1 - U_2 = (R_k + jX_k)I_1 \quad (13)$$

式(13)为对励磁电流进行补偿后的变压器端口关系式,  $\alpha$  可以根据变压器出厂时的铭牌数据求得。式(13)更准确地反映了变压器端口的电压、电流关系,故本文提出以  $(1 + \alpha)U_1 - U_2$  和  $I_1$  所表示的正弦量构建  $\Delta U - I_1$  轨迹,根据补偿后的  $\Delta U - I_1$  轨迹得到的短路阻抗与真实值更为接近。

## 2.4 电压及负载标准化方法

根据文献[11],二次侧负载功率因数的变化对  $\Delta U - I_1$  轨迹的影响可以忽略,而一次侧电压以及二次侧负载大小的变化会使得椭圆轨迹的长轴和短轴成比例地增大或减小,但是不改变椭圆的倾斜角度。为了说明这点,根据图1在仿真软件PSIM中搭建了某台三相双绕组变压器的仿真模型。该台变压器高、低压绕组均为Y形联结,相关参数见附录A表A1。仿真中所设参数的数值根据变压器参数计算得到。在仿真中,标准电压为变压器额定电压  $U_n$ , 即  $U_1 = U_n = 110 \angle 0^\circ$  kV, 标准负载  $Z_L = R_0 = 100 \Omega$ 。采用该仿真模型模拟了一次侧电压变化和二次侧负载波动对  $\Delta U - I_1$  轨迹的影响规律,结果如图3所示,由图可见,二次侧电压及负载大小的波动会严重地干扰对  $\Delta U - I_1$  轨迹的比较和分析。为了消除负载

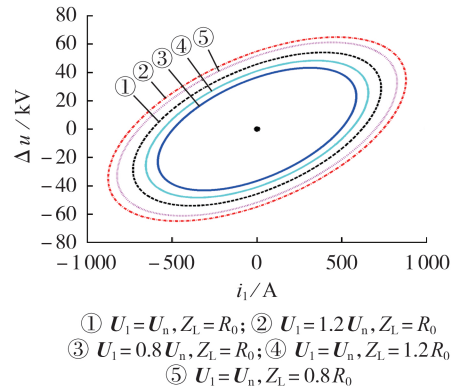


图3 电压及负载波动时的  $\Delta U - I_1$  轨迹图

Fig.3  $\Delta U - I_1$  locus diagram under voltage and load fluctuation

变化对  $\Delta U-I_1$  轨迹的干扰,文献[17]提出了一种负荷归一化方法,但仅对电压差进行了归一化处理,而当短路电抗变化时,变压器端口的电压和电流均会发生改变。因此,本文采用了一种电压及负载标准化方法,分别对补偿后的一次电流以及电压差进行标准化处理,用标准化处理后的一次电流和电压差构建  $\Delta U-I_1$  轨迹,消除了电压及负载波动对  $\Delta U-I_1$  轨迹的影响。理论分析如下。

对于一个运行的变压器而言,能够通过测量设备监测到的电压、电流数据有4个,即  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ 。根据电路中的替代定理<sup>[18]</sup>,可以将测得的变压器一次侧电压  $U_1$  和二次侧电流  $I_2$  看作端口激励源,把一次侧电流  $I_1$  看作响应,如图4所示。经过附录B中的推导,可实现对一次侧电流  $I_1$  的标准化处理。

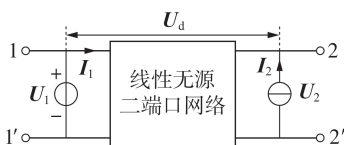


图4 变压器等效二端口网络

Fig.4 Equivalent two-port network of transformer

同理,将变压器一、二次侧的电流  $I_1$  和  $I_2$  看作激励源,将电压差  $(1+\alpha)U_1 - U_2$  看作响应,可实现对电压差  $U_d$  的标准化处理。

因此,只要选定绕组正常时的一组测量数据作为标准,利用标准化处理后的一次侧电流  $I_1$  和电压差  $U_d$  所表示的正弦量构建  $\Delta U-I_1$  轨迹,使得  $\Delta U-I_1$  轨迹椭圆的参数变化不受电压及负载波动的影响,更便于分析和比较故障前、后的  $\Delta U-I_1$  轨迹椭圆。

### 3 联合分析方法

由第1、2节分析可知,当考虑到互感器测量误差和励磁电流对计算结果的影响时,短路阻抗更为精确的计算公式为:

$$Z_k = \frac{(1+\alpha)(U_{11}^* - U_{12}^*) - (U_{21}^* - U_{22}^*)}{I_{11}^* - I_{12}^*} \quad (14)$$

