

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.08.001

用于扫频阻抗法的变压器绕组等效电路模型研究

崔迎¹, 龙洁¹, 王松², 王曙鸿², 王爽²

(1. 国网河南省电力公司焦作供电公司, 河南 焦作 454002;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 文中以扫频阻抗法为理论基础,提出了适用于扫频阻抗法仿真分析的双绕组变压器分频段等效电路模型。首先以扫频阻抗曲线第1个峰值点对应频率作为分频点,将整个频率区间划分为低频段与高频段,其次从耦合电感出发推导出了适用于低频段的集中参数的变压器“T”型等效电路,对应高频段建立分布参数的梯形等效电路,最后,在10 Hz~1 MHz的扫频范围内,通过试验与仿真的对比验证了该模型的准确性。

关键词: 变压器; 扫频阻抗; 等效电路

A Study of Transformer Winding Equivalent Circuit Using for Sweep Frequency Impedance Method

CUI Ying¹, LONG Jie¹, WANG Song², WANG Shuhong², WANG Shuang²

(1. State Grid Henan Electric Power Company Jiaozuo Power Supply Company, Henan Jiaozuo 454002, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, on the basis of sweep frequency impedance method(SFI), the equivalent circuits of double-winding transformer, which are suitable for SFI simulation analysis, are proposed with the difference of the frequency range. Firstly, the entire frequency range is separated into low frequency range and high frequency range by the frequency which is corresponding to the first peak impedance value in SFI curve. Secondly, a transformer lumped parameter T-equivalent circuit in low frequency range is established by analyzing the coupled inductors. In high frequency range, a distributed parameter ladder equivalent circuit is used for SFI analysis. Finally, the accuracy of the equivalent circuits is validated by means of a comparison between measured and emulated SFI results in a wide frequency range from 10 Hz up to 1 MHz.

Key words: transformer; sweep frequency impedance; equivalent circuit

0 引言

变压器是电力系统中的关键设备,它的安全可靠对保证电力系统的安全运行起到了至关重要的作用。变压器在运行过程中不可避免的受到由短路电流产生的电动力冲击,受到强大电动力冲击后的变压器绕组会发生鼓包、局部扭曲,甚至垮塌等变形现象,而这些变压器的故障将会给电网的安全运行造成严重影响。因此,如果能够较早的、准确地检测出变压器绕组的变形故障,将有利于减少电网的经济损失。

鉴于变压器在电网中至关重要的作用,国内外对变压器绕组变形检测方面的相关课题展开了大

量的研究,并逐渐形成了以下几种较为成熟的方法。根据变压器的短路阻抗值的变化来判断变压器绕组变形的低压短路阻抗法^[1-2];文[3]提出的低压脉冲法是向绕组一端加低压脉冲信号,通过时域中的激励与响应信号的对比来判断绕组的变形;频率响应分析法(又称FRA法)主要通过对比频响数据的变化来判断^[4-5];振动法是通过贴在变压器油箱上的振动传感器在线监测振动信号的实时情况来判断变压器的运行状态^[6-7]。以上方法在实际中都到了广泛应用,但其仍然存在的一定的不足。短路阻抗法判据准确,但是无法定位绕组故障且灵敏度较低;低压脉冲法易受到外界干扰,很难保证现场测试的重复性;频率响应法测试结果不直观,需要与

历史数据进行横向或者纵向比较,同时要求人员具有比较丰富的经验。文[8-15]的研究中,提出了扫频阻抗法用于变压器绕组变形检测,这种新的方法抗外界干扰能力强、灵敏度高、判据简单、能够准确判断绕组的变形情况。然而,以上关于扫频阻抗法的研究都是基于试验的直接测量,并没有对应于扫频阻抗法的仿真实验模型的提出。

