

基于漏感抗在线识别的变压器绕组变形监测技术的研究

沈煜¹, 阮羚¹, 罗维¹, 曹蕊², 罗勇芬³, 李彦明³

(1. 湖北省电力公司电力试验研究院, 武汉 430077;

2. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 基于短路阻抗法原理研究了对绕组变形的在线监测技术和实验室研究平台。提出了一种快速计算变压器绕组漏电抗的计算方法:在电流峰值处,直接由电压差和电流比值得到漏电阻;在电流过零处,直接由电压差和电流微分的比值得到漏电感;对一、二次电压先在硬件电路中先进行减法放大到采集卡的输入极值附近,再采集,将算法的分辨率几近提高到采集卡的最大精度。研制的监测系统,在实验室绕组变形研究平台上进行试验研究并初步提出变形判据,并在现场得到应用。研究结果表明,这为现场变压器在线监测绕组故障提供了一种有效的方法。

关键词: 绕组变形; 在线监测; 短路阻抗法; 漏电抗

中图分类号: TM411.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)12-0044-05

On-line Monitoring of Transformer Winding Deformation Based on Identification of Leakage Inductance

SHEN Yu¹, RUAN Ling¹, LUO Wei¹, CAO Rui², LUO Yong-fen³, LI Yan-ming³

(1. Testing & Research Institute of Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;

2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An on-line monitoring technology of transformer winding deformation and corresponding experimental platform were presented according to the theory of short-circuit impedance analysis. Consequently, a method for rapidly computing the leakage reactance from transformer winding was proposed. The leakage resistance is obtained from the ratio of voltage difference to current at the peak of current, and the leakage inductance is also obtained from the ratio of voltage difference to differential of current when current is zero. The voltage difference of primary and secondary winding is magnified near the input limit of AD acquisition card with hardware before sampled, thus the resolution of the algorithm is increased to the maximum precision of the card. The present on-line monitoring system was tested on the experimental platform, and a criterion was also proposed for judging the state of winding. The test and practical application results verify the effectiveness of the present on-line monitoring system.

Key words: winding deformation; on-line monitoring; short-circuit reactance analysis; leakage reactance

0 引言

变压器是电力系统中重要设备之一,它的运行情况直接影响电力系统的安全。由统计数据可知^[1-5],绕组变形导致的变压器事故在电力系统变压器事故中占有很大比重。因此,深入研究变压器绕组变

形的检测和诊断方法,对提高变压器生产水平,保证电网安全运行有着积极的意义。

目前,针对绕组变形的试验和检测主要采用低压、离线的方法,它们具有和其他预防性试验同样的不足,如试验时需停电、试验周期长等,不能实时反映绕组变形程度并判断其健康状况^[6-7]。

基于以上原因,迫切需要研究变压器绕组变形

的在线监测方法和系统。近年来,许多专家和学者对绕组变形在线监测进行了一些研究,并取得一定的成果^[8-9]。如通过对变压器等效回路方程计算所得的绕组在线等效阻抗或漏电感的变化来判断变压器绕组状态,相应的实验室研究也取得一定的突破^[7,10],但由于实际电力系统中工作环境复杂,并且变压器两侧电压、电流互感器变化很小,因此,测试系统精度一直是影响测试与判断结果的主要因素之一^[11-12]。

笔者基于短路阻抗法原理,对绕组变形在线阻抗监测技术进行了研究,提出了一种快速计算变压器绕组漏电抗的计算方法;设计出一套绕组变形在线监测系统并在实验室平台上对其测试并初步提出变形判据,以期在未来现场应用中作为在线监测判断故障的依据。

1 短路阻抗在线监测基本理论

由短路阻抗法原理^[9,13-14]可知,当变压器绕组发生变形时,相关结构参数将发生变化,并导致变压器短路电抗发生变化。研究中选择变压器回路方程作为参数辨识模型。

