

大型电力变压器低压侧绕组 直流电阻测试新方法

梁志瑞,甄旭锋,牛胜锁

(华北电力大学 电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 介绍了测量大型变压器低压侧绕组直流电阻的几种方法,详述和分析了其测试过程和测量结果,并针对现有测量方法测量低压侧绕组直流电阻时的不足,综合助磁法和全压-恒流电源法,提出了基于这 2 种方法的一种新方法。在电路强制稳态的基础上,开始加全压(高压)以迅速提高线圈电流,缩短过渡过程,然后用恒流源稳定电流进行测量;助磁法是把高、低压绕组串联起来,通电流测量,由于高压绕组的匝数远比低压绕组匝数多,借助于高压绕组的励磁安匝数,用较小的电流就可使铁芯饱和,从而使绕组电感大为减小,以缩短测试时间,而达到快速测试的目的。

关键词: 大型变压器; 直流电阻; 助磁法; 绕组; 快速测量

中图分类号: TM 41; TM 934.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)06-0027-04

0 引言

电力变压器绕组直流电阻的测量是其试验中的重要项目之一,它是确定短路损耗的重要数据,通过直流电阻的测量,可检查线圈质量、分接开关位置接触是否良好、线圈或引线有无折断、并联支路的正确性、有无短路现象^[1]。因此,在交接、预试、大修和调换分接开关后均需进行此项试验。近年来随着电力工业和机械制造水平不断发展,电力系统的容量越来越大,单台变压器容量也不断加大^[2]。大型变压器线圈的容量越大,电压等级越高,电感与电阻的比值就越大。大型变压器的电感高达几百甚至几千亨,电阻值只有几毫欧至几欧。因此,大型变压器绕组直流回路的稳定时间可能长达数十分钟甚至更长,如何快速准确测量电力变压器绕组的直流电阻一直是人们研究和追求的主要目标^[3]。

1 基本原理

变压器绕组等效电路是一个阻值很小的电阻元件 R 和一个较大电感的电感元件 L 串联组合,绕组直流电阻测量的基本电路^[4]如图 1 所示。

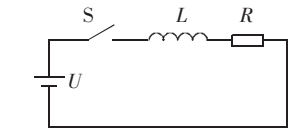


图 1 绕组电阻测量基本原理图
Fig.1 The schematic diagram of winding resistance measurement

当 $t=0$ 时合上开关 S ,回路电压方程为

$$U=L\frac{di}{dt}+iR \quad (1)$$

当 $t=0$ 时 $i=0$,则加一直流电压时绕组电流为

$$i=\frac{U}{R}(1-e^{-t/\tau})=I(1-e^{-t/\tau}) \quad (2)$$

式中 τ 为时间常数, $\tau=L/R$ 。

经过计算,各 τ 与电流的关系见表 1^[5]。

表 1 充电时间与电流的关系
Tab.1 The relationship between charging time and current

t	i	t	i	t	i
τ	0.632I	3τ	0.950I	5τ	0.993I
2τ	0.865I	4τ	0.980I	6τ	0.998I

这样一个一阶的动态电路,要准确地测得直流电阻必须等电路达到稳定后才能读数测试,就是在实际工作中达到需要的精度,至少需要 5τ 时间。因此,采用快速测试,缩短测量时间,提高试验工作效率,对具体测试工作有着重要的意义。

由时间常数表达式 $\tau=L/R$ 可知,减小 τ 缩短时间有 2 种方法,一是减小电感,二是增大回路电阻。

电感可由下式表示:

$$L=\frac{\Phi}{I}=k\frac{\mu_0 n s I}{l I}=k\frac{\mu_0 n s}{l} \quad (3)$$

式中 μ_0 为真空的磁导率, $\mu_0=0.4\pi\times 10^{-6}\text{H/m}$; n 为匝数; s 为铁芯截面; l 为铁芯回路长度; k 为导磁系数。

从上式可以看出,电力变压器绕组的电感量 L 取决于绕组的匝数、铁芯的几何尺寸和硅钢片的导磁系数。对被测变压器而言 n, s, l 是已知的,只有 k 是能改变的。磁通密度 B 与磁场强度 H ,导磁系数 k 与磁场强度 H 的关系曲线^[6]如图 2 所示。