文中从扫频阻抗法的原理出发,建立适用于扫频阻抗法的仿真实验模型。最终,通过实验与模型仿真结果的对比来说明仿真模型的正确性。

1 扫频阻抗法的原理

扫频阻抗法是在频响法和短路阻抗法的基础上发展而来的。传统的频响法可得到大量的频响数据,这些数据包含了丰富的信息,充分利用频响数据有利于判断绕组的变形情况,但由于频率响应法测试信号较弱,所以在现场测试时容易受到干扰,导致频响数据产生较多毛刺。短路阻抗法在检测绕组变形中已经得到广泛应用,也形成了相应的标准,但其对某些整体性变形反应比较灵敏,对中频以下变形反应没有频响法灵敏。

为了更好地利用以上2种方法的优点,在结合短路阻抗法和频响法测试要求的基础上,提出了扫频阻抗法。利用扫频阻抗法对变压器绕组进行一次测量,既可以获得变压器的短路阻抗特性,也可得到其频响特性。取测量得到的50 Hz处的短路阻抗值与变压器铭牌值作比较可判断变压器绕组是否出现变形,然后用频响法的判断依据对绕组的变形位置进行定位。扫频阻抗法的测试原理图见图1^[10]。

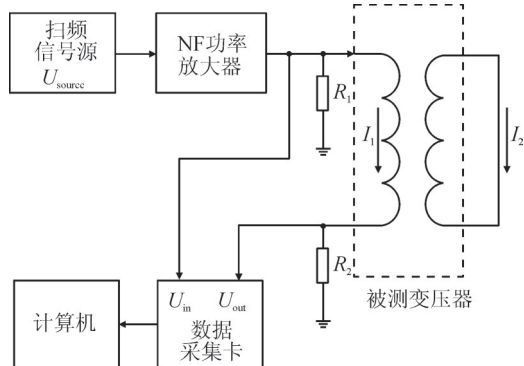


图1 扫频阻抗测试图

Fig. 1 Sweep frequency impedance test setup

如图1所示,二次侧短路,一次侧施加正弦扫频信号,信号经功率放大器放大后注入一次侧,利用数据采集装置记录输入端电压 U_{in} 与相应电压 U_{out} 。其中 R_1 、 R_2 都为50 Ω 的采样电阻。所以得到扫频阻

抗值为

$$|Z_k| = \left| \frac{U_{in}(f) - U_{out}(f)}{\vec{I}_1(f)} \right| \quad (1)$$

对于电流 I_1 可知

$$I_1(f) = \frac{U_{out}(f)}{R_2} = \frac{U_{out}(f)}{50} \quad (2)$$

数据采集卡在工作过程中不仅采集了输入、输出电压的幅值,同时记录了输入输出电压的相位值,分别为 θ_1 与 θ_2 。将式(2)带入式(1)并利用余弦定理可以得到

$$|Z_k| = 50 \sqrt{\left| \frac{U_{in}(f)}{U_{out}(f)} \right|^2 - 2 \left| \frac{U_{in}(f)}{U_{out}(f)} \right| \cos(\theta_1 - \theta_2) + 1} \quad (3)$$

为了更为清晰的对故障进行诊断,对扫频数据作分贝处理,可得

$$|Z_{kk}(f)| = 20 \lg |Z_k(f)| \quad (4)$$

2 试验对象

为了验证建模的正确性,根据扫频阻抗法的试验要求,自行绕制了连续式的单相双绕组模型变压器。模型变压器的高压绕组含有10个线饼,每饼10匝,低压绕组共有10饼,每饼13匝。铁芯是由单片厚度为0.35 mm的硅钢片轧制而成。具体结构见图2。



图2 变压器绕组结构图

Fig. 2 The structure of transformer winding

文中将从该模型变压器入手建立其分频段等效电路模型,并仿真分析其扫频阻抗特性。同时利用扫频阻抗装置对该变压器进行扫频阻抗试验测量。

3 扫频阻抗法等效电路模型

根据扫频阻抗法的原理可知,其等效电路模型既要反应变压器的短路阻抗值,又要反应频响特性,所以不能利用单一固定的等效电路模型来仿

真,这样会带来较大误差。基于此,文中提出分段建立扫频阻抗法的等效电路模型。利用扫频阻抗曲线第1个峰值点对应的频率点作为高低频段的分界点,因为在峰值出现之前,电容对应的容抗很大,与电感并联的电容以及对地电容相当于开路,电感对应的感抗起主导作用,从而使得扫频阻抗曲线随着频率的增加而单调增加,随着频率的继续增加,电容对应的容抗减小,电容的作用开始显现,此时就出现了谐振,针对此,提出利用扫频阻抗曲线的第1个峰值点对应的频率点作为分界点,分别建立低频段变压器“T”型集中参数等效电路和高频段线性分布参数组成的梯形等效电路。