1.1 单相变压器等效漏阻抗算法

单相双绕组 Y/Y 接法变压器模型见图 1。中性点接地的 Y/Y 接法变压器可看作 3 个独立的单相双绕组 Y/Y 接法变压器。

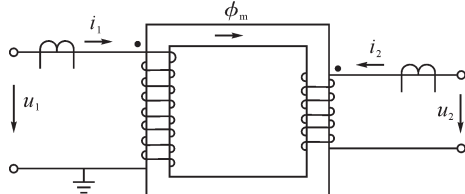


图 1 单相双绕组变压器模型

Fig. 1 Single-phase model of transformer

由变压器正常运行的回路方程可推得^[10]

$$(u_1 - u_2) = r_k i_1 + L_k di_1/dt \quad (1)$$

式(1)中: r_k 和 L_k 为绕组归算到一次侧的等值电阻和漏电感; u_2 为变压器二次侧电压归化至一次侧后所得的归算电压。

1.2 Y/Δ 型接法变压器等效漏阻抗算法

Y/Δ 接法的三相双绕组变压器模型见图 2,其中 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 为Δ侧绕组相电压, i_{1a} 、 i_{1b} 、 i_{1c} 为Δ侧绕组线电流,Δ侧绕组的相电流为 i_a 、 i_b 、 i_c ^[15]。

计算 Y/Δ 接法绕组等效漏阻抗时的原理同 Y/Y 接法,但由于副边侧相电流不能直接进行测量,可根据Δ侧线电流与相电流的关系及三相变压器绕组对称的特点将两侧的回路方程进行处理,经转化

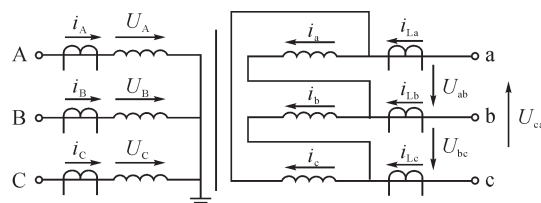


图 2 三相 Y0/Δ 接法变压器模型

Fig. 2 Three-phase model of transformer with Y0/Δ connection

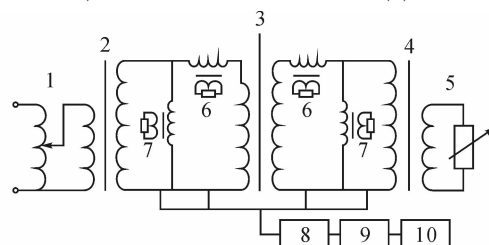
过的方程为

$$\left. \begin{aligned} U_A - U_C - N(U_{ab} - U_{ca}) &= -r_k i_{1a} - L_k \frac{di_{1a}}{dt} \\ U_B - U_A - N(U_{bc} - U_{ab}) &= -r_k i_{1b} - L_k \frac{di_{1b}}{dt} \\ U_C - U_B - N(U_{ca} - U_{bc}) &= -r_k i_{1c} - L_k \frac{di_{1c}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: $N=N_1/N_2$, $r_k=r_1+Nr_2$, $L_k=L_1+NL_2$ 。此时等效的 r_k 和 L_k 可用与计算 Y/Y 接法变压器漏抗相似的算法得到,且对于式(2)的第 1 子式,需要监测 U_A 、 U_C 、 U_{ab} 、 U_{ca} 和 i_{1a} ,这些参量均取自 PT、CT 的二次。同理可得出第 2、3 子式的监测量。

2 绕组变形在线监测试验平台设计

绕组变形试验平台的电气接线图见图 3(a)(该图为单相图),实验室研究平台见图 3(b)。



1—调压器; 2—升压变压器; 3—被测油浸电力变压器; 4—降压变压器; 5—交流假负载; 6—电流互感器; 7—电压互感器; 8—信号调理板; 9—数据采集卡; 10—计算机。