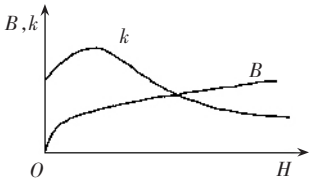


图 2 B, k 与 H 的关系曲线
Fig.2 The relationships between B/k and H

由图 2 可见,当磁场强度 H 很大,铁芯磁通密度趋于饱和时,导磁系数 k 就大幅下降,电力变压器的电感 L 也随之减小^[7]。从 $H=NI/L$ 看,要增大 H ,就要增大 I ,也就是提高稳定电流,才能有效地减小电感 L 。另一方面,在回路中串入一个电阻 R ,增大了回路电阻,同样可减小时间常数 τ 。

减小电感、串入回路电阻在大型变压器直流电阻测量中都有应用。但由于它自身电感大的特点,同时电阻的引入还需要提高电源容量,实际测量采用减少电感的方法效果好。

2 测量方法

直流电阻的测量方法很多,基本方法包括直流降压法和电桥法^[8],此外还有高压充电低压测量法、磁通泵法^[9]、二阶振荡法、短路去磁法^[10]、同一化动态测量法^[11]和消磁动态测量法^[12]等。下面主要介绍几种与大电感绕组直流电阻测量相关的方法。

2.1 增大回路电阻的电路突变法^[13]

增大回路电阻的电路突变法原理电路如图 3 所示,测量电流与时间的关系如图 4 所示。

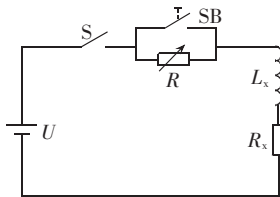


图 3 测量原理电路图
Fig.3 The measuring circuit

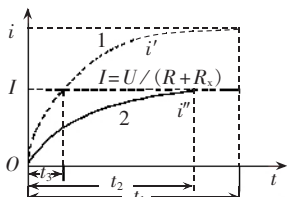


图 4 测量电流的指数曲线
Fig.4 The exponential curves of measuring current

当 S 闭合, SB 也闭合时,回路电流方程为

$$i' = \frac{U}{R_x} (1 - e^{-t/\tau'}) , \tau' = L_x / R_x \quad (4)$$

SB 断开时,回路电流方程为

$$i'' = \frac{U}{R_x + R} (1 - e^{-t/\tau''}) , \tau'' = L_x / (R_x + R) \quad (5)$$

因 $R \gg R_x$, 所以 $\tau' \ll \tau''$ 。测量时,将按钮 SB 闭合,附加电阻 R 短路,使全部电压加在被试绕组上,电流沿曲线 1 以较大的速率上升,一直达到预定的电流 $I (I = U / (R + R_x))$ 时断开按钮 SB ,则电流 i 由曲线 1 立即稳定到曲线 2 的稳定值,绕组的充电时间将由 t_2

($t_2 \approx 5 \tau''$) 缩短到 t_3 。若采用常规测量方法的充电时间为 $t_1 (t_1 = 5 \tau')$, 则 $t_3 \ll t_2 \ll t_1$, 可见该方法能缩短测量时间。

2.2 全压-恒流电源法

全压-恒流电源法^[14]建立在电路强制稳态的基础上,强调开始加全压(高压)来迅速提高线圈的电流,缩短过渡过程。然后用恒流源稳定电流进行测量,是研究大电感电路过渡过程比较好的方法。全压-恒流电源法的原理如图 5 所示。