短路阻抗的在线计算和  $\Delta U-I_1$  轨迹的构建均依赖于变压器一、二次侧电压和电流数据的采集,利用已安装的互感器即可实现。由于仅依靠在线短路阻抗法无法实现变压器绕组变形故障类型的识别,而互感器测量误差又易对  $\Delta U-I_1$  轨迹造成干扰。同时,为了避免单一诊断方法的不确定性,提出了基于短路阻抗及  $\Delta U-I_1$  轨迹特征联合分析的变压器绕组变形故障在线检测方法。该方法的流程图见附录C图C1,具体步骤如下。

(1)首先在变压器出厂(绕组正常)时采集变压器一、二次侧的电压和电流数据,并根据式(14)计算

得到正常绕组的短路阻抗  $Z_{k0}$ ,同时构建绕组正常时的  $\Delta U-I_1$  轨迹,并以此作为标准轨迹。

(2)变压器运行一段时间后,根据互感器在相邻的几个采样周期内测得的电压、电流数据,一方面根据式(14)计算考虑互感器测量误差及励磁电流后的短路阻抗  $|Z_{k1t}|$ ;另一方面对数据进行标准化处理,构建标准化后的  $\Delta U-I_1$  轨迹,并在  $\Delta U-I_1$  轨迹中计算短路阻抗的模值  $|Z_{k2t}|$ 。其中,  $t$  取为变压器出厂后的运行时间。

(3)由于式(14)在一定程度上减小了测量误差及励磁电流对计算结果的影响,故  $|Z_{k1t}|$  与短路阻抗的真实值更为接近,而由  $\Delta U-I_1$  轨迹椭圆计算得到的  $|Z_{k2t}|$  则可能受到测量误差的干扰,但在无干扰的情况下,二者在理论上是接近的。故若  $Z_{k0}$ 、 $|Z_{k1t}|$  和  $|Z_{k2t}|$  三者满足式(15)、(16),则判定变压器绕组发生了变形故障且互感器测量误差在允许范围内,并进一步在  $\Delta U-I_1$  轨迹中根据相关的参数变化特征判别变形故障类型。若所得结果不满足式(16),则认为  $\Delta U-I_1$  轨迹的变化可能是由互感器测量误差引起的,从而提醒工作人员对互感器进行准确度校验或停电检修。

$$\frac{||Z_{k1t}| - |Z_{k0}||}{|Z_{k0}|} > \eta \quad (15)$$

$$\frac{||Z_{k1t}| - |Z_{k2t}||}{|Z_{k1t}|} < \varepsilon \quad (16)$$

其中,  $\eta$  为变压器绕组变形故障的判断阈值;  $\varepsilon$  为判断互感器测量误差是否超标的阈值,本文仿真中设置为0.5%。

### 4 仿真实验及分析

利用2.3节中搭建的仿真模型及仿真参数设置,进一步验证第1、2节所提方法的有效性,联合分析方法在考虑互感器测量误差时判断绕组变形故障的准确性。在仿真得到  $U_2$  和  $I_1$  的瞬时值后,通过MATLAB进行相关运算,构建  $\Delta U-I_1$  轨迹并计算短路阻抗值。

#### 4.1 励磁电流误差补偿方法准确性验证

如2.3节所述,为在  $\Delta U-I_1$  轨迹中更精确地计算短路阻抗值,有必要对励磁电流所造成的误差进行补偿,在本仿真模型中  $\alpha=0.0061$ 。图5为对励磁电流进行补偿前、后正常绕组的  $\Delta U-I_1$  轨迹对比图。由图可见,补偿前、后的  $\Delta U-I_1$  轨迹存在着微小的差异,虽然这些差异很小,但可能会影响到短路阻抗的计算精度。根据补偿前、后的  $\Delta U-I_1$  轨迹计算所得的短路阻抗模值与真实值的相对误差分别为

-1.99%、-0.96%,可见根据对励磁电流进行补偿后的 $\Delta U-I_1$ 轨迹计算得到的短路阻抗准确度更高。

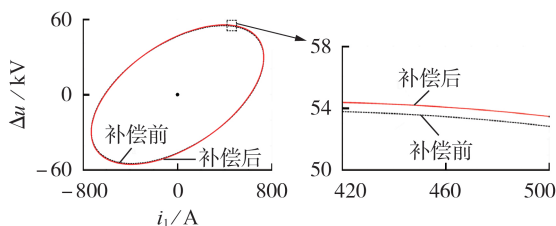


图5 对励磁电流进行补偿前、后的 $\Delta U-I_1$ 轨迹对比

Fig.5 Compensation of  $\Delta U-I_1$  locus between before and after compensation of exciting current