(a) 单相变压器绕组变形实验室检测接线图



(b) 三相变压器绕组变形实验室研究平台

图 3 绕组变形实验室研究平台建立

Fig. 3 Setup of laboratory research platform of transformer winding deformation

平台设计以交流电子假负载(最大功率为 33.3 kV·A/380 V,包括阻性、阻容性和阻感性负载)为准;待试变压器为油浸式,其器身外部的二次绕

组依然按照盘式绕线,并可由Y型变换为 Δ 形连接,绕组间可更换不同厚度的垫块,以模拟绕组纵向变形;有多个绕组留出抽头用于模拟绕组短路。

3 绕组变形在线阻抗监测关键技术

3.1 监测系统总体结构

整个监测系统基于PCI总线的工控机架构。包含电压和电流调理板、AD采集卡等。监测系统总体结构见图4。此外,该系统在线监测软件采用Visual Basic、Measurement Studio和MATLAB混合编程实现在线参数识别算法^[16-17]。

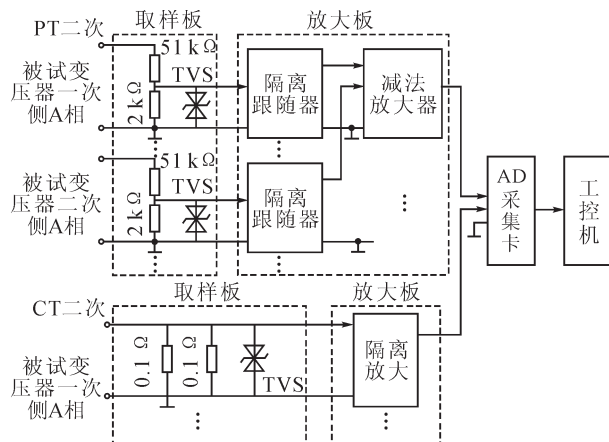


图4 监测系统总体结构图

Fig. 4 Structure of monitoring system

3.2 硬件信号预处理的优势

现行的一些短路阻抗在线监测系统,将变压器两侧的电压信号经PT转换后,直接进入AD采集卡采样,在软件里再相减(由式(1)或(2))。这将导致很大误差及数据漂移,见图5。

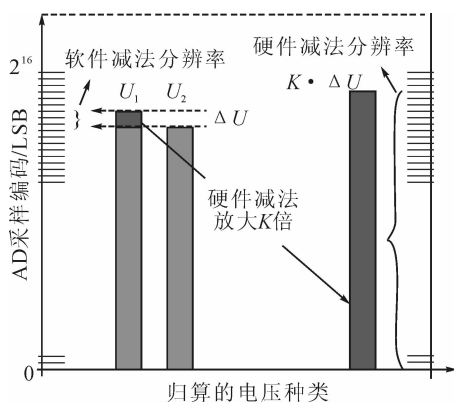


图5 硬件相减较软件相减的优势

Fig. 5 Advantage of subtracting the primary and secondary voltage by hardware

运行PT的二次电压一般均为100V或 $100/\sqrt{3}$ V。电力变压器一、二次电压经PT变换后的电压输出值很接近,差值非常小;AD卡采集精度有

限,经采集后在软件中相减,可分辨的位数很少,这将导致较大误差;监测系统若对一、二次PT输出电压先在硬件电路中做减法并放大到采集卡输入极值附近,再由AD采集,这样可将分辨率提高到采集卡的最大精度。

3.3 一种快速计算变压器绕组漏电抗的方法

由式(1)、(2)可知,两种不同连接方式的变压器,其漏电抗的计算公式形式上一致;算法等号左方均是一种电压差;等号右方则是漏电阻与电流的乘积再同漏电感与电流对时间的导数进行相加。

由式(1)、(2)可得到一种简便、实用的漏电抗的快速计算方法,在电流峰值处,电流的导数为0,忽略方程右边第二项漏电感影响,直接由电压差和电流比值得到漏电阻;在电流过零处,忽略方程右边第一项漏电阻影响,直接由电压差和电流导数的比值得到漏电感。