3.1 低频等效电路

低频段时,铁芯磁场起主要作用,绕组对地电容以及绕组纵向电容的容抗值很大,此时与电感并联的电容相当于开路,阻抗值主要由感抗决定,所以电容的影响可以忽略。此时低频段内绕组可以等效为由集中参数组成的“T”型等效电路。具体的等效电路见图3。

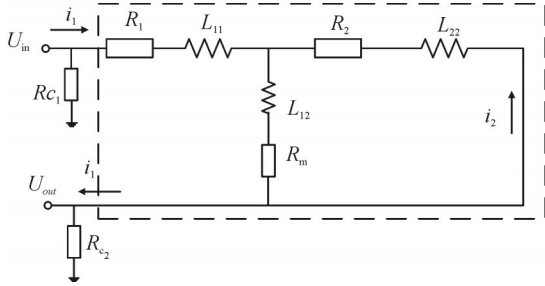


图3 变压器绕组低频等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit of transformer winding in low frequency

如图3所示,此时的扫频阻抗低频段等效电路模型与短路阻抗法的等效电路模型一致。所以,在低频段时,扫频阻抗法等效于短路阻抗法。因此,扫频阻抗法在50 Hz频率点处对应的阻抗值即为作为短路阻抗值。

变压器是电磁耦合装置,通过线圈之间耦合来传递能量,为了能够得到变压器“T”型等效电路各参数的值,以下将从耦合电感出发推导变压器“T”型等效电路。耦合电感元件的等效电路模型见图4^[16-17]。

图4中的电流、电压方向为参考方向,不考虑电阻的影响,可以得到

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)做简单的变换可以得到

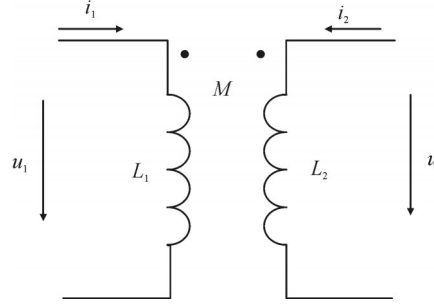


图4 耦合电感的等效电路

Fig. 4 The equivalent circuit of coupled inductors

$$\begin{cases} u_1 = (L_1 - M) \frac{di_1}{dt} + M \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} \\ u_2 = M \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} + (L_2 - M) \frac{di_2}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

由于实际变压器存在变比,所以可将理想变压器与耦合电感模型相结合,其等效模型见图5。

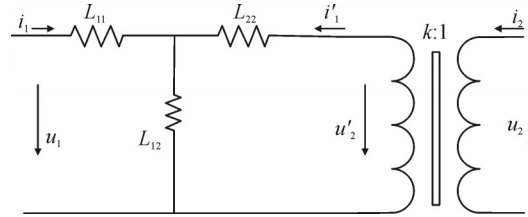


图5 基于耦合电感的变压器等效模型

Fig. 5 The equivalent circuit of transformer based on coupling inductance

考虑变压器变比并且将二次侧折算到一次侧,可以得到式(7)。

$$\begin{cases} u_1 = (L_1 - kM) \frac{di_1}{dt} + kM \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt} \\ u'_2 = kM \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt} + (k^2 L_2 - kM) \frac{di'_2}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