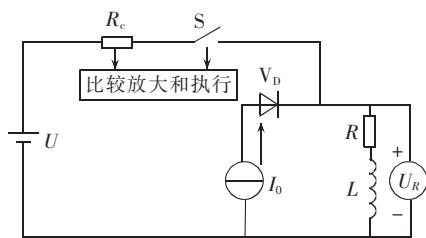


图 5 全压-恒流电源法原理图

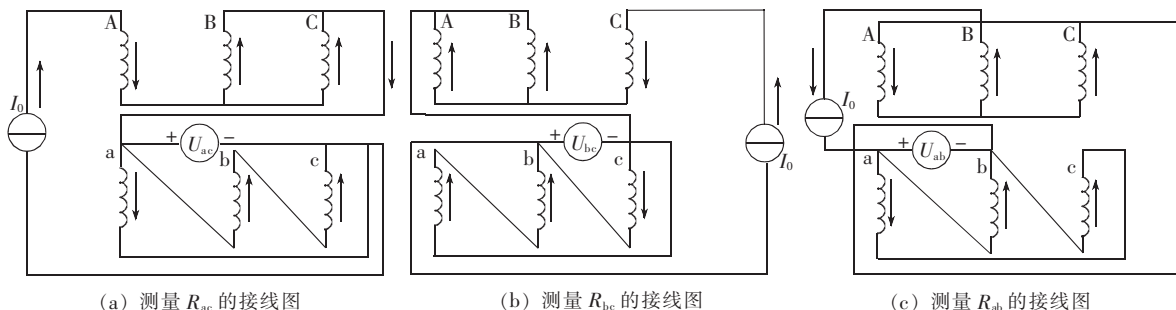
Fig.5 The schematic diagram of full-voltage constant current source method

试验开始,比较放大和执行单元中的开关 S 闭合,全压电源通过采样电阻 R_c 和全压开关 S 加到被试绕组的两端,进行充电。 U 的值取决于测量绕组的 L 、 R 所要求的充电时间的恒流值 I_0 。当充电至 t_1 时,回路电流瞬时值为 I_0 ,采样电阻压降 $U_n = I_0 R_c$,这时比较放大和执行单元通过分析,动作断开 S 。于是,隔离二极管 V_d 自动导通,恒流源向被测绕组供给 I_0 电流。电路电流被强迫稳定在 I_0 上,电路进入强制稳态。读 U_R 的值,计算出直流电阻值。全压-恒流充电时间很短,与测量时间相比可以忽略,这样就提高了工作效率。

2.3 助磁法^[15]

助磁法就是迫使铁芯迅速趋于饱和,从而降低自感效应,减小回路电感,缩短测试时间。把高、低压绕组串联起来,通电流测量,采用同相位和同极性的高压绕组助磁。由于高压绕组的匝数远比低压绕组匝数多,借助于高压绕组的励磁安匝数,用较小的电流就可使铁芯饱和,从而使绕组电感大为减小,以缩短测试时间,而达到快速测试的目的。图 6 为 Y/Δ 接法的变压器助磁法测量的原理接线图,其他接法的原理图类似。

图 6(a)接线原理图中,引出 a 、 c 端线接一个电



(a) 测量 R_{ac} 的接线图

(b) 测量 R_{bc} 的接线图

(c) 测量 R_{ab} 的接线图

图 6 助磁法的接线原理图

Fig.6 The schematic diagram of saturable magnetic circuit method

压表测量电压 U_{ac} ,精密恒流源 I_0 ^[16]提供测量电源,由于高压侧助磁的作用,低压侧磁通饱和,电感值变小,过渡过程缩短,很短时间内就可以读数值。据公式 $R_{ac}=U_{ac}/I_0$ 可得 R_{ac} 。同理,利用原理图 6(b)、图 6(c)接线测量,能快速得到 R_{bc} 、 R_{ab} 数据,据 $R_{ac}=R_a \times (R_b+R_c)/(R_a+R_b+R_c)$, $R_{bc}=R_c(R_a+R_b)/(R_a+R_b+R_c)$, $R_{ab}=R_b(R_a+R_c)/(R_a+R_b+R_c)$,解可得 R_a 、 R_b 、 R_c 值,测量误差在允许的范围内。

3 目前几种方法测试结果的分析与比较

用普通方法测试大型变压器低压侧绕组的直流电阻值,测量阻值 R_{bc} 、 R_{ac} 各需约 30 min 电流达到稳定,测量 R_{ab} 时电流稳定则需要 1~2 h,有时依然不稳定,导致导线与仪器发热,不能继续工作。数据精度也达不到要求。总之,长时间的测量及较大的测量误差,在工作中是不能接受的。