#### 4.2 电压及负载标准化方法有效性验证

在仿真中保持短路阻抗的值不变,在得到不同一次侧电压和负载下的数据后,对一次侧电流 $I_1$ 和电压差 $U_d$ 进行标准化处理。采用标准化处理后的数据构建 $\Delta U-I_1$ 轨迹,并将其与采用标准电压、负载构建的标准 $\Delta U-I_1$ 轨迹进行对比,结果见附录D图D1。图中,标准化轨迹1采用 $U_1=1.2U_n, Z_L=R_0$ 和 $U_1=U_n, Z_L=1.2R_0$ 时的电压、电流数据;标准化轨迹2采用 $U_1=1.2U_n, Z_L=R_0$ 和 $U_1=U_n, Z_L=0.8R_0$ 时的电压、电流数据。由图D1可见,当短路电抗保持不变时,无论一次电压及负载如何变化,经标准化处理后的 $\Delta U-I_1$ 轨迹与标准轨迹都能很好地重合,证明了本文所提电压及负载标准化方法的有效性。

#### 4.3 绕组变形故障情况仿真

文献[12,19]分别通过实测实验和有限元仿真模型研究了变压器在绕组幅向变形和匝间短路故障下,其短路电抗的不同变化规律,由其研究结果可知,短路电抗的变化规律与绕组变形故障类型有直接的关系。在仿真过程中保持一次侧电压及二次侧负载不变,通过将短路电抗值分别增大和减小1%、3%、6%、10%来模拟变压器绕组不同类型和程度的变形故障。短路电抗增大、减小时的 $\Delta U-I_1$ 轨迹分别如附录D图D2、D3所示。由图可知,绕组发生变形故障时, $\Delta U-I_1$ 轨迹椭圆的面积、长轴、短轴以及椭圆倾斜角度均会发生一定的改变;随着短路电抗的增大, $\Delta U-I_1$ 轨迹的面积有所增大,短轴变长,且 $\Delta U-I_1$ 轨迹沿逆时针方向有轻微旋转,短路电抗减小时 $\Delta U-I_1$ 轨迹的变化规律与上述规律相反;当短路电抗变化较小(如变化量为 $\pm 1\%$ )时,在 $\Delta U-I_1$ 轨迹中也能够明显地观察出其与正常绕组的 $\Delta U-I_1$ 轨迹的差异。因此,利用 $\Delta U-I_1$ 轨迹评估绕组的健康状况具有较高的准确性。

根据图D2、D3所示的 $\Delta U-I_1$ 轨迹计算出的短路阻抗模值与正常绕组短路阻抗模值的相对变化量 $\Delta Z_k$ 如表1所示。表中, $\Delta X_k$ 为短路电抗变化量。根据短路阻抗法判断变压器绕组变形故障的IEC标

准<sup>[27]</sup>,当短路电抗相对变化量超过3%时认为绕组出现了变形故障。由表1可知,达到绕组变形故障判断标准的短路阻抗模值的最小相对变化量为 $\pm 2.07\%$ ,故在本文的绕组变形故障的判断阈值 $\eta = 2.07\%$ 。

表1 短路阻抗模值的相对变化量

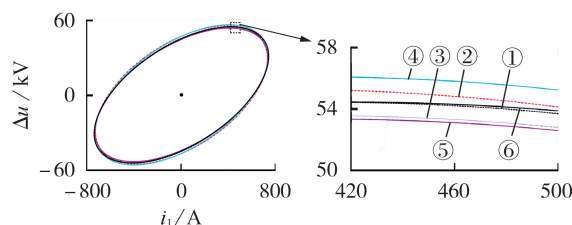
Table 1 Relative variation of modulus of short circuit impedance

| $\Delta X_k / \%$ | $\Delta Z_k / \%$ | $\Delta X_k / \%$ | $\Delta Z_k / \%$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1                 | 0.07              | -1                | -0.07             |
| 3                 | 2.07              | -3                | -2.07             |
| 6                 | 4.17              | -6                | -4.11             |
| 10                | 7.66              | -10               | -6.82             |

### 5 联合分析方法算例分析

#### 5.1 互感器测量误差对短路阻抗及 $\Delta U-I_1$ 轨迹的影响

为研究互感器测量误差对短路阻抗在线计算及 $\Delta U-I_1$ 轨迹的干扰情况,通过改变仿真中正常绕组的电压、电流数据的幅值和相位模拟测量设备存在误差时的情况。参考GB 1208—2006电流互感器准确度标准,在仿真中,将互感器的幅值误差设置为 $\pm 1.0\%$ ,相位误差设置为 $\pm 40'$ ,分别研究了 $U_1$ 、 $U_2$ 和 $I_1$ 的正误差对 $\Delta U-I_1$ 轨迹的影响,结果见图6。由图可见,互感器误差会对 $\Delta U-I_1$ 轨迹造成较大的干扰,影响短路阻抗的在线计算和绕组变形故障程度、类型的判别。根据 $U_1$ 、 $U_2$ 和 $I_1$ 存在正误差时的 $\Delta U-I_1$ 轨迹计算得到的短路阻抗模值的相对变化量分别为2.98%、-1.99%和-0.99%。可见,当互感器存在一定程度的测量误差时,无论是单独采用短路阻抗在线算法,还是单独采用 $\Delta U-I_1$ 轨迹分析法均可能造成绕组变形故障的误判。