考虑变压器的电阻,可以得到的等效电路模型见图6。

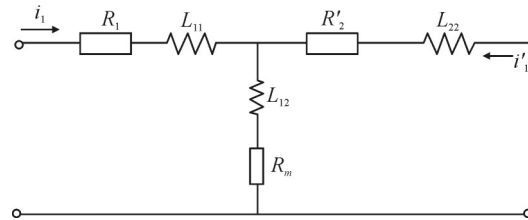


图6 折算后的“T”型等效电路

Fig. 6 The T-equivalent circuit after converting

增加了电阻的式(7)转化为

$$\begin{cases} u_1 = (L_1 - kM) \frac{di_1}{dt} + kM \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt} + R_1 i_1 + R_m (i_1 + i'_2) \\ u'_2 = kM \frac{d(i_1 + i'_2)}{dt} + (k^2 L_2 - kM) \frac{di'_2}{dt} + k^2 R_2 i'_2 + R_m (i_1 + i'_2) \end{cases} \quad (8)$$

由此可得

$$\begin{cases} L_{11} = L_1 - kM \\ L_{22} = k^2 L_2 - kM \\ L_{12} = kM \\ R_2' = k^2 R_2 \end{cases} \quad (9)$$

为了得到“T”型等效电路各个参数的值,首先利用RLC表在工频下可以测得一次侧绕组与二次侧绕组工频时的电感与电阻值 L_1 、 R_1 、 L_2 、 R_2 ,其它参数由实验得到。

参数测量实验接线示意图见图7。将低压侧开路,此时低压侧电流为0,式(8)则转化为式(10)。

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + (R_1 + R_m)i_1 \\ u_2' = kM \frac{di_1}{dt} + R_m i_1 \end{cases} \quad (10)$$

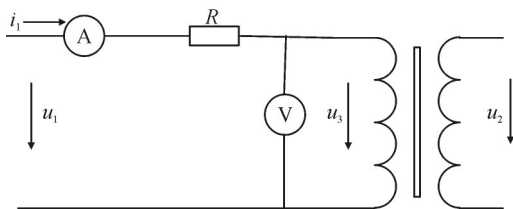


图7 参数测量试验示意图

Fig. 7 The schematic of parameter measurement

在工频条件下,通过测量可以得到高压侧电压有效值 U_1 ,高压侧电流有效值 I_1 ,以及低压侧电压有效值 U_2 。变压器的变比 k 可以近似的通过式(11)计算得到。

$$k = \frac{U_1 - RI_1}{U_2} \quad (11)$$

将上述计算和测量得到的参数值带入式(9)就可以得到参数 L_{11} 、 L_{12} 、 L_{22} 的值。具体的参数值见表1。

表1 折算后的“T”型等效电路的参数值

Table 1 The parameter values of the T-equivalent circuit after converting			mH
L_{11}	L_{12}	L_{22}	
0.019 7	0.025 5	0.056 8	

进一步根据公式(12)即可得到低频等效电路下的扫频阻抗值 Z 。在低频段时,当频率取50 Hz时,即可获得变压器的短路阻抗值 Z_k 。

$$|Z_k| = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + \omega^2(L_{11} + L_{22})^2} \quad (12)$$

3.2 高频等效电路

当频率较高时,磁通趋于铁芯表面,铁芯的导磁性能减小,可以忽略铁芯的影响^[18-19],并且当频率升高时,扫频阻抗曲线不再是单调增加,而是开始出现波峰与波谷,即出现了谐振现象,表明绕组等效参数由集中参数变为了分布参数,分布参数的影响不能忽略,所以,变压器绕组在此频段内可用分

布参数的梯形电路来等效。

变压器绕组的变形或者故障必然会引起这些分布参数的变化,从而引起频率响应曲线的改变。文中针对已有的模型变压器以饼为单元建立双绕组变压器高频段分布参数梯形等效电路,并考虑了高压绕组、低压绕组以及高低压绕组之间的互感。其等效电路见图8。