依据 2.3 节助磁法中的原理接线图对保定变压器厂的型号为 SFP-720000/50 变压器成品进行低压侧绕组直流电阻测量,测试结果见表 2(表中 R 为直流电阻, t_{st} 为充电稳定时间, I_0 为恒流源充电电流)。

表 2 助磁法测试结果
Tab.2 Test results of saturable
magnetic circuit method

相别	R/Ω	t_{st}/min	稳定状况	I_0/A
ac	0.0006959	11	稳定	20
ab	0.0006929	16	稳定	20
bc	0.0008878	13	稳定	20

由以上数据可见测量时间缩短到十几分钟,测试速度提高了一倍多,同时三相电路状态均达到稳定,经计算,测量误差也远小于所要求的 $\pm 2\%$ ^[17]。由此可见,助磁法是一种比较好的测试方法。

全压-恒流电源法对大容量变压器的测试,与普通方法相比,测量速度与测量精度都有很大的提高,但与助磁法相比测量时间还要长些。

综上所述,现有测量方法存在 4 个问题。

- a. 三相绕组的测量时间最短仍有 40 min 左右,还有待进一步缩短时间。
- b. 当用助磁法测量不同相的电阻值时,要注意绕组中剩磁对测量电源产生磁通的抵消作用,试验中若发现两者方向相反,则对测量速度和准确性都有严重影响。
- c. 由于大型变压器低压侧绕组呈 Δ 连接,并联绕组存在互感,使得充电时间变长,使测试数据不稳定,不仅使测试数据缺乏可信度,更增加了对设备状况判断的难度。
- d. 试验表明, Δ 接线的变压器低压侧直流电阻测试时,总是存在“两快一慢”问题,有一相绕组的测量时间会明显比其他两相长很多,充电电流不能达到仪器所要求的稳定程度,使三相测试数据不具备可信的比较判断作用。因此,对于大型变压器低压侧 Δ 型接线直流电阻的测试方法,有待进一步研究。

4 新测量方法的研究

为进一步更加快速、准确地测得大电感低压侧绕组的直流电阻值,减小测量误差,提出了全压-恒流电源法与助磁法相结合的一种新测量方法。新方法测量 R_{ac} 的原理接线图如图 7 所示。

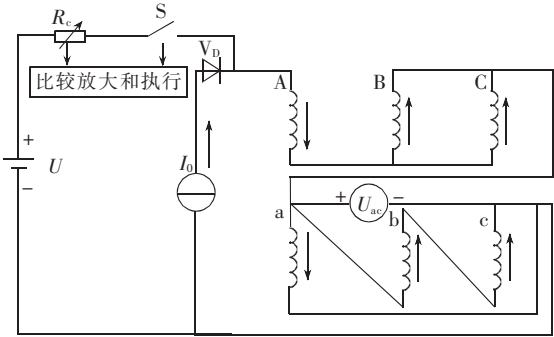


图 7 测 R_{ac} 原理图

Fig.7 The schematic diagram of R_{ac} measuring

由图 7 可见,新方法引入全压-恒流电源作为测量电源,比单纯用恒流源供电的优点是以较高的电压能更快速提升电感中的电流值,缩短达到稳定的时间。由于被测品不是一个绕组线圈,而是 2 个绕组线圈组的串联,所以瞬间加在低压测 a、c 端的电压 U_{ac} 应小于直流电压值 U ,然后逐渐稳定,总体趋势是下降的。电流的变化规律正相反,总趋势是上升到稳定。其电压、电流波形如图 8 所示。

由零时刻电源 U 开始充电,电流上升, t_0 时刻电流升至 I_0 ,直流电压源自动断开,恒流源通过二极管 V_D 供电, t_1 时刻稳定到 I_0 值。 t_2 时刻电压表也达到稳定值,这样计算由公式 $R=U/I$,可得电阻值 R_{ac} 。同理可得其他两相的电阻值。