① 正常绕组, ② 短路电抗增大3%, ③ 短路电抗减小3%  
④  $U_1$ 存在正误差, ⑤  $U_2$ 存在正误差, ⑥  $I_1$ 存在正误差

图6 各类型误差对 $\Delta U-I_1$ 轨迹的影响

Fig.6 Influence of various types of errors on  $\Delta U-I_1$  locus

#### 5.2 互感器测量误差

为进一步分析本文所提联合分析方法在考虑互感器误差时的准确度,通过对不同仿真情况下的电压、电流数据设置特定的测量误差进行验证。仿真中,在所得的电压、电流数据中添加干扰来模拟互感

器的测量误差,并通过轻微改变一次侧电压的幅值来模拟短时间测量的电压波动情况,所取的电压、电流信号数据为:绕组正常时,  $U_1 = U_n$  及  $U_1 = 1.05 U_n$  对应的数据;短路电抗变化3%时,  $U_1 = U_n$  及  $U_1 = 1.05 U_n$  对应的数据。即共选用4组电压、电流数据进行验证。考虑到互感器的随机误差及系统误差较小,测量误差主要由测量偏差  $f_i$  组成的,故在仿真中将随机误差以及系统误差的值设置得相对较小,将测量偏差  $f_i$  设置得较大。 $U_1$ 、 $U_2$  和  $I_1$  的测量误差具体组成情况如附录E表E1所示。

对仿真所得数据按照表E1中的误差组成进行加权后,  $U_1$  的幅值误差约为1.52%,相位误差约为 $-43.2'$ ;  $U_2$  的幅值误差约为2.08%,相位误差约为 $-10.8'$ ;  $I_1$  的幅值误差约为 $-1.58\%$ ,相位误差约为 $-32.4'$ 。考虑上述设置测量误差时,正常绕组的  $\Delta U-I_1$  轨迹与短路电抗变化  $\pm 3\%$  时的  $\Delta U-I_1$  轨迹对比图如图7所示。由图可见,考虑测量误差时正常绕组的  $\Delta U-I_1$  轨迹的变化量大于电抗增大3%时绕组的  $\Delta U-I_1$  轨迹变化量。而实际中测量误差的组合情况很复杂,所造成的干扰也很复杂,若不能及时发现互感器的测量误差,则会影响变压器绕组变形故障的识别精度。

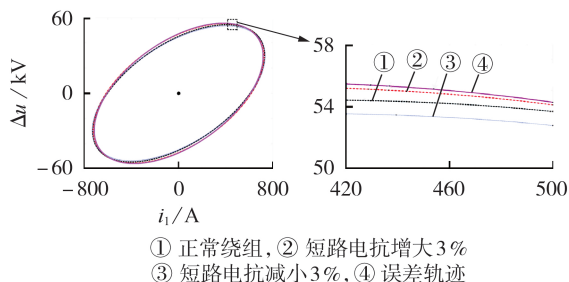


图7 考虑测量误差时正常绕组的  $\Delta U-I_1$  轨迹与短路电抗变化  $\pm 3\%$  时绕组的  $\Delta U-I_1$  轨迹对比

Fig.7 Comparison between  $\Delta U-I_1$  locus of normal windings considering error and  $\Delta U-I_1$  locus with short circuit reactance change of  $\pm 3\%$

针对正常绕组,采用本节中考虑测量误差时的电压、电流数据计算短路阻抗,由式(2)计算出的短路阻抗的误差为3.94%,而由式(7)计算出的短路阻抗的误差仅为0.005%,可见本文所提方法基本消除了互感器测量误差的影响。

### 5.3 绕组正常且考虑测量误差

根据绕组正常且不考虑设备测量误差的2组电压、电流数据计算得到的短路阻抗模值为  $|Z_{k0}| = 74.7948 \Omega$ ,而考虑测量误差后,计算得到  $|Z_{k1r}| = 74.7987 \Omega$ 、 $|Z_{k2r}| = 77.7402 \Omega$ 。 $|Z_{k0}|$  与  $|Z_{k1r}|$ 、 $|Z_{k2r}|$  不完全相等的原因在于白噪声的存在可能对计算结果

存在一定的干扰,但总体而言,  $|Z_{k1r}|$  比  $|Z_{k2r}|$  更接近  $|Z_{k0}|$ ,与前文的推论吻合。计算得到  $\frac{||Z_{k1r}| - |Z_{k0}||}{|Z_{k0}|} =$

$$0.0052\% < 2.07\%, \frac{||Z_{k2r}| - |Z_{k1r}||}{|Z_{k1r}|} = 3.94\% > 0.5\%, \text{故}$$