以双绕组Y/Y型连接方法的变压器为例,实际测量中可得到见图6所示的波形图。图6中3条含有较多高次谐波的曲线为经PT并用硬件相减后所得到的T型等效电路的三相原、副边的电压差信号,平滑曲线为各相的电流信号。

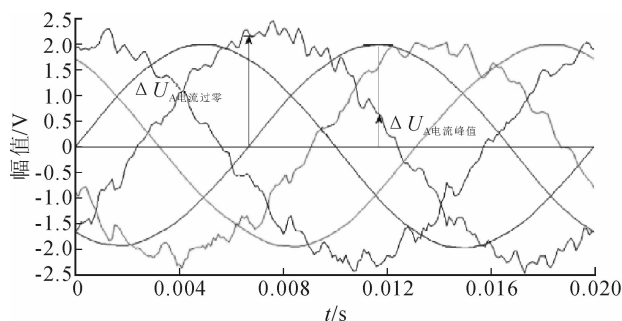


图6 实测电压差及电流波形图

Fig. 6 Oscillogram of voltage difference and current

以计算A相的漏阻抗为例:A相电流过零点时的电压差信号为 $\Delta U_{A \text{ 电流过零}}$,此时回路方程的右边只剩下等效电感与电流对时间的导数这一项,即可得到漏电感;同理在A相电流曲线经过峰值时,回路方程右边只剩下等效电阻与电流的乘积,此时可方便地得到电压差信号 $\Delta U_{A \text{ 电流峰值}}$ 及电流峰值,进而获得漏电阻。

这种利用电流过零点及电流峰值处对时间导数为零的方法可避免其他方法庞大的数学运算,也可将谐波的影响降到最低。

4 绕组变形在线监测系统的实验研究

4.1 Y/ Δ 型接法变压器绕组变形实验室研究

在建立的实验室试验平台和在线监测系统基

础上,对待试 Y/ Δ 变压器进行了研究。试验时阻性负载 $R=4.84\ \Omega$;阻感性负载时,阻性负载 $R=4.84\ \Omega$ 且并联感性负载 $L=0.051\ \text{H}$ 。实验中接法分为 3 种情况:正常、轻度变形(相邻两饼间并联 $2.5\ \text{nF}$ 电容)、较重变形(相邻两饼间并联 $1.5\ \mu\text{F}$ 电容)(注:电容均在 C 相绕组上并联),见图 7。

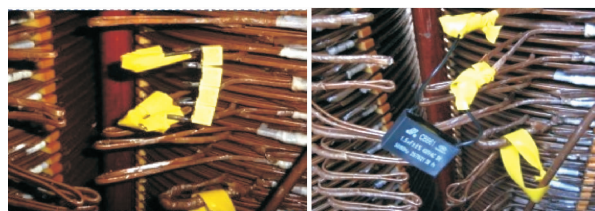
(a) 饼间并联电容 $2.5\ \text{nF}$ (b) 饼间并联电容 $1.5\ \mu\text{F}$

图 7 绕组缺陷的模拟

Fig. 7 Simulation of winding defect

在实验线电压为 $8.75\ \text{kV}$ 条件下,负载为阻感性时,各相计算所得的等效电阻变化见表 1。各相计算所得的漏电感变化见表 2。

表 1 等效电阻与正常值比较($8.75\ \text{kV}$)Tab. 1 Comparison of equivalent resistance ($8.75\ \text{kV}$)

绕组状态及变化		A相	B相	C相
正常	电阻/ Ω	22.997	23.165	22.367
	相对变化/%	0	0	0
$2.5\ \text{nF}$	电阻/ Ω	21.998	23.030	21.567
	相对变化/%	-4.345	-0.584	-3.579
$1.5\ \mu\text{F}$	电阻/ Ω	22.217	22.997	22.790
	相对变化/%	-3.393	-0.729	1.889