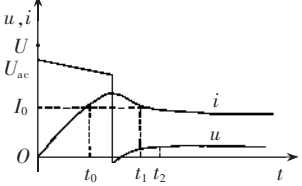


图 8 电压、电流波形图

Fig.8 The waveforms of voltage and current

新方法仿真结果比较:按助磁法和新方法原理接线图搭建仿真模型,并经计算机仿真,比较同一型号的变压器模型 2 种方法的仿真回路输出电流波形,仿真电流波形开始都按指数规律变化,然后逐渐稳定为一条平行坐标轴的直线,但按助磁法接线仿真结果的稳定时间明显大于新方法下的仿真电流波形。逐渐增大电力变压器模型的容量,就会发现这种现象越发明显。显然,新方法会更快速测得其直流电阻值,特别是对大容量的变压器有更明显的优势,具有实用性。

同时分析发现比较执行单元的良好性能是这种方法的快速测量成败的关键。如果动作过晚,电路中电流较大,有可能对器件造成损害;若动作过早,电流会有很长的上升时间,不能快速进入稳态,影响测量的快速性,失去了使用此方法的意义。同时稳定性能更好、纹波系数更小的全压电压源和精

密恒流源的研发制作,是进一步研究的方向。

5 结论

a. 采用高压-小电流恒流电源可以实现对大型变压器绕组电阻的快速测量。这样助磁法中的“两快一慢”问题也有很大的改观,“两快”绕组的测量时间与“一慢”绕组的测量时间的差距明显缩小,充电电流很快就能达到仪器所要求的稳定程度。

b. 整个测量过程中电压源的断开和恒流源的接入都是自动完成的,不仅测试方便,还消除了人为操作带来的误差。

c. 有较高的精度,调节 R_c 值,能实现较宽的测量范围。

d. 测量中,针对助磁法中剩磁消磁的问题,只要接线时,注意测量时铁芯中的磁通方向与测试其他相后剩磁方向相同,就可以解决。

e. 对于并联绕组存在互感问题,新方法没有从消除互感影响入手来解决问题,而是加全压来迅速提高线圈的电流,在短时间内使过渡过程强制稳定,提高了数据的可信度。

参考文献:

- [1] 冯勇. 浅谈缩短测量大容量变压器绕组直流电阻时间的几种方法[J]. 湘钢科技,2002(4):39-41.
FENG Yong. Simple discussed several methods of reducing measuring time for testing large-size power transformer winding DC resistance[J]. Xianggang Science and Technology,2002(4):39-41.
- [2] 林春耀. 大型变压器直流电阻的快速测量法及注意事项[J]. 广东电力,1997(2):38-39.
LIN Chun-yao. The methods of large-size transformer DC resistance rapid measurement and matters needing attention[J]. Guangdong Electric Power,1997(2):38-39.
- [3] 马春排,张源斌. 大型电力变压器绕组直流电阻“三点法”测试研究[J]. 西安交通大学学报,2002,36(4):410-413.
MA Chun-pai,ZHANG Yuan-bin. Testing by “three points method” of the direct current resistance in power transformer coil[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2002,36(4):410-413.
- [4] 苏金福. 变压器直流电阻试验分析[J]. 变压器,2005,42(8):22-26.
SU Jin-fu. Analysis on measurement of direct current resistance[J]. Transformer,2005,42(8):22-26.
- [5] 王亮. 电力变压器直流电阻快速测量的研究[D]. 保定:华北电力大学,2002.
WANG Liang. The research for rapid surveying the power transformer DC resistance[D]. Baoding:North China Electric Power University,2002.
- [6] 刘凯. 新型电力变压器绕组直流电阻速测仪的研制[D]. 武汉:武汉大学,2004.
LIU Kai. Research of a new type quickly measuring instrument for the DC resistance of transformers' windings[D]. Wuhan:Wuhan University,2004.
- [7] 王景吾. 变压器试验技术(3)[J]. 变压器,1998,35(11):41-43.
WANG Jing-wu. Transformer test technology(3)[J]. Transformer,1998,35(11):41-43.
- [8] 王景吾. 变压器试验技术(1)[J]. 变压器,1998,35(9):41-43.
WANG Jing-wu. Transformer test technology (1)[J]. Trans-

former,1998,35(9):41-43.