判定绕组正常但互感器可能存在较大的测量误差,与设定情况一致。

### 5.4 短路电抗增大3%且不考虑测量误差

根据绕组电抗增大3%情况下的2组电压和电流数据可计算得到  $|Z_{k1r}| = 76.3435 \Omega$ 、 $|Z_{k2r}| = 76.3420 \Omega$ ,则  $\frac{||Z_{k1r}| - |Z_{k0}||}{|Z_{k0}|} = 2.07\%$ 、 $\frac{||Z_{k1r}| - |Z_{k2r}||}{|Z_{k1r}|} = 0.00196\% < 0.5\%$ ,判定绕组可能发生了变形故障且互感器不存在较大的测量误差,应进一步根据  $\Delta U-I_1$  轨迹的实际变化情况判断故障类型。

### 5.5 短路阻抗增大3%且考虑测量误差

根据绕组电抗增大3%且考虑设备测量误差的2组电压、电流数据计算得到  $|Z_{k1r}| = 76.3642 \Omega$ 、 $|Z_{k2r}| = 79.3224 \Omega$ ,则  $\frac{||Z_{k1r}| - |Z_{k0}||}{|Z_{k0}|} = 2.098\% > 2.07\%$ 、 $\frac{||Z_{k1r}| - |Z_{k2r}||}{|Z_{k1r}|} = 3.87\% > 0.5\%$ ,判定绕组发生了变形故障且互感器可能存在较大的测量误差,与设定情况一致。

## 6 结论

(1)通过考虑互感器测量误差的短时不变性,提出了一种减小误差的短路阻抗在线计算方法,仿真结果表明,在考虑互感器测量误差时,采用该方法计算得到的短路阻抗值更准确,有效地减小了互感器测量误差对计算结果的干扰。为利用  $\Delta U-I_1$  轨迹更加准确地计算短路阻抗的模值,考虑励磁电流的影响,提出了利用补偿励磁电流后的  $(1+\alpha)U_1-U_2$  和  $I_1$  所表示的正弦量来构建  $\Delta U-I_1$  轨迹。在此基础上,提出了电压及负载标准化方法,有效地消除了电压及负载波动对  $\Delta U-I_1$  轨迹的影响,更加便于对  $\Delta U-I_1$  轨迹进行比较与分析。仿真结果验证了上述2种方法的准确性。

