

文章编号:1001-1609(2004)01-0050-03

# 一种快速测量变压器绕组直流电阻的新方法

关根志, 刘凯, 黄海鲲, 赵来红

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

## A New Quick Measuring Method of DC Resistance of Transformer's Windings

GUAN Gen-zhi, LIU Kai, HUANG Hai-kun, ZHAO Lai-hong

(School of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**摘要:** 针对变压器绕组的特性,提出了一种在过渡过程中测取其直流电阻的新方法,该方法具有快速、简单、准确的特点。同时进行了模拟试验,并给出了以单片机为核心的智能仪器实现方案。

**关键词:** 变压器; 绕组; 直流电阻; 快速测量; 单片机

**中图分类号:** TM41

**文献标识码:** A

**Abstract:** Based on the inherent characteristics of transformer windings, a new measuring method that calculates the DC resistance of the windings during the transient process is proposed in this paper. It is quick, simple and accurate. Experimental simulation and intelligent instrument solution with single-chip microcontroller are described.

**Key words:** transformer; windings; DC resistance; quick measuring; single-chip microcontroller

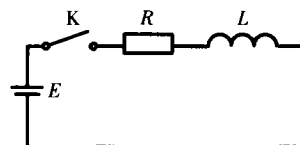
## 1 引言

电力变压器广泛应用于电力系统中,按照我国标准 GB1094-1996 的要求,电力变压器在制造过程中、大修后、交接试验和预防性试验中以及绕组平均温升的测定和故障诊断等都必须进行绕组直流电阻的测量,以对电力变压器的特性进行分析与判断<sup>[1-3]</sup>。特别在预防性试验中,人们希望快速测量出绕组的直流电阻值,以便使测得的变压器直流电阻值接近于实际运行状态下的直流电阻值。

电力变压器的绕组具有大电感、微电阻的特点,其固有的时间常数( $\tau = L/R$ )较大,因此采用传统的电桥法或直流压降法测量,往往需要较长的时间才能达到平衡,从而得出结果,所以无法实现快速测量<sup>[4]</sup>。尽管人们已采取增大回路电阻的电路突变法、短路去磁法等方法来加快电路电流达到稳定值的时间,但由于原理上都要求等待电流达到稳定时才能进行测量,因此只能相对缩短时间,而不能从根本上实现快速测量。为此,笔者通过分析研究,提出了一种新的快速测量方法,该方法具有简单可靠、易于扩展等优点。

## 2 新方法的基本原理

电力变压器绕组可等效为一个电感  $L$  和电阻  $R$  的串联电路。绕组直流电阻测量的基本电路见图1<sup>[5]</sup>。



K—开关                      L—绕组电感  
R—绕组直流电阻          E—直流电源

图1 变压器绕组直流电阻测量基本电路

合上开关K,回路电压方程为:  $E = L \frac{di}{dt} + iR$ 。

考虑到开关的非理想性,设合上开关后电压达到  $E$  的时刻为  $t=0$ ,此时电路中的瞬时电流大小为  $i(0_-)$ 。根据“三要素”法,求得电压达到  $E$  后通过绕组的电流为:

$$i(t) = \frac{E}{R} + [Li(0_-) - \frac{E}{R}]e^{-t/\tau} \quad (1)$$

其中:  $\tau = L/R$ ,为回路时间常数。由式(1)得:

$$\frac{E}{R} - i(t) = [\frac{E}{R} - Li(0_-)]e^{-t/\tau} \quad (2)$$

式(2)两边取对数,有:

$$\ln[\frac{E}{R} - i(t)] = \ln[\frac{E}{R} - Li(0_-)] - \frac{t}{\tau} \quad (3)$$

对式(3)的进一步推导和分析表明,在一定条件下,依次测得的电流值  $i(t_1), i(t_2), i(t_3)$  可满足式(4),即:

$$\ln[\frac{E}{R} - i(t_3)] - \ln[\frac{E}{R} - i(t_2)] = \ln[\frac{E}{R} - i(t_2)] - \ln[\frac{E}{R} - i(t_1)] \quad (4)$$