表 2 等效漏电感与正常值比较($8.75\ \text{kV}$)Tab. 2 Comparison of equivalent inductance($8.75\ \text{kV}$)

绕组状态及变化		A相	B相	C相
正常	电感/ H	0.457 86	0.411 69	0.459 58
	相对变化/%	0	0	0
$2.5\ \text{nF}$	电感/ H	0.458 97	0.411 06	0.458 35
	相对变化/%	0.242 13	-0.151 26	-0.267 62
$1.5\ \mu\text{F}$	电感/ H	0.459 95	0.409 71	0.458 18
	相对变化/%	0.455 58	-0.478 70	-0.304 55

由实验结果可知:等效电阻变化杂乱无规律,不易判断;等效漏电感参数变化较等效电阻有规律,监测系统能够对该种接线方式的变压器的绕组变形进行判断。对基于漏电感参数的变压器绕组变形监测系统,建议 Y/ Δ 型接法变压器的绕组变形判据为:连续多次(20 次以上)监测变压器的漏电感并求出短时平均值,并与以前监测得到的漏电感长期平均值比较,当任一相的漏电感短时平均值相对长期平均值变化 0.4% 时,应对该变压器引起注意;当漏电感短时平均值相对长期平均值变化 $2\%\sim 4\%$ 时,

依据相应 IEC^[18]和国标^[19]判定变压器存在严重绕组变形。

4.2 监测系统的现场应用

监测系统应用于现场研究(湖北鄂州石山变电站),待测变压器为 Y/ Δ 型接法变压器(见图 8(a))。现场运行的变压器绕组变形监测系统见图 8(b)。



(a) 位于石山变电站的待测变压器



(b) 绕组变形监测系统现场接线图

图 8 现场运行的变压器绕组变形监测系统

Fig. 8 Transformer and on-line monitoring system operated in Shishan Substation

现场运行的变压器绕组变形监测结果见表 3、4。

表 3 等效电阻变化

Tab. 3 Change of equivalent resistance

	A相	B相	C相
平均值/ Ω	1.159 14	1.219 49	1.349 22
标准差/ Ω	0.015 84	0.013 62	0.014 24
变化率/%	3.27	1.68	2.84

表 4 等效电感变化

Tab. 4 Change of equivalent inductance

	A相	B相	C相
平均值/ H	0.100 39	0.105 70	0.103 28
标准差/ H	0.000 80	0.000 86	0.000 62
变化率/%	1.61	1.34	1.41

可以看出:此时三相绕组 R_k 和 L_k 有一定的波动,但是变化幅度不大。由现场监测结果与变压器额定值比较,说明变压器状态良好。

5 结语

笔者根据短路阻抗法原理,基于漏电感参数辨

识的短路阻抗在线监测技术,并研制了绕组变形的实验室研究平台。

提出了一种快速计算变压器绕组漏电抗的计算方法:在电流峰值处,忽略漏电感影响,直接由电压差和电流比值得到漏电感;在电流过零处,忽略漏电阻影响,直接由电压差和电流微分的比值得到漏电感。

研制的绕组变形在线监测系统对一、二次电压先在硬件电路中做减法并放大到AD采集卡的输入极值附近,再由AD采集,可将算法的分辨率几近提高到采集卡的最大精度。

基于该在线监测系统,在实验室平台和现场对漏电抗参数进行了识别和绕组变形相关判据的研究。该系统极大地减少计算绕组漏感抗的复杂程度并提高了计算结果的精确度,为现场在线监测绕组故障提供了一种有效的方案。

参考文献:

- [1] 王梦云,薛辰东. 1995-1999年全国变压器类设备事故统计与分析[J]. 电力设备,2001(3):11-19.
WANG Meng-yun, XUE Chen-dong. Statistic analysis of transformer's faults and defects at voltage 110 kV and above between 1995 and 1999[J]. Electrical Equipment, 2001(3):11-19.
- [2] 王梦云. 2000-2001年全国超高压变压器、电流互感器事故和障碍统计分析[J]. 电力设备,2002(12):1-6.
WANG Meng-yun. Statistic analysis of national ultrahigh transformer, current transformer faults and defects between 2000 and 2001[J]. Electrical Equipment, 2002(12):1-6.
- [3] 王梦云. 2002-2003年国家电网公司系统变压器类设备事故统计与分析(一)[J]. 电力设备,2004(10):20-25.
WANG Meng-yun. Statistic analysis of transformer's faults and defects of state grid between 2002 and 2003 (First Part)[J]. Electrical Equipment, 2004(10):20-25.
- [4] 王梦云. 2004年度110 kV及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备,2005(11):31-37.
WANG Meng-yun. Statistic analysis of transformer's faults and defects at voltage 110 kV and above in 2004[J]. Electrical Equipment, 2005(11):31-37.
- [5] 王梦云. 2005年度110(66) kV及以上变压器事故与缺陷统计分析[J]. 电力设备,2006(11):99-102.
WANG Meng-yun. Statistic analysis of transformer's faults and defects at voltage 110 (60)kV and above in 2005 [J]. Electrical Equipment, 2006(11):99-102.
- [6] 徐大可. 监测变压器绕组变形的短路电抗在线测量技术[D]. 西安:西安交通大学博士论文,2001.
- [7] 徐大可,汲胜昌,李彦明. 变压器绕组变形在线监测的理论研究[J]. 高电压技术,2000,26(3):16-18.
XU Da-ke, JI Sheng-chang, LI Yan-ming. A theoretical Research on on-line monitoring of winding deformation of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3):16-18.
- [8] ARRI E, MOCCI F, TOSI M. On-line monitoring of electrodynamic effects on power transformers windings[C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference. New York:IEEE, 1992:466-469.
- [9] ARRI E, CARTA A, MOCCI F, et al. Diagnosis of the state of power transformer windings by on-line measurement of stray reactance[J]. IEEE Trans. on Instrum. Meas. Special Issue., 1993, 42(2):372-378.
- [10] 郝治国,张保会,李朋,等. 漏电感参数事变技术在线监测变压器绕组变形[J]. 高电压技术,2006,11(32):67-70.
HAO Zhi-guo, ZHANG Bao-hui, LI Peng, et al. Study on on-line detecting of transformer winding deformation based on parameter identification of leakage inductance[J]. High Voltage Engineering, 2006, 11(32):67-70.
- [11] 徐大可,李彦明. 变压器绕组变形在线监测的应用研究[J]. 高电压技术,2001,27(4):21-22.
XU Da-ke, LI Yan-ming. Application research on on-line monitoring of winding deformation of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):21-22.
- [12] 高晶,王建华,张保会,等. 变压器漏电感参数在线辨识方法研究[J]. 西安交通大学学报,2008,42(2):199-203.
GAO Jing, WANG Jian-hua, ZHANG Bao-hui, et al. On-line identification algorithm for transformer leakage inductance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2):199-203.
- [13] SHARKAWY R M, ABDEL-GALIL T K, MANGOUBJ R S, et al. Diagnosis of the state of power transformer windings by on-line measurement of stray reactance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(2):372-378.
- [14] 阎治安,崔新艺,苏少平. 电机学(第二版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2006.
- [15] 曾令全. 电机学[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [16] 侯媛彬,汪梅,王立琦. 系统辨识及其MATLAB仿真[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [17] 郑阿奇. Matlab实用教程[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [18] IEC 60076.5:2006. Power transformer part 5 ability to withstand short-circuit[S].
- [19] GB 1094.5—2008. 电力变压器 第五部分 承受短路的能力[S].

沈煜(1983—),男,硕士,现主要从事高电压绝缘技术、高压电气设备状态监测和诊断方面的研究。