(2)将基于在线短路阻抗法及改进后的  $\Delta U-I_1$  轨迹特征分析法结合,提出一种基于短路阻抗及  $\Delta U-I_1$  轨迹特征联合分析的变压器绕组变形故障在线检测方法。通过对仿真所得的数据设置特定误差,验证了该方法的准确性。结果表明,该方法能够有效地识别变压器的绕组变形故障,并能够对互感器测量误差进行评估,减小了互感器测量误差对判断结果的干扰,提高了识别精度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 赵文清,严海,周震东,等. 基于残差BP神经网络的变压器故障诊断[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):143-148.  
ZHAO Wenqing, YAN Hai, ZHOU Zhendong, et al. Fault diagnosis of transformer based on residual BP neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 143-148.
- [2] 王岩,刘云鹏,陈展,等. 改进的变压器绕组变形带电检测方法[J]. 高压电器,2018,54(10):85-89,96.  
WANG Yan, LIU Yunpeng, CHEN Zhan, et al. Improved charged detection method of transformer winding deformation[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 85-89, 96.
- [3] 周利军,李威,江俊飞,等. 牵引变压器绕组改进型频率响应建模与径向变形故障分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):213-218.  
ZHOU Lijun, LI Wei, JIANG Junfei, et al. Improved FRA modeling and radial deformation fault analysis of traction transformer windings[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 213-218.
- [4] 邹林,廖一帆,罗兵,等. 基于有限元法探究电力变压器绕组变形频率响应的仿真研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):204-211.  
ZOU Lin, LIAO Yifan, LUO Bing, et al. Simulative research on frequency response to winding deformation of power transformer based on finite element method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 204-211.
- [5] 邓祥力,熊小伏,高亮,等. 基于参数辨识的变压器绕组变形在线监测方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4950-4958.  
DENG Xiangli, XIONG Xiaofu, GAO Liang, et al. Method of on-line monitoring of transformer winding deformation based on parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4950-4958.
- [6] 陈一鸣,梁军,张静伟,等. 基于改进参数辨识的三绕组变压器绕组状态在线监测方法[J]. 高电压技术,2019,45(5):1567-1575.  
CHEN Yiming, LIANG Jun, ZHANG Jingwei, et al. Method of online status monitoring for windings of three-winding transformer based on improved parameter identification[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1567-1575.
- [7] DE RYBEL T, SINGH A, VANDERMAAR J A, et al. Apparatus for online power transformer winding monitoring using bushing tap injection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 996-1003.
- [8] BEHJAT V, VAHEDI A, SETAYESHMEHR A, et al. Diagnosing shorted turns on the windings of power transformers based upon online FRA using capacitive and inductive couplings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2123-2133.
- [9] 李莉,朱永利,宋亚奇. 变压器绕组多故障条件下的振动信号特征提取[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):140-146.  
LI Li, ZHU Yongli, SONG Yaqi. Feature extraction for vibration signal of transformer winding with multiple faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 140-146.
- [10] JIN M, PAN J. Vibration transmission from internal structures to the tank of an oil-filled power transformer[J]. Applied Acoustics, 2016, 113(1): 1-6.
- [11] ABU-SIADA A, ISLAM S. A novel online technique to detect power transformer winding faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 849-857.
- [12] 李成祥,朱天宇,姚陈果,等. 基于变压器电压电流图形特性的绕组变形在线监测方法[J]. 高电压技术,2018,44(11):3532-3539.  
LI Chengxiang, ZHU Tianyu, YAO Chenguo, et al. Online diagnosis method for transformer winding deformation based on characteristic of figure constructed by voltage and current[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3532-3539.
- [13] 刘勇,梁笑尘,汲胜昌,等. 变压器套管容性故障对频响曲线的影响[J]. 西安交通大学学报,2014,48(2):62-68.  
LIU Yong, LIANG Xiaochen, JI Shengchang, et al. Influence of transformer bushing capacitive fault on frequency response curves[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 62-68.
- [14] 徐建源,陈彦文,李辉,等. 基于短路电抗与振动信号联合分析的变压器绕组变形诊断[J]. 高电压技术,2017,43(6):2001-2006.  
XU Jianyuan, CHEN Yanwen, LI Hui, et al. Transformer winding deformation analysis based on short-circuit reactance and vibration signal analysis[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 2001-2006.
- [15] 欧小波,汲胜昌,彭晶,等. 漏电抗的参数辨识技术在线监测变压器绕组变形的研究[J]. 高压电器,2010,46(12):41-44.  
OU Xiaobo, JI Shengchang, PENG Jing, et al. Study on on-line detecting of transformer winding deformation based on parameter identification of leakage reactance[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 41-44.
- [16] 韩海安,张竹,王晖南,等. 基于主元分析的电容式电压互感器计量性能在线评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):201-206.  
HAN Haian, ZHANG Zhu, WANG Huinan, et al. Online metering performance evaluation of capacitor voltage transformer-based on principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 201-206.
- [17] YAO C, ZHAO Z, MI Y, et al. Improved online monitoring method for transformer winding deformations based on the Lissajous graphical analysis of voltage and current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1965-1973.
- [18] 邱关源,罗先觉. 电路[M]. 西安:高等教育出版社,2006:427-429.
- [19] 欧小波,汲胜昌,王春杰,等. 基于“场-路”耦合有限元分析法的变压器短路电抗仿真的研究[J]. 高压电器,2010,46(3):59-63.  
OU Xiaobo, JI Shengchang, WANG Chunjie, et al. Simulation of transformer short-circuit reactance with FEM by coupling magnetic field with electric circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 59-63.
- [20] IEC. Power transformers: part 5 ability to withstand short: IEC60076-5-2014[S]. Geneva, Switzerland: IEEE, 2014.

## 作者简介:



李振华

李振华(1986—),男,安徽宿州人,副教授,博士,主要研究方向为电子式互感器及其状态监测、电力设备故障诊断、电磁兼容等(E-mail: lizhenhua1993@163.com);

蒋伟辉(1996—),男,四川遂宁人,硕士研究生,主要研究方向为电力设备状态监测及故障诊断(E-mail: jiangweihui1996@163.com);

喻彩云(1995—),女,湖北恩施人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统中谐波高精度检测方法(E-mail: 1254457421@qq.com)。

(编辑 任思思)

(下转第217页 continued on page 217)

## Evaluation of power equipment suppliers based on intelligent mining of electric power dialogue text

WANG Haiyao<sup>1</sup>, WANG Huifang<sup>1</sup>, HU Junhua<sup>2</sup>, XU Jiquan<sup>2</sup>, LI Jianhong<sup>3</sup>, HE Benteng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China;

3. Zhejiang Huayun Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Currently the satisfaction evaluation of power equipment suppliers mainly relies on manual statistics and index calculation, and its accuracy is greatly affected by evaluators and evaluation contents. The dialogue text of the electric power service platform is used as the research object. Taking the dialogue text of power service platform as the research object, the evaluation model of power equipment supplier based on text mining technology is established on the basis of expanding the entries and attributes of the existing electric power ontology dictionary. Firstly, the next sentence predictive analysis method of single-round dialogue text based on BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) NSP (Next Sentence Prediction) and cosine similarity weighted is proposed. The dialogue interruption cross-handling process and supplier identification rules are established to realize theme induction of electric power dialogue text. Then, considering the complexity of the semantic sentiment of the dialogue text, the dialogue sentiment analysis rules are proposed for establishing the supplier evaluation model. Finally, the accuracy of the proposed method is verified by an example. Results indicate that the evaluation of power equipment suppliers based on the intelligent mining of dialogue text is feasible and effective, and can be used as a useful supplement to current evaluation methods.