由式(4)得:

$$\frac{\frac{E}{R} - i(t_3)}{\frac{E}{R} - i(t_2)} = \frac{\frac{E}{R} - i(t_2)}{\frac{E}{R} - i(t_1)} \quad (5)$$

由式(5)得:

$$R = E \frac{2i(t_2) - [i(t_1) + i(t_3)]}{i^2(t_2) - i(t_1)i(t_3)} \quad (6)$$

由式(6)可见,用该方法测量电力变压器绕组直流电阻时不管电路的状态如何,只需依次测取式(6)中的  $i(t_1), i(t_2), i(t_3)$ , 在电源电势  $E$  已知的条件下即可得到  $R$  的值。因此可使测量时间任意的短,所以从根本上解决了快速测量  $R$  的问题。

该方法与现有的各种方法相比较,其突出优点是在测量电力变压器绕组直流电阻时,从根本上脱离了电路的稳定状态对测量的影响,因此可以最大限度地实现快速测量。这是现有的其它测量方法无法达到的,也不需要迫使变压器铁心饱和或串入电阻、电容等以减小时间常数,所以克服了传统测量方法所需电源容量大及回路其它附加测量元件对测量准确度的影响。

### 3 新方法的模拟试验

根据上述原理,使用 YD(Z)型工频试验变压器和 HT-1712F 型直流稳压电源进行了模拟试验。试验中利用串联在测试电路中的取样电阻来取得电流信号,电源电压取为 2.02 V,取样电阻  $R_s=3.11 \Omega$ 。试验波形由 TDS-220 示波器获得,所得波形见图 2。

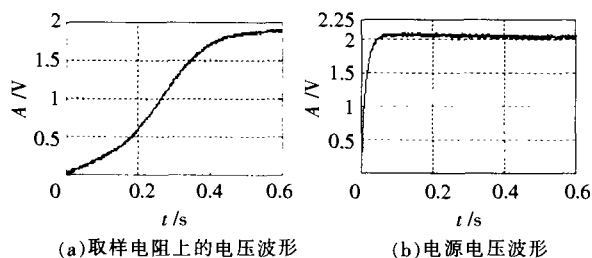


图2 试验所得波形

$$\text{令 } A = \frac{2u_{s2} - (u_{s1} + u_{s3})}{u_{s2}^2 - u_{s1}u_{s3}} \quad (7)$$

式中:  $u_{s1}, u_{s2}, u_{s3}$  分别为式(6)中的  $i(t_1), i(t_2), i(t_3)$  相对应的取样电阻上的电压。利用 TDS-220 所取得的数据进行计算处理,可以得到  $A$  值与时间的对应关系,见图 3。

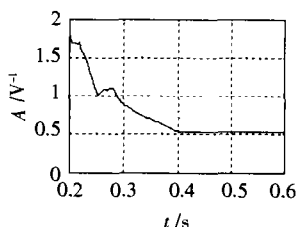


图3 A 值与时间的关系

显然,  $i = u_s / R_s$  ( $R_s$  为取样电阻), 据此比较式(7)与式(6)可得:

$$R = R_s \cdot E \cdot A \quad (8)$$

即  $A$  值与  $R$  值仅相差一系数。比较图 3 与图 2 可见,当时间经过约 0.4 s,即电源电压达到稳定后,  $A$  值几乎不变,求得这一段中  $A$  的平均值为  $0.525 (V^{-1})$ ,从而由式(8)得  $R=3.298 \Omega$ ,去除取样电阻后为

$0.188 \Omega$  (这其中还包含有接触电阻)。这一结果与使用 CA10 型速测仪测得的结果 ( $0.180 \Omega$ ) 十分接近,说明了式(6)的正确性与可行性。由图 3 可见,测量所需时间不足 1 s,达到了快速测量的目的。