- [9] 陈启昌,兰华,张文生. 测量大型电力变压器绕组电阻的磁通泵法[J]. 变压器,1993,30(3):30-32.
CHEN Qi-chang,LAN Hua,ZHANG Wen-sheng. The flux stepped saturation method for measuring DC of large-scale power transformer's windings[J]. Transformer,1993,30(3):30-32.
- [10] 陈启昌. 测量电力变压器绕组的短路去磁法[J]. 变压器,1994,31(10):9-12.
CHEN Qi-chang. Method of expunction transient section through short-circuit is for measuring transformer's winding[J]. Transformer,1994,31(10):9-12.
- [11] 梁志瑞,盛四清,赵书强,等. 基于同一化方法的绕组直流电阻测量方法[J]. 电力系统自动化,2001,25(10):42-44.
LIANG Zhi-rui,SHENG Si-qing,ZHAO Shu-qiang,et al. A new method for measuring direct current resistances of inductive coils[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(10):42-44.
- [12] 姜巍青,毛承雄,陆继明,等. 基于 DSP 的变压器直流电阻的“消磁动态”法测试研究[J]. 电子工程师,2003,29(2):30-33.
JIANG Wei-qing,MAO Cheng-xiong,LU Ji-ming,et al. Study of the demagnetization dynamic measurement based on DSP for DCR of transformer[J]. Electronic Engineer,2003,29(2):30-33.
- [13] 李满坤,周理兵. 大型变压器直流电阻测试的方法及特点[J]. 变压器,2000,37(7):35-39.
LI Man-kun,ZHOU Li-bing. Methods and characteristics of measurement on DC resistance of large-size power transformer[J]. Transformer,2000,37(7):35-39.
- [14] 王景吾. 变压器试验技术(4)[J]. 变压器,1998,35(12):39-42.
WANG Jing-wu. Transformer test technology(4)[J]. Transformer,1998,35(12):39-42.
- [15] 王朗珠,姚一平. “助磁法”在大型变压器低压侧直流电阻测试中的运用[J]. 高压电器,2003,39(2):59-60.
WANG Lang-zhu,YAO Yi-ping. Application of saturable magnetic circuit method to measuring the DC resistance of low voltage winding of large-size transformer[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(2):59-60.
- [16] 曾国宏,王立文. 电力变压器直流电阻测试仪的设计与研究[J]. 电测与仪表,1999,36(3):10-15.
ZENG Guo-hong,WANG Li-wen. The design and study of power transformer DC resistance testing instrument[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,1999,36(3):10-15.
- [17] 管金云,刘原. 变压器绕组直流电阻快速测试方法[J]. 南华大学学报:自然科学版,2004,18(3):88-91.
GUAN Jin-yun,LIU Yuan. Rapid measurement of transformer wire wound's DC resistance[J]. Journal of Nanhua University: Science and Technology,2004,18(3):88-91.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

梁志瑞(1959-),男,河北磁县人,教授,中国电机工程学会城市供电专委会委员,从事电力系统自动化、电气设备参数测量技术及故障分析的教学与研究工作;

甄旭锋(1977-),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行、分析与控制(E-mail:zhenxufeng921@163.com);

牛胜锁(1980-),男,河北高邑人,助教,硕士,研究方向为电力系统参数测量。

DC resistance measurement for low voltage side winding of large-scale transformer

LIANG Zhi-rui,ZHEN Xu-feng,NIU Sheng-suo

(North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: Several DC resistance measurements for low voltage side winding of large - scale transformer are introduced,detailed in testing process and measuring results. A new method is proposed to improve present measuring methods,which is based on the full-voltage constant-current source method and the saturable magnetic circuit method. At forced stationary circuit state,full - voltage is used to quickly increase the winding current and shorten the transient process,and constant-current source is then achieved for measuring. With the high and low voltage windings connected in series,because the turns of high-voltage windings are much more than those of low-voltage windings,a small going-through measuring current may make the iron core saturated,which reduces the winding inductance greatly and shortens the testing time.

Key words: large-scale transformer; DC resistance; saturable magnetic circuit method; windings; quick measuring