**Key words:** electric power equipment; intelligent text mining; dialogue text; next sentence prediction; sentiment analysis; supplier evaluation

(上接第 209 页 continued from page 209)

## Online detection method of transformer winding deformation based on combined analysis of short circuit impedance and $\Delta U-I_1$ locus characteristics

LI Zhenhua<sup>1,2</sup>, JIANG Weihui<sup>1</sup>, YU Caiyun<sup>1</sup>, CHEN Xingxin<sup>1</sup>, LI Zhenxing<sup>1</sup>, XU Yanchun<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the short circuit impedance method cannot identify fault types and that both the short circuit impedance method and the  $\Delta U-I_1$  locus method are susceptible to the interference of equipment measurement errors, an online winding deformation detection method based on the combined analysis of short circuit impedance and  $\Delta U-I_1$  locus characteristics is proposed. The principle of online short circuit impedance method is introduced, and a calculation method of short circuit impedance based on the short time invariance of measurement error is put forward to reduce the measurement error. The principle of  $\Delta U-I_1$  locus method is introduced, then the online detection steps and criteria of transformer winding deformation based on combined analysis of short circuit impedance and  $\Delta U-I_1$  locus characteristics are given. The effectiveness of the proposed method and its accuracy considering measuring errors are verified by establishing a transformer simulation model. The results show that the proposed method can accurately identify transformer winding deformation faults when considering measurement error, and has the advantages of live detection and fault type identification, which improves the identification accuracy of winding deformation fault.

**Key words:** power transformers; winding deformation; short circuit impedance;  $\Delta U-I_1$  locus; online detection

# 附录 A

表 A1 变压器参数  
Table A1 Parameters of transformer

| 参数                                     | 数值                 | 参数                             | 数值         |
|----------------------------------------|--------------------|--------------------------------|------------|
| 额定容量<br>$S_N/\text{MV} \cdot \text{A}$ | $S_N=20\text{MVA}$ | 变比                             | 110kV/11kV |
| 短路电压 $U_k\%$                           | 10.5               | 短路损耗<br>$\Delta P_k/\text{kW}$ | 135        |
| 空载损耗 $\Delta P_0/\text{kW}$            | 22kW               | 空载电流<br>$I_0\%$                | 0.4        |

# 附录 B

在图 4 中，根据线型无源二端口的性质，有：

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{M}\mathbf{U}_1 + \mathbf{N}\mathbf{I}_2 \quad (\text{B1})$$

其中， $M$ 、 $N$ 均以复数的形式进行表示。 $M$ 、 $N$ 为表征二端口内部参数的量，仅与二端口本身的元件及其连接方式有关。若在绕组正常时有  $\mathbf{I}_1 = \mathbf{M}_0\mathbf{U}_1 + \mathbf{N}_0\mathbf{I}_2$ ，当一次侧电压或负载发生变化时， $\mathbf{U}_1$ 和 $\mathbf{I}_2$ 必然发生改变，但表征二端口内部参数的 $M_0$ 和 $N_0$ 不会发生改变。

若在绕组正常的情况下，二次侧接标准电压及负载时的端口电压、电流满足：

$$\mathbf{I}_{10} = \mathbf{M}_0\mathbf{U}_{10} + \mathbf{N}_0\mathbf{I}_{20} \quad (\text{B2})$$

在一次侧电压或二次侧负载变化时，所测得的 2 组电压电流满足：

$$\mathbf{I}_{11} = \mathbf{M}\mathbf{U}_{11} + \mathbf{N}\mathbf{I}_{21} \quad (\text{B3})$$

$$\mathbf{I}_{12} = \mathbf{M}\mathbf{U}_{12} + \mathbf{N}\mathbf{I}_{22} \quad (\text{B4})$$

则通过解线性方程组有：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{11} & \mathbf{I}_{21} \\ \mathbf{U}_{12} & \mathbf{I}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{11} \\ \mathbf{I}_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{B5})$$

故标准化后的一次侧电流可以表示为如下形式：

$$\mathbf{I}_1 = [\mathbf{U}_{10} \quad \mathbf{U}_{20}] \begin{bmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{N} \end{bmatrix} \quad (\text{B6})$$

若变压器绕组正常，其内部元件参数不会发生改变，故满足  $M=M_0$ 、 $N=N_0$ ，则计算得到的  $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_{10}$ ；若计算得到的  $\mathbf{I}_1 \neq \mathbf{I}_{10}$ ，则表明变压器绕组发生了变形，故在所构建的  $\Delta U$ - $\mathbf{I}_1$  轨迹上会出两者的差异。