实际电力变压器的时间常数均较大,电流变化缓慢,电路中存在的杂散元件及非线性元件的影响很小,更加接近于理想情况,从而用式(8)计算所得的结果更加准确。这正好为使用上述方法进行快速测量提供了有利的条件。

虽然模拟试验所采用的工频试验变压器与实际的电力变压器的特性不尽相同,但能够反映其基本过程。另外,实际中的电力变压器绕组的直流电阻会更小,大约在  $m\Omega$  级,如果采用取样电阻,可能会出现由于取样电阻值的微小变化而引起测取的直流电阻值存在较大相对误差的情况,从而影响测量的准确度。所以在实际运用中,为了提高测量准确度,应当采用准确度高、频带宽的电流传感器,而尽量避免采用取样电阻。如果电流信号过小,必要时还应当在取样/保持电路之前加放大器以满足测量的需要。

### 4 新方法的实现

由上可知,这种快速测量新方法的实现需要依次测取式(6)中的各电流值,并进行一定的计算,另外还需要进行一定的分析、比较以提高测量准确度。

单片机内含定时/计数器,并能进行一定量的计算,完全能满足该测量方法的这些要求,而且以单片机为核心的智能仪器具有简单、可靠、易于扩展的优点<sup>[6]</sup>。采用图 4 所示的以单片机为核心的智能仪器系统来实现变压器绕组直流电阻的快速测量。

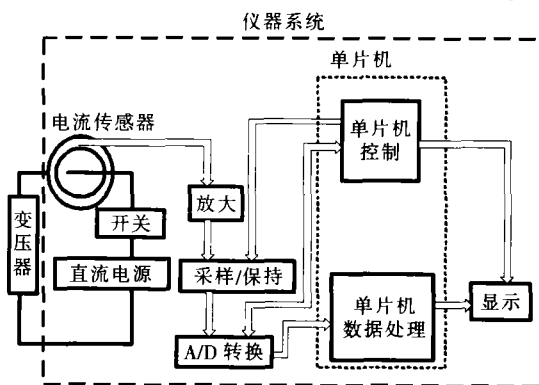


图4 智能仪器系统

其中,单片机数据处理部分主要完成从 A/D 转换器读入并存储数据(即式(6)中的各电流值),利用式(6)进行计算并存储所得结果,分析、比较计算所得数据,对有效数据进行平均得出最终结果以及将最终结果转化为 BCD 码以供显示等。单片机的控制部分主要是定时以控制采样/保持电路和 A/D 转换器的工作,控制单片机读入 A/D 转换的结果和显示所得结果等。单片机采用图 5 所示的程序流程。

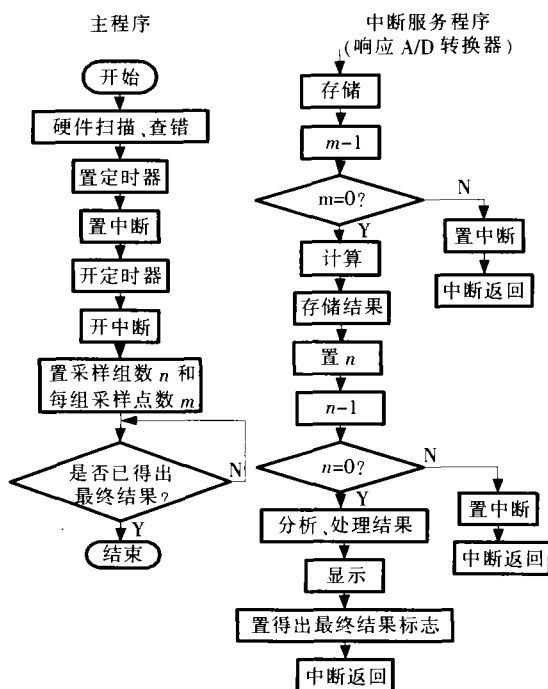


图5 单片机程序流程图

## 5 结语

经过理论推导得出了一种快速测量电力变压器绕组直流电阻的新方法,进行了初步的试验,并设计出了基于智能仪器的实现方法。这种新方法具有以

(上接第49页)