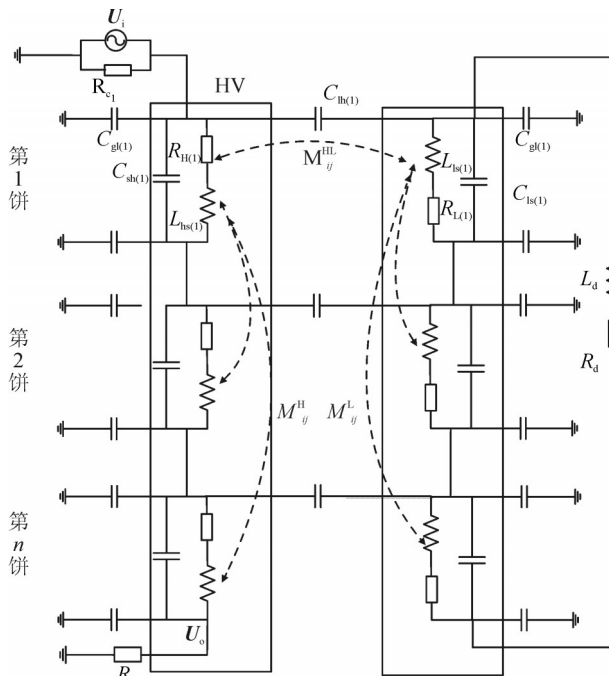


图8 双绕组变压器梯形等效电路

Fig. 8 The equivalent ladder circuit of double-winding transformer

图8中: C_{sh} 与 C_{ls} 分别为高、低压绕组的纵向电容; C_m 为高低压绕组之间的电容; C_{gh} 、 C_{gl} 分别为高、低压绕组对地电容; R_{hi} 与 R_{li} 为高、低压绕组每一饼的电阻; M_{ij}^H 、 M_{ij}^L 分别为高压绕组、低压绕组自身饼与饼之间的互感, M_{ij}^{HL} 为高低压绕组每饼之间的互感。 L_d 、 R_d 为短路线的电感与电阻。

由于高频条件下,可认为进入到铁芯的磁通很少,忽略不计,则高频等效电路的电感与互感参数可以利用空芯电感计算得到^[20]。高低压绕组的纵向电容由匝间几何电容、饼间几何电容以及各种附加电容折算得到^[21];高低压绕组间的电容以及高低压对地电容可利用同轴圆柱电容计算公式得到^[22-23];由于短路线较短,并忽略电阻和电感随频率变化的影响,短路线的 R_d 与 L_d 可利用万用表和电感表直接测量得到。高频等效电路的电容参数值见表2。

4 试验与仿真结果研究

利用图3与图8所述的分频段等效电路在10 Hz~

表2 高频梯形等效电路模型电容参数值
Table 2 The capacitance values of high frequency equivalent ladder circuit model pF

C_{gh}	C_{gl}	C_{jh}	C_{sh}	C_{sl}
0.611	6.951	4.312	46.773	26.709

1 MHz 的频率范围内对该模型变压器进行扫频阻抗仿真研究,并对该变压器进行扫频阻抗测量。扫频阻抗实际测量见图9。仿真与测量的短路阻抗对比见表3。



图9 扫频阻抗测量图

Fig. 9 The measurement of sweep frequency impedance

表3 50 Hz处仿真与测量的短路阻抗值对比
Table 3 The comparison of short-circuit impedance between simulation and measurement Ω

短路阻抗(测量)	短路阻抗(仿真)	相对误差/%
9.233 5	8.940 4	3.17

从表3中可以看到,利用“T”等效电路模型得到的50 Hz处对应的短路阻抗值与测量得到的结果基本相同。

模型仿真与测量得到的扫频阻抗模值随频率变化的曲线见图10。

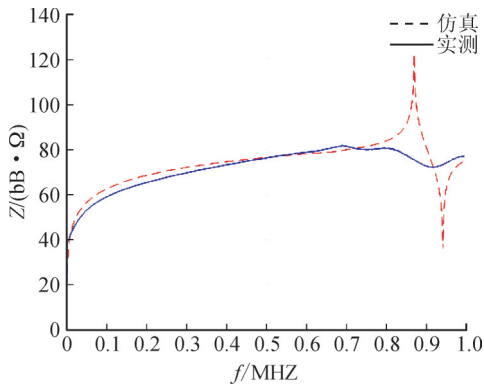


图10 仿真与测量的扫频阻抗模值对比

Fig. 10 The comparison of magnitude of impedance between simulation and measurement