附录 C

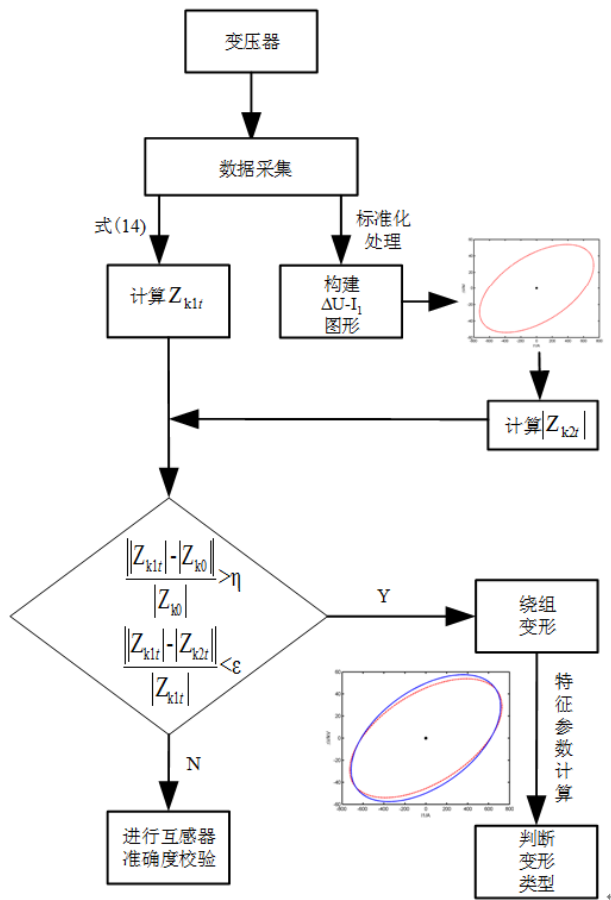


图 C1 联合分析方法的流程图

Fig.C1 Flowchart of joint analysis method

附录 D

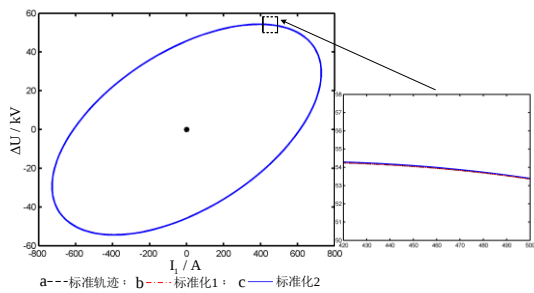


图 D1 标准化处理前后,  $\Delta U-I_1$  轨迹对比

Fig.D1 Comparison of  $\Delta U-I_1$  locus between before and after normalization

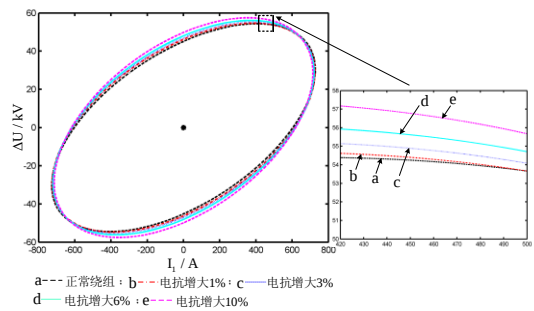


图 D2 短路电抗增大时的  $\Delta U-I_1$  轨迹

Fig.D2  $\Delta U-I_1$  locus when short circuit reactance increases

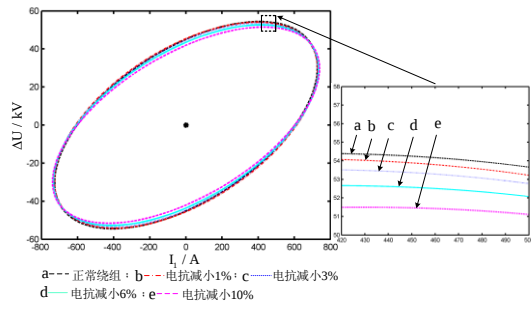


图 D3 短路电抗减小时的  $\Delta U-I_1$  轨迹

Fig.D3  $\Delta U-I_1$  locus when short circuit reactance decreases

附录 E

表 E1 测量误差的具体组成

Table E1 Detailed composition of measurement error

| 信号    | 误差组成               |                                      |                                     |
|-------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
|       | 随机误差 $v_t$         | 系统误差 $s_t$                           | 测量偏差 $f_t$                          |
| $U_1$ | 0.1 ( 1dB 高斯白噪声 )  | $-0.001U_{10}\sin(100\pi t-0.01\pi)$ | $0.02U_{10}\sin(100\pi t+0.2\pi)$   |
| $U_2$ | 0.1 ( 1dB 高斯白噪声 )  | $0.001U_{20}\sin(100\pi t+0.01\pi)$  | $0.02U_{20}\sin(100\pi t-0.1\pi)$   |
| $I_1$ | 0.01 ( 1dB 高斯白噪声 ) | $0.001I_{10}\sin(100\pi t+0.01\pi)$  | $-0.02I_{10}\sin(100\pi t+0.05\pi)$ |