型式和例行试验按照相应的 ANSI 和 IEC 的适应标准执行。需要说明的是,该型开关工作是晶闸管电流过零时切换,没有电弧产生,故开关机械与电气寿命一致,寿命长短不取决于操作次数,而取决于维护和运行条件,如频繁过负荷等。设计寿命为 30 年以上。

三相分接开关是每相单独分开并互相独立操作,故系统除保持每相电压的稳定外,亦能补偿各相之间的不平衡。

分接开关的晶闸管使用时均系全导通(控制角  $\alpha=0^\circ$ ),所以几乎没有谐波,故没有附加的过滤要求。

电子分接开关无接触损耗,故损耗值较低,其值大小与额定值和采用的电路有关,一般在额定负载功率的 0.05%~0.5% 之间。

UED 型分接开关正常运行温度范围是户外型:  $-40\sim 50^\circ\text{C}$ 。控制系统必须安装在靠近 DVR 的空调控制室内,气温  $10\sim 30^\circ\text{C}$ 。

DVR 在订货与系统设计前,必须先确定如下要点:①临界负荷保护相对应的故障型式(单相接地、相对相或三相故障)及故障位置;②电压升降变动的持续时间和大小;③变压器连接;④临界负荷的功率因素和大小;⑤重要负荷单独供电的可能性;⑥临界负荷的电压校正要求(仅相对相或相对地电压的

下的特点:

- (1) 动态测量,从而可以实现快速测量;
- (2) 不需要大容量电源,降低成本、减小体积;
- (3) 不需要减小时间常数,提高了测量准确度;
- (4) 采用了以单片机为核心的智能仪器系统,具有一定的数据分析、处理能力,从而提高了测量准确度;
- (5) 采用智能仪器系统,简单、可靠,测量过程自动完成,不需要人工干预;
- (6) 易于扩展,方便实现其他功能,如人机对话、与计算机通讯及通过对程序的简单修改实现其他的功能等。

## 参考文献:

- [1] 郑景清. 变压器应用与维修[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1993.
- [2] 魏春华. 变压器试验[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- [3] 钟洪璧. 电力变压器检修与试验手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2000.
- [4] 李满坤, 周理兵. 大型电力变压器直流电阻测试的方法及特点[J]. 变压器, 2000, 37(7): 35-39.
- [5] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
- [6] 何利民. MCS-51 系列单片机应用系统设计: 系统配置与接口技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1990.

作者简介:关振志(1946-),男,河南襄城人,教授,博士生导师,从事高电压技术专业的教学和科研工作。电话:027-67802673。

百分比及响应时间)。

## 6 结语

晶闸管有载分接开关实际还存在许多问题和难点,如价格昂贵(远高于主变成本的 15%)、体积庞大(近乎主变尺寸)及电控系统的敏感干扰等,尚无法马上与现有产品竞争,但其具有无油、无电弧、无运动部件、低损耗、长寿命、少维护、结构简单及明显的静态性能等优势<sup>[1,2]</sup>。随着大功率晶闸管制造水平的提高(用于三峡 HVDC 的 3 500 A/7 200 V 晶闸管国内已批量供货),光电光纤、电控技术,尤其是数字化控制技术的日臻完善,密封型变压器和干式套管的推广使用,晶闸管分接开关的缺陷和问题会逐渐减少和消除,综合优势会逐步显现。

## 参考文献:

- [1] 张德明. 有载分接开关国内现状及发展动向[J]. 变压器, 2000, 37(1): 36-39.
- [2] 胡志松, 姚磊. 有载分接开关实用手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.

作者简介:吴畏(1974-),男,从事有载分接开关的销售和技术服务。