通过对比可以看出,低频段内模型仿真与试验

测量的扫频阻抗曲线一致性较好,阻抗值随着频率的增大而增大,并且仿真得到的50 Hz处的阻抗值与试验测量得到的短路阻抗值基本一致,通过以上2点反应了低频“T”型等效电路的正确性。进入高频段后,由于分布电容的加入,电路开始发生谐振,从而出现了波峰与波谷,从图10中可以看到,高频段内仿真与试验测得数据有一定偏差,这种偏差与很多因素有关,比如电阻参数在高频下的集肤效应;随着频率的升高,电感、电容值的频变效应影响等,尤其是分布电容的影响,高频段内分布电容的微小变化对扫频阻抗曲线的变化都有较大影响。因此对于上述可能的影响都会使得仿真与实测出现一定偏差,但通过高频段内仿真与实测的对比可以看出,虽然谐振点对应的阻抗峰值有差别,但是谐振点出现的位置大致相同并且频率末端对应的阻抗值基本趋于一致,通过以上2点也说明了高频等效电路的准确性。

综上所述,低频段的集中参数的“T”型等效电路以及高频段的分布参数梯形等效电路都较好的反应了整个频段内扫频阻抗值随频率变化的情况。

5 结语

文中基于扫频阻抗法的基本原理建立了适用于扫频阻抗法的分频段等效电路模型,在低频段建立集中参数的“T”型等效电路,在高频段建立分布参数的梯形等效电路。通过对一台模型变压器进行扫频阻抗仿真与试验对比可以看到,低频段“T”型等效电路与高频段分布参数的梯形等效电路能够较好的反应出在扫频阻抗法下的变压器低频与高频特性,并且利用低频“T”等效电路得到的50Hz处的阻抗值即为变压器的短路阻抗值,通过以上对比验证了该分段模型的正确性。

参考文献:

- [1] 杨晓玲. 低电压短路阻抗法在变压器绕组变形诊断中的应用[J]. 机电工程技术, 2013(7):91-93.
YANG Xiaoling. Application of the method of short-Circuit reactance in diagnosis of transformer winding deformation[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2013 (7):91-93.
- [2] 高朝霞, 马涛, 王永儿, 等. 短路阻抗法结合频响法诊断变压器绕组变形的分析与应用[J]. 电力设备, 2006, 7(12):32-34.
GAO Chaoxia, MA Tao, WANG Yonger, et al. Diagnosis of transformer winding deformation by combination of SCR and FRA method[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(12):32-34.
- [3] LCCH W, TYMINSKJ L. Detecting transformer winding dam-

- age-the low voltage impulse method[J]. Electrical Review, 1996, 179(21):768-772.
- [4] DICK E, ERVEN C. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on. PAS, 1978, 97(6): 2144-2153.
- [5] ISLAM S, COATES K, LEDWICH G. Identification of high frequency transformer equivalent circuit using matlab from frequency domain data[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. New Orleans, Louisiana: IEEE, 1997:357-364.
- [6] 黄海, 潘家强, 郑婧. 基于切贝雪夫-里兹法的大型电力变压器铁芯三维自由振动分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36):138-144.
- HUANG Hai, PAN Jianqiang, ZHENG Jing. Three-dimensional vibration analysis of power transformer core using chebyshev-ritz method[J]. Proceedings of CSEE, 2011, 31(36):138-144.
- [7] 汲胜昌, 李彦明, 傅晨钊. 负载电流法在基于振动信号分析法检测变压器铁芯状况中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 154-158.
- JI Shengchang, LI Yanming, FU Chenzhao. Application of on-load current method in monitoring the condition of transformer's core based on the vibration analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6):154-158.
- [8] 刘勇, 汲胜昌, 梁笑尘, 等. 检测变压器绕组变形的扫频阻抗法原理及应用[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 85-88.
- LIU Yong, JI Shengchang, LIANG Xiaochen, et al. Causes of transformer noise and measures of noise reduction[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3):85-88.
- [9] 仇一凡, 周兴, 李忠晶, 等. 基于扫频阻抗法的变压器绕组变形测试技术研究[J]. 黑龙江电力, 2014, 36(1):5-9.
- QIU Yifan, ZHOU Xing, LI Zhongjing, et al. Research on transformer winding deformation test technology based on FRAS method[J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(1): 5-9.
- [10] 朱生鸿, 秦睿, 杨萍, 等. 扫频阻抗法检测变压器绕组匝间短路故障[J]. 绝缘材料, 2014, 47(4): 93-96.
- ZHU Shenghong, QIN Rui, YANG Ping, et al. Inter-turn short-circuit fault of transformer winding detected by sweep frequency impedance method[J]. Insulating Materials, 2014, 47(4): 93-96.
- [11] 弓艳朋. 变压器绕组变形的扫频短路阻抗诊断方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(5):121-125.
- GONG Yanpeng. Diagnosis method study of transformer winding deformation basing on sweep frequency of short circuit impedance[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5):121-125.
- [12] 孙翔, 何文林. 基于扫频阻抗法的变压器匝间短路故障检测[J]. 高压电器, 2016, 52(3):29-33.
- SUN Xiang, HE Wenlin. Detection of short circuit fault between transformer windings based on sweep frequency impedance method[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 29-33.
- [13] 欧阳旭东, 林春耀, 杨贤, 等. 扫频阻抗法检测变压器绕组轴向位移研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(8):78-81.
- OUYANG Xudong, LIN Chunyao, YANG Xian, et al. The research on axial displacement detection of transformer winding based on sweep frequency impedance[J]. Insulating Materials, 2016, 49(8):78-81.
- [14] 刘勇, 汲胜昌, 杨帆, 等. 检测变压器故障的扫频阻抗法特性研究及应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3237-3245.
- LIU Yong, JI Shengchang, YANG fan, et al. Characteristics and application of sweep frequency impedance method for detecting transformer fault[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10):3237-3245.
- [15] 孙翔, 何文林, 詹江杨, 等. 电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1207-1220.
- SUN Xiang, HE Wenlin, ZHAN Jiangyang, et al. Current status and development of test and diagnostic technique of transformer winding deformation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4):1207-1220.
- [16] 穆亚东. 基于参数辨识的变压器保护[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- MU Yadong. The transformer protection based on parameter identification[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [17] 谢宝昌. 变压器等效电路获取的教学方法[J]. 电气电子教学学报, 2013, 35(2):60-62.
- XIE Baoshang. Teaching method of deucting equivalent circuit of transformer[J]. Journal of EEE, 2013, 35(2):60-62.
- [18] RAHIMPOUR E, CHRISTIAN J, FESER K, et al. Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer winding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2):493-505.
- [19] JAFARI A M, AKBARI A. Partial discharge localization in transformer windings using multi-conductor transmission line model[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(6):1028-1037.
- [20] WIRGAU K A. Inductance calculation of an air-core disk winding[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1976, 95(1):394-400.
- [21] 尹磊. 变压器绕组变形的在线监测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- YIN Lei. Study on online monitoring of transformer winding deformation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [22] ABEYWICKRAMA N, SERDYUK Y V, GUBARISKI S M. High frequency modeling of power transformers for use in frequency rdsponse analysis(FAR) [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4):2042-2049.

[23] A hybrid winding model of disc-type power transformers for frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2):730-739.

崔 迎(1970—),男,本科,高级工程师,主要从事电力变

压器变形检测,寿命评估方面的研究。

龙 洁(1978—),女,本科,工程师,主要从事高压电器设备检测工作,研究方向为变压器故障诊断。

王 松(1989—),男,博士研究生,研究方向为变压器绕组变